

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS



**Recarga Artificial de Acuíferos**

Mayra Alejandra Suárez Segura

Andrea Velásquez Restrepo

Trabajo de monografía como requisito para optar al título de Especialista en Manejo y

Gestión del Agua

Tutora

Yudy Andrea Londoño Cañas

P.hD. en ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Manejo y Gestión del Agua

Medellín, Antioquia

Noviembre, 2022

# RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

---

<b>Cita</b>	(Suarez Segura & Velásquez Restrepo, 2022)
<b>Referencia</b>	Suarez Segura, M.A., & Velásquez Restrepo, A. (2022). <i>Recarga Artificial de Acuíferos, 2022</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---

 CC BY NC SA

Especialización en Manejo y Gestión del Agua, Cohorte XI.



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

# RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

## **Dedicatoria**

Este trabajo de monografía está dedicado al Dr. José Luis Arumí Ribera.

## **Agradecimientos**

Un profundo agradecimiento a una excelente mujer y en especial amiga Camila

Zuluaga Gómez.

A mi compañero de vida Julio Cesar Mendoza por su apoyo y compañía

incondicional.

# RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

## Resumen

La escasez de agua se convertido en una de las principales problemáticas ambientales y sociales en el planeta, por eso, se han estudiado diferentes alternativas que aporten a la conservación, cuidado y disponibilidad del agua, teniendo en cuenta las etapas y transformaciones que atraviesa el ciclo hidrológico. Una de las soluciones que ha cogido más fuerza es la recarga artificial de acuíferos entendiendo la dinámica de estos sistemas y analizando los tipos de recargas, las zonas ideales para la recarga y monitoreando la calidad del agua, esto previendo que no afecte los parámetros del agua subterránea y que sea apta para el consumo humano. Adicionalmente se realiza una comparación sobre la normativa existente en Colombia y otros países donde se encontró que, a pesar de tener legislación sobre aguas subterráneas y acuíferos, las recargas artificiales de estos no es un tema que se aborde de manera asertiva.

*Palabras clave: Escorrentía, infiltración, Ciclo hidrológico, Zonas de recarga, Recarga artificial de acuíferos, calidad del agua.*

# RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

## Tabla de Contenido

1	Introducción .....	8
2	Objetivos .....	11
2.1	Objetivo General.....	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3	Metodología .....	12
4	Marco Teórico.....	14
4.1	Ciclo Hidrológico, Distribución y Disponibilidad del Agua.....	14
4.2	Sistemas de Acuíferos .....	17
4.3	Características de las Zonas de Recarga y Descarga .....	23
4.4	Recarga Artificial de Acuíferos .....	25
4.4.1	Antecedentes de la Recarga Artificial de Acuíferos.....	27
4.5	Tipo de Recargas .....	31
4.6	Impactos en la Calidad del Agua Subterránea por la Explotación Inadecuada de los Acuíferos y las Técnicas más Usadas en la Recarga Artificial.....	43
4.7	Normatividad Relacionada con el Agua Subterránea .....	47
5	Conclusiones .....	54
6	Referencias Bibliográficas .....	56

# RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

## Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Factores que influyen en la elección del tipo de recarga a usar de acuerdo con el IGRAC (2007)</i> .....	33
Tabla 2 <i>Descripción, ventajas y desventajas generales de los tipos de recarga más usados a nivel mundial</i> .....	37
Tabla 3 <i>Marco legal en materia de agua subterránea y recarga de acuíferos</i> .....	48

## RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

### Lista de Figuras

Figura 1 <i>Etapas del ciclo hidrológico</i> .....	16
Figura 2 <i>Representación de los acuíferos confinado y no confinado</i> .....	21
Figura 3 <i>Renovación anual de agua dulce (km<sup>3</sup>/año)</i> .....	29
Figura 4 <i>Extracción de agua dulce en el año 2017 por continente y por uso (km<sup>3</sup>/año)</i> .....	30
Figura 5 <i>Investigaciones relacionadas con la recarga artificial de acuíferos por países</i> .....	31
Figura 6 <i>Tipos de recarga a nivel mundial</i> .....	36
Figura 7 <i>Ubicación de los métodos de recarga artificial de acuíferos más usados en el portal web del IGRAC</i> .....	42
Figura 8 <i>Normativa colombiana asociada a las aguas subterráneas</i> .....	52

## 1 Introducción

Los recursos hídricos compuestos por los cuerpos de agua disponibles en el planeta cada día se valorizan más debido, principalmente, al impacto que causa la acción humana sobre el fenómeno de escasez de agua que se genera naturalmente por la variabilidad climática, pero también como resultado del crecimiento de la población y la contaminación de las aguas superficiales que afectan la distribución espacial y temporal de los recursos de agua (ENA, 2010). Ese contexto donde se enmarca la valorización de los cuerpos de agua ha suscitado la investigación sobre las aguas subterráneas aumentando significativamente durante los últimos años la documentación relativa a este recurso resultado del ciclo hidrológico en la literatura.

En los reportes que se han elaborado recientemente se registra la cantidad casi invariable de 1386 millones de km<sup>3</sup> de agua disponible en todo el mundo, de la cual, alrededor de un 2.5 % son cuerpos de agua dulce y al menos un 97.5 % de estos cuerpos hídricos es agua salada (Durango, 2017). De manera concatenada, en el informe *Agua subterránea: hacer visible lo invisible* que elaboró la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Unesco (2022), se reportó que del total de cuerpos de agua dulce que se encuentra disponible en el planeta el 99 % de este recurso natural es agua subterránea. El agua subterránea se ha convertido en un foco de desarrollo social, económico y ambiental para las sociedades al proporcionar el 49 % del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial, y alrededor del 25 % de toda el agua extraída para riego sirviendo al menos a un 38 % de la población mundial. Así, el agua subterránea se ha convertido en la principal fuente y reserva de agua dulce en el mundo (UNESCO, 2022).

Estos cuerpos de agua se cuantifican utilizando diferentes estrategias. Las más usadas son: i) el análisis del ciclo hidrológico y las principales afectaciones que este sufre en cada una de sus etapas alterando la disponibilidad y recolección de agua; y ii) el estudio de los sistemas de acuíferos por medio de la identificación y delimitación de las provincias hidrogeológicas

que corresponden a barreras impermeables que son representadas por fallas regionales y altos estructurales caracterizados por su homogeneidad geomorfológica, el cual, dado que requiere un nivel bajo de información, facilita la observación y el conocimiento de la capacidad de almacenamiento de estas unidades (ENA, 2010).

Con base en lo informado en el *Diagnóstico de las aguas en las Américas* (2012), por la Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS) y el Foro Consultivo Científico y Tecnológico (FCCyT), se tiene que la demanda hídrica regional latinoamericana es cubierta con la oferta hídrica del 26 % del agua del planeta de la que participa esta región para un 6 % de la población. Ese porcentaje de concentración de disponibilidad de agua no es igual en todas las regiones del mundo, así como la distribución del recurso hídrico en el mundo tampoco. Esta realidad, sumada al desarrollo y el uso aleatorio e insostenible del recurso (Jiménez y Galizia, 2012), ha generado grandes desafíos con respecto a la disponibilidad de agua en términos de cantidad y calidad para satisfacer las necesidades básicas de las poblaciones alrededor del mundo.

El escenario descrito ha provocado, en consecuencia, que cada continente plantee estrategias que permitan preservar el agua para los diferentes desarrollos económicos y sociales de la región y en cada país, bajo el contexto de las problemáticas que enfrenta el planeta con la variación climática (Schewe et al., 2014).

A ello se suman las preocupaciones que generan los problemas derivados del aumento de las poblaciones y los impactos provocados en otros tipos de agua por el desarrollo de algunas actividades económicas, pues ello ha hecho que el agua subterránea para las sociedades del siglo XX hasta la centuria actual sea un insumo fundamental para casi la totalidad de las actividades económicas (Zektser et al., 2004; Burchi et al., 2005; Puri et al., 2009; Villar, 2012; Wada et al., 2013; Fox, 2014 como se citó en Hatch, 2017). Esta alta demanda del recurso hídrico subterráneo en la actualidad ha traído como consecuencia una mayor explotación de

los acuíferos. Esa es la razón por la que estos escenarios generan gran preocupación hoy día, debido a que al presentarse una mayor tasa de extracción en comparación con la tasa de recarga del reservorio subterráneo se pone en riesgo la disponibilidad de agua a nivel mundial.

Frente a este escenario desalentador la comunidad académica ya está estudiando y experimentando algunos cambios en los métodos de extracción del agua subterránea que permitan mejorar la eficiencia de estos sistemas (Shahdany et al., 2018) y, a la vez, procurar aumentar el rendimiento sostenible de los acuíferos para garantizar la disponibilidad de agua. Uno de los métodos propuestos para la gestión hídrica es la recarga artificial de los acuíferos (MAR por sus siglas en inglés: *managed aquifer recharge*, término que traducido al español significa *recarga gestionada de acuíferos*). (Hashemy et al., 2018)

La recarga artificial o gestionada de los acuíferos de forma adecuada favorece el aumento en la disponibilidad de agua debido a que permite reponer el agua subterránea extraída a una velocidad que supera la tasa de recarga en condiciones naturales, lo cual hace que sea posible mantener estable y con pocas variaciones los niveles de agua almacenada en los acuíferos (Nijhawan et al., 2013). De esa forma la recarga artificial contribuye, además, a prevenir los hundimientos de tierra y a evitar la intrusión de agua salada hacia el subsuelo continental y, por consiguiente, a las reservas de agua dulce (Rong et al., 2017).

De la propuesta de este método de gestión hídrica surge el interés investigativo por el cual se desarrolla esta monografía. En ella se ha realizado una revisión bibliográfica a partir de la cual se hace un análisis de las diferentes fuentes de estudio utilizadas para la recarga artificial de los acuíferos, con el fin de ampliar el conocimiento que se tiene de las principales técnicas y tecnologías empleadas para la gestión del recurso hídrico, así como los tipos de agua en los que se aplica el método de MAR y las afectaciones que puede provocar en la calidad del agua subterránea.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Analizar la importancia de la recarga artificial de acuíferos y su impacto generado en la calidad del agua subterránea a través del estudio del estado del arte sobre las técnicas más usadas y las principales consecuencias atribuidas a esta práctica.

### 2.2 Objetivos Específicos

Para dar respuesta al objetivo general de la investigación se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar la importancia de la recarga artificial de acuíferos y sus impactos, mediante el análisis de los tipos de técnicas más usadas para tal fin.
2. Recopilar información secundaria sobre los impactos producidos en los sistemas de acuíferos por la recarga artificial.
3. Identificar el estado actual de la normatividad colombiana para la gestión y protección de los acuíferos con relación a la recarga artificial y a los impactos de esta en la calidad del agua.

### 3 Metodología

Una vez se definieron los objetivos de la investigación, los cuales están orientados al estudio del método de gestión hídrica de la recarga artificial de acuíferos a nivel mundial, se determinó la propuesta metodológica del estudio para plantear la forma como se desarrollarían las ideas y se conducirían a la retroalimentación del presente trabajo investigativo. Dicha propuesta metodológica se desarrolló en tres pasos importantes, los cuales se describen en lo sucesivo de este apartado.

La primera etapa la constituyó la búsqueda de información relativa a la temática objeto de estudio de la recarga artificial de los acuíferos, y de referentes bibliográficos precedentes que hubieran abordado el tema en estudios publicados. Con la finalidad de garantizar la obtención de un material informativo amplio y confiable se acudió a la consulta de sitios web, bases de datos académicas, revistas de investigación científica y libros relevantes que podían contribuir al cumplimiento de los objetivos planteados y con la estructuración del tema principal del proyecto. Entre estos bancos de información consultados se hallan: ScienceDirect, Scopus, Web of Science, SpringerLink, PubMed, Education Resources Information Center (ERIC), Directorio de Revistas de Acceso Abierto (DOAJ) y Google Académico.

Al revisar los bancos de información, en esta primera etapa de la metodología, se realizó una revisión y filtración cuidadosa de esta, con la intención de basar la investigación solo en los referentes más reconocidos y mejor valorados académicamente, utilizando como criterios de selección el uso de estos referentes por parte de los autores que mayoritariamente han trabajado con la recarga de acuíferos y el uso de las palabras clave como “recarga de acuíferos administrados”, “tipo de recargas”, “acuíferos más susceptibles a la contaminación”, entre otros.

Luego, en una segunda instancia, se organizó la información recopilada en la etapa anterior por su relevancia y por los aportes que pudiesen generar al estudio, distinguiendo los

documentos de las fuentes principales de las publicaciones de las fuentes secundarias y separándolos, posteriormente, en carpetas de acuerdo con el objetivo general a desarrollar en cada uno de ellos para tener más claridad sobre su contenido y así seleccionar los trabajos que finalmente se tomarían como referentes en la bibliografía.

Para finalizar esta etapa se elaboró una tabla de datos donde se agrupó la información de forma organizada y se hizo una breve presentación de estos mismos. Ello permitió identificar los pilares esenciales del tema que constituirían la documentación que fundamentó la propuesta investigativa de este estudio.

Habiendo seleccionado las publicaciones que serían incluidas entre los referentes bibliográficos se pasó a la tercera etapa de la metodología de análisis de la información. Esta fase se inició con la etapa previa donde se definieron los objetivos de la investigación, con el propósito de reafirmar las ideas orientadoras allí planteadas para darle una formulación estructural al proyecto y un desarrollo amplio al tema que se proponía. El desarrollo del trabajo consistió en analizar la información seleccionada y consultada con el objetivo de identificar con base en el avance del conocimiento en cuanto a la estructura de un acuífero, los métodos de recarga y las condiciones generales de como las recargas artificiales de los acuíferos se llevada a cabo, la forma como se impacta la calidad del agua de en el mismo.

## 4 Marco Teórico

### 4.1 Ciclo Hidrológico, Distribución y Disponibilidad del Agua

En la actualidad, debido a la escasez y a la contaminación del recurso hídrico, el ser humano se ha visto obligado a buscar soluciones para aumentar la disponibilidad de agua dulce y poder suplir las necesidades de las poblaciones en todo el mundo. La búsqueda de estas soluciones cuya finalidad última es incrementar el acceso al agua y explotar el recurso natural de una manera sostenible en el tiempo, para se requiere entender el funcionamiento del sistema hídrico y las interacciones que se dan entre el océano y el continente, es decir, del estudio del ciclo hidrológico, el cual representa el proceso continuo de circulación y transformación del agua en el planeta (ENA, 2010).

De acuerdo con la Unesco (2022), del 2.5 % de los cuerpos de agua dulce que se encuentran disponibles en el planeta, el 99 % es agua subterránea, la cual se usa indiscriminadamente y de manera poco sostenible en la mayoría de las actividades económicas desarrolladas por la sociedad actual. Este párrafo no tiene fuente bibliográfica citar.

Los usos que se le han dado al agua subterránea en el desarrollo de actividades económicas han incrementado, consecuentemente, la búsqueda de técnicas que permitan la extracción, el acceso y la utilización de estos cuerpos de agua que se encuentran bajo la superficie terrestre, al tiempo que se garantiza su disponibilidad. Por ello, hoy se hace necesario comprender la dinámica del ciclo hidrológico y los diferentes estados de la materia y etapas que presenta el agua para pasar de la tierra a la atmósfera y recircular continuamente, permitiendo así el aumento de manera natural las reservas de este importante recurso en el planeta.

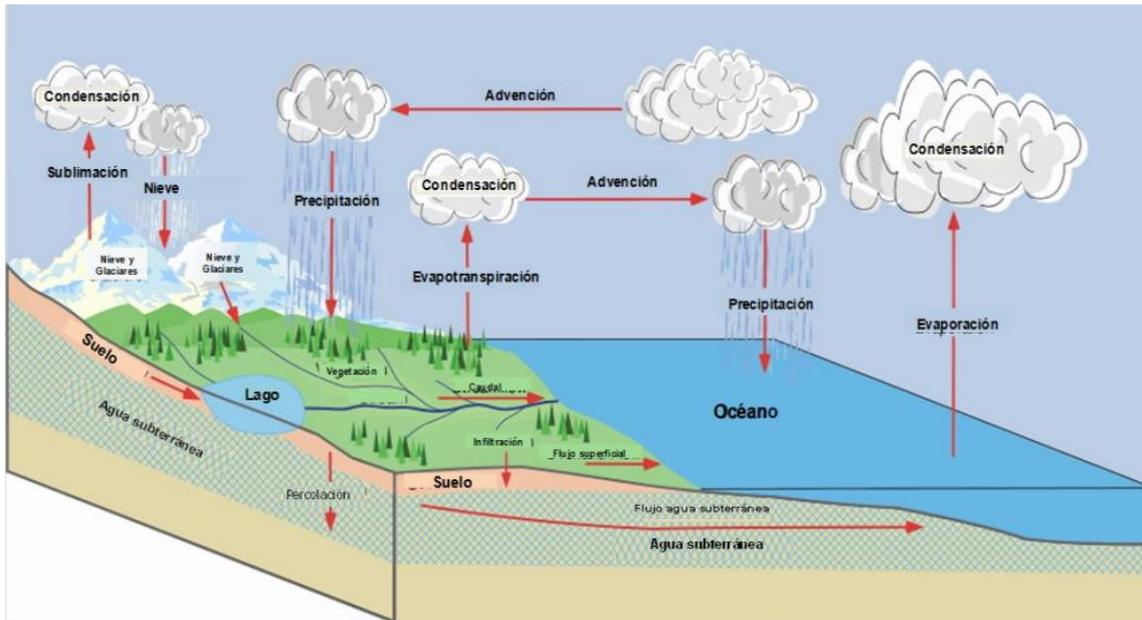
En atención a esta necesidad, a continuación, se listan y describen las cuatro etapas en las que se desarrolla el ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración [evaporación y

transpiración], escorrentía e infiltración) (Ordoñez, J. 2011), las cuales se pueden observar a su vez en la Figura 1:

1. Precipitación: Es generada por las nubes cuando alcanzan la saturación, las cuales, por medio de la condensación, se convierten en gotas de agua y caen en la superficie terrestre con ayuda de la fuerza de gravedad. En algunas ocasiones, dependiendo de la temperatura de la atmósfera, la precipitación se puede presentar en forma de nieve o granizo. Este proceso es importante debido a que es el responsable del abastecimiento de agua dulce en el planeta, y se ve afectado principalmente por la problemática que representan el cambio climático y la contaminación de la atmósfera (Ordoñez, J. 2011).
2. Evapotranspiración: Esta etapa consta de dos procesos que son la evaporación y la transpiración.
  - i. Evaporación: Es el proceso responsable de la creación de las nubes, las cuales son necesarias para que se produzca la precipitación. En él se da la fase de transición del agua que se encuentra en estado líquido en la superficie terrestre a un estado gaseoso formado por la condensación del vapor de agua, la cual crea finalmente las nubes. Esta parte del ciclo se da con ayuda de la temperatura en fuentes de agua superficial, por lo tanto, se puede ver afectada por la contaminación de estos cuerpos hídricos que se encuentran en la superficie terrestre (Ordoñez, J. 2011).
  - ii. Transpiración: En esta etapa ocurre el mismo proceso de evaporación del agua, pero, a diferencia del proceso anterior que se da en los cuerpos hídricos que están en la superficie, esta se da la superficie de las hojas de los árboles que tienen un exceso de agua que no ha sido absorbida en el proceso de alimentación de las plantas después de la precipitación. Por lo tanto, la transpiración se ve afectada por los cambios que se dan en el uso del suelo (Ordoñez, J. 2011).

3. Escorrentía: Es un desplazamiento de agua que se da a través de las superficies, pudiendo ser de manera superficial, esto es, cuando no hay infiltración, o de forma subsuperficial que consiste en el desplazamiento de agua que se ha infiltrado. De modo que esta etapa del ciclo ve afectada por factores como la inclinación del terreno y la cobertura vegetativa de este (Ordoñez, J. 2011).
4. Infiltración: Se da cuando el agua que cae penetra el suelo a través de sus poros y se convierte en agua subterránea. Este es el proceso más importante del ciclo porque permite la recarga natural o contribuye a la recarga artificial de los acuíferos, y se ve afectado por factores como la inclinación y la estructura del suelo y la cobertura vegetativa de este (Ordoñez, J. 2011).

**Figura 1** *Etapas del ciclo hidrológico*



Nota. Adaptado de *Ciclo hidrológico*, por Ordoñez, 2011, [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrológico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrológico.pdf)

Entendiendo el ciclo hidrológico y cada una de las etapas en las que se desarrolla se comprende que a menor escorrentía y mayor infiltración y precipitación se verá más favorecida la recarga de los acuíferos. Por ello, los estudios y la misma gestión del recurso hídrico que se vienen llevando a cabo en la actualidad han puesto el foco en el trabajo a realizar en estas fases de manera que se favorezca el desarrollo de mejores técnicas de recarga en forma artificial, propiciando así la disponibilidad del agua y aportando una posible solución a las demandas de este importante recurso en la sociedad.

## 4.2 Sistemas de Acuíferos

La acción antropogénica que contribuyen al calentamiento global y la falta de conocimiento humano sobre las dinámicas que ocurren en los sistemas de flujo del agua subterránea, así como de la relación que esta problemática guarda con el ciclo hidrológico,

pasan por alto la existencia de una serie de factores estrechamente vinculantes; incluso, debido a este desconocimiento, los acuíferos han llegado a ser considerados como sistemas estáticos, siendo estos, por el contrario, sistemas de subsuelo constantemente dinámicos por el proceso que se explica a continuación.

Los acuíferos son formaciones geológicas compuestas por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas que interactúan hidráulicamente con otras unidades que se encuentran en el subsuelo como, por ejemplo, las zonas no saturadas y los acuitardos. Estos sistemas se hallan en el subsuelo interconectados por medio de algunas unidades semipermeables y tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de agua subterránea, proveniente principalmente de precipitaciones que, por escorrentías superficiales y por acción de la gravedad, se infiltran en el suelo llenando las cavidades de las diferentes capas de roca de las cuales está formado el acuífero (arena, grava, arcilla, entre otros), para finalmente fluir hacia una misma salida y ser las abastecedoras vitales de otros cuerpos de agua dulce y salada como los arroyos, los manantiales, los lagos y los océanos (Mohan y Kuipally, 2021).

La comprensión e identificación integral de estos sistemas de acuíferos y de factores como su geomorfología e hidrogeología brinda información importante para saber cómo es la composición mineral de la que está hecha la roca que forma parte del sistema; además, aporta datos que permiten conocer las demás capas de rocas (como arenas, gravas y arcillas) de las cuales también está compuesto el sistema. De igual manera, conocer las estructuras como fallas, fisuras y fracturas existentes en los sistemas formados por placas tectónicas y por la deformación de los depósitos permite caracterizar estos sistemas y así facilitar la comprensión de los procesos de interacción agua-roca que ocurren en ellos, la forma como se dan las direcciones de flujo y el modo como se lleva a cabo la recarga natural de un acuífero (Rezaei et al., 2019).

En la recarga natural de aguas subterráneas las zonas no saturadas del acuífero se encargan de transportar el exceso de precipitación desde la superficie hasta las zonas saturadas del recurso hídrico. Las zonas donde el nivel freático es poco profundo facilitan el flujo ascendente necesario para que las aguas subterráneas se descarguen directamente a la atmósfera por evaporación o por evapotranspiración, pues estas zonas se extienden desde la superficie hasta el nivel freático. Es importante considerar que los acuíferos también contienen poros o grietas que se ubican en estas áreas más superficiales del sistema, por lo que no están completamente llenos de agua debido al aire que contienen y a la succión del sustrato, característica que hace que la presión del agua en la zona no saturada sea menor que la presión atmosférica, lo cual termina por afectar el comportamiento hidráulico del acuífero que es un factor importante en el movimiento del agua subterránea, tal como se explica.

Así como hay elementos que afectan el comportamiento hidráulico del acuífero, hay también ciertas formaciones subterráneas que influyen en la conductividad hidráulica de estos sistemas como son los acuitardos, los cuales actúan como una capa de confinamiento o semiconfinamiento dentro del sistema. Estas formaciones contienen grandes cantidades de agua subterránea que no pueden transportar hacia los pozos, dado que tienen una baja permeabilidad en comparación con la presentada por los acuíferos, sin embargo, pueden transferir grandes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes. Las unidades litológicas subsuperficiales restantes son hidráulicamente inactivas, por lo tanto, estas, a diferencia de los acuitardos, no contribuyen con la conductividad hidráulica del sistema, sino que se encargan de crear barreras para el flujo de agua subterránea debido a su muy baja permeabilidad y/o a la falta de espacios interconectados entre ellas (Salako y Adepelumi, 2018).

Visto lo anterior se entiende que cada acuífero tiene una mayor o menor capacidad de retener y almacenar agua dependiendo de su tamaño, la ubicación que tenga con respecto a la superficie, su textura, porosidad y permeabilidad, entre otras características que los clasifican

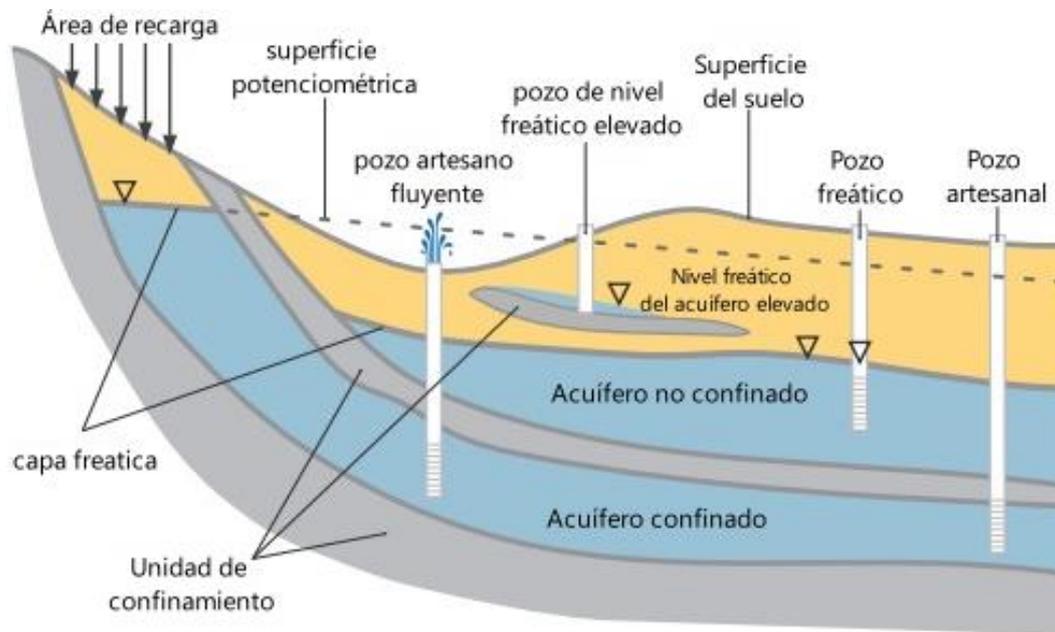
como *acuíferos confinados* o *acuíferos no confinados* (ver Figura 2). Las principales diferencias entre estos dos tipos de acuíferos provienen de su composición. Los *acuíferos confinados* pueden estar compuestos por una capa de roca arcillosa u otro material geológico impermeable que los encierra, impidiendo la formación de un nivel freático libre debido a la presión del agua que se encuentra debajo del acuífero confinado superior en todas partes y que es superior a la presión atmosférica. Los *acuíferos no confinados* se encuentran cerca de la superficie terrestre donde no los cubren estas capas de roca y tienen un nivel freático libre que se mueve verticalmente con los cambios que se van dando en el almacenamiento de agua (Salako y Adepelumi, 2018).

También se pueden encontrar sistemas de acuíferos compuestos por materiales como arenisca, caliza, grava y basalto, los cuales son mucho más productivos que los compuestos por los materiales geológicos mencionados debido a que poseen una alta porosidad y una alta permeabilidad, permitiendo estas características que el sistema tenga la capacidad de almacenar grandes volúmenes de agua. A diferencia de estos, los acuíferos compuestos de lecho rocoso erosionado poseen una menor capacidad de almacenar agua por su alta porosidad y su baja permeabilidad.

Al menos un 9.2 % de la población mundial depende de los acuíferos que están compuestos por rocas carbonatadas, es decir, de piedra caliza, pues se estima que aproximadamente el 15.2 % de la superficie de la tierra está compuesta por este material (Vadillo y Ojeda, 2022). Además, este material geológico del que están compuestos estos sistemas hace que sean altamente productivos y, en consecuencia, igualmente importantes para el consumo humano; no obstante, ello también hace que sean los sistemas más susceptibles a las fuentes de contaminación. En la figura 2 se presenta una representación esquemática de los tipos de acuíferos y sus principales características.

**Figura 2**

*Representación de los acuíferos confinado y no confinado*



Nota. Adaptado de *Aquifer, classification and characterization*, por A. Salako y A. Adepelumi, 2018, Intech

Una de las grandes preocupaciones en términos del recurso hídrico que enfrenta la población mundial en la actualidad, es la gran presión antropogénica ejercida sobre los sistemas de acuíferos, marcada por escenarios de sobreexplotación del recurso sumado al incremento de actividades potencialmente contaminantes en la superficie del suelo, escenarios que presentan un patrón creciente con el tiempo debido a los fuertes cambios demográficos que se vienen presentando en el último siglo (Vadillo y Ojeda, 2022).

Es importante detallar estas características porque su comprensión permite entender que los acuíferos no confinados son los que tienen la mayor capacidad de estar presente en el ciclo hidrológico por estar más cerca de la superficie, sin embargo, son mucho más vulnerables a las fuentes de contaminación antropogénica que llega por infiltración. Lo que hace que este tema sea de especial interés, dado que los sistemas de acuíferos no confinados son los más explotados por la facilidad y el bajo costo que implica la técnica de extracción, los cuales, una vez

contaminados, difícilmente pueden ser recuperados debido a que el proceso contaminante en ellos es casi irreversible, lo que reduce la idoneidad del este recurso. De otra parte, al reparar en las características de los diferentes tipos de sistemas se comprende que, contrario a estos, los acuíferos confinados no son tan susceptibles a la contaminación debido a la existencia de suelos compuestos por arcillas en el sistema que disminuyen la velocidad de infiltración, los cuales, al interactuar con los contaminantes de carga iónica, logran atenuar eficazmente la migración de estos elementos hacia el sistema (Vadillo y Ojeda, 2022).

Con respecto a la condición de recarga en cada acuífero cabe anotar que esta es distinta en cada uno de ellos y un factor de mucha importancia. Unos acuíferos como, por ejemplo, los compuestos de roca carbonatada tienen la capacidad de renovar constantemente el agua subterránea que se almacena en ellos dadas las características del sistema como su composición y su ubicación geográfica. Otros acuíferos, como los que se encuentran ubicados en zonas donde las precipitaciones son muy bajas, no alcanzan a recargar de manera significativa y natural el sistema, lo cual conlleva con el tiempo al agotamiento de este debido a la extracción exhaustiva.

Lo anterior da cuenta de la importancia de la gestión artificial de los acuíferos, dado que, según lo reportado por la Unesco (2022), regiones enteras como América del Norte y Asia del Sur dependen del agua subterránea para el riego en un 59 % y 57 % respectivamente, y en regiones como las de África los acuíferos no confinados están subexplotados. En algunos países del continente asiático como Pakistán, India, Bután, China, Vietnam, Sri Lanka, Nepal y Bangladesh ya se empiezan a presentar situaciones similares debido al creciente desarrollo industrial y poblacional, pues los países citados, entre otros, dependen de acuíferos no confinados para el consumo humano, la agricultura y usos domésticos, y presentan dificultades para aprovechar este recurso por el nivel de contaminación del agua subterránea con altos niveles de arsénico y fluoruro (Sath et al., 2021).

### 4.3 Características de las Zonas de Recarga y Descarga

Las zonas potenciales de aguas subterráneas se ven afectadas por diferentes parámetros hidrogeológicos y geomorfológicos que crean relaciones entre los diversos componentes del entorno, permitiendo que por medio de la infiltración y la escorrentía estos se provean de agua. Asimismo, sucede con la densidad de drenaje con la que los ríos y valles tienen relación directa, la litología, las llanuras aluviales y de roca firme erosionada, las montañas residuales y de denudación, las llanuras de inundación, las mesetas, entre otros (Kanagaraj et al., 2019).

Dicho esto, antes de iniciar la caracterización de las zonas de llenado de las reservas subterráneas, es preciso definir lo que se entiende por *recarga de agua subterránea*, debido a que es con esta acción con la cual comienza a almacenarse el recurso hídrico en el subsuelo. Pues bien, esta noción hace referencia al proceso de desplazamiento del agua superficial que se dirige hacia el nivel freático del sistema hasta alcanzar el acuífero subterráneo (Abdelkareem et al., 2022).

A partir de la definición del proceso de *recarga de agua subterránea* se entiende por qué la identificación de las áreas o zonas potenciales de recarga de los acuíferos es una tarea compleja, pues es claro que no es posible evidenciar a simple vista el agua que se filtra por todo el sistema hasta el acuífero subterráneo (Peñuela y Carrillo, 2013). No obstante, haciendo un análisis de la geología, la litología, la topografía, la cobertura y los usos del suelo, entre otras características relativas a la composición de este, es posible llegar a conocer donde estarían ubicadas estas zonas de recarga en los acuíferos. Para ello se requiere contar con la ayuda de herramientas satelitales como el uso de la teledetección y sensores remotos que combinan toda esta información base para hacerle seguimiento al recurso hídrico hasta que finalmente llega al acuífero subterráneo donde queda almacenado (Abdelkareem et al., 2022).

La identificación de las zonas de descarga de agua subterránea es mucho más simple que la de las zonas de recarga, por los cambios en la altura piezométrica y la discontinuidad

que se presentan en las estructuras geológicas, características que permiten que la dirección del flujo de agua salga a la superficie a una elevación topográfica más baja que donde se origina la recarga, figurando el fin de su recorrido subterráneo. Este recorrido del recurso hídrico puede verse como un manantial, un lago y/o un nivel de agua subterránea somero (Peñuela y Carrillo, 2013).

Aquí también es importante mencionar que diversos factores como la variabilidad climática y el cambio climático influyen en la recarga de las aguas subterráneas, no obstante, la disminución en los niveles de aguas subterráneas y el agotamiento en el almacenamiento sucede porque la descarga es mucho mayor que la recarga, lo cual es resultado de la extracción intensiva. Lo anterior demuestra cómo la práctica extractiva poco sostenible ocasiona cambios en el balance hídrico, entre otros muchos impactos que se pueden apreciar en distintos campos, no solo en los suelos, pudiendo darse también un impacto negativo que aumente los costos, la complejidad y la energía que se requiere para la extracción del recurso.

Esta práctica ha ido cada vez más en detrimento del recurso hídrico con el impacto que generan las acciones humanas sobre este, siendo una de ellas la expansión del suministro de energía a las comunidades y zonas más aisladas. Pues, desde que la electrificación rural comenzó a expandirse a áreas en las que anteriormente no se tenía acceso a la energía, esta se convirtió en un importante impulsor del aumento de la extracción indiscriminada del recurso acuífero, potencializando así el riesgo de que se fomente y fortalezca la práctica y el uso insostenible de estos sistemas por falta de una gestión y regulación adecuadas (Unesco, 2022).

Frente a estas acciones, las actividades antrópicas como la recarga artificial permiten aumentar la descarga y la reserva de agua subterránea aprovechando naturalmente la capacidad de almacenamiento del subsuelo de una manera sostenible, para luego ser usado en diferentes actividades socioeconómicas. Dicha técnica favorece enormemente a los acuíferos ubicados en

las zonas áridas y semiáridas de los territorios, y contribuye a que a largo plazo la tasa global de agotamiento de este recurso disminuya al volverse su uso sostenible (Unesco, 2022).

#### **4.4 Recarga Artificial de Acuíferos**

De acuerdo con el informe presentado por la Unesco (2022) es evidente que las reservas mundiales totales de agua subterránea se están agotando a un ritmo considerable. De hecho, la estadística a inicios del siglo XXI estimaba que la tasa global de agotamiento de los sistemas de acuíferos estaba entre los 100 km<sup>3</sup>/año y los 200 km<sup>3</sup>/año para dicha vigencia, lo que representaba aproximadamente entre un 15 % y 25 % de las extracciones totales de agua subterránea a nivel mundial. Esta cifra ha aumentado considerablemente en los últimos años debido a que la dependencia del agua subterránea de innumerables países se ha ido intensificando, llegándose a estimar hoy en día que alrededor del 50 % de la población urbana mundial actual se está abasteciendo de fuentes de agua subterránea.

La explotación intensiva del recurso acuífero se acrecienta al poner el foco en los asentamientos ilegales, la mayoría constituidos por población de escasos recursos y en muchos de los casos por población en situación de extrema pobreza. Es así puesto que, al ubicarse estos asentamientos en zonas periurbanas, no se encuentran incluidos dentro de los planes de ordenamiento de cada región, razón por la cual, el Estado no les proporciona infraestructura de servicios públicos como el agua, trayendo esta situación como consecuencia el aumento de la explotación de este recurso.

Una de las acciones a emprender, con el fin de solventar las necesidades mundiales de agua y agricultura para la vigencia 2050 y lograr el aumento aproximado del 50 % de la oferta para cubrir la demanda de alimentos (Unesco, 2022), es reconocer la recarga artificial como uno de los principales procesos que se puede adelantar en respuesta a esta acelerada explotación de las aguas subterráneas. De esa manera se puede lograr el suministro de dicho reservorio

mediante el cambio artificial de las condiciones naturales en que se almacena el recurso hídrico, pues, básicamente, la recarga artificial consiste en conducir el flujo de agua que se infiltra en el sistema a través de las diferentes formaciones del subsuelo hasta llegar al acuífero (Choudhary y Chahar, 2007).

En la actualidad, los almacenamientos de agua se realizan mediante represas y pequeños reservorios que se encuentran en la superficie. Sin embargo, estos presentan algunas desventajas a pesar de su gran utilidad, estando entre ellas, por ejemplo, situaciones que causan afectaciones socioambientales como las citadas: la interferencia en el área que ocupan debido a que generalmente se debe disponer de grandes terrenos para su implementación, la desviación en la corriente y el cauce natural del río, la evaporación, la eutrofización y los sólidos suspendidos totales en el agua. De manera contraria, la gestión adecuada de la recarga artificial del recurso no solo posibilitaría disminuir la explotación indiscriminada de las aguas subterráneas, sino que también permitiría dar solución a múltiples problemas de carácter socioambiental como los derivados del almacenamiento de agua en represas y pequeños reservorios aquí mencionados.

A menudo, esta práctica es subestimada a pesar de su enorme importancia y no contempla los beneficios dirigidos a la mitigación del cambio climático y al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluidos en las metas de la Agenda 2030 en el año 2015 por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Sin embargo, en el contexto actual de la creciente escasez de agua no se puede pasar por alto el enorme potencial que tienen las aguas subterráneas y la necesidad de hacer un uso adecuado de este recurso hídrico. Esta práctica contribuye a solventar las demandas de agua de la población, disminuyendo las pérdidas de agua por evaporación en las zonas áridas, reduciendo los costos de la desalinización para el tratamiento de agua salobre y, más importante aún, controlando la extracción excesiva del recurso hídrico y restableciendo el equilibrio de las aguas subterráneas.

Por otra parte, las ciudades que cuentan con sistemas de drenaje y alcantarillado en buen estado tienen la capacidad de reutilizar las aguas pluviales y las aguas residuales tratadas en la recarga artificial, aumentando los suministros de agua potable y de riego (Dillon, 2005). No obstante, se advierte que, si esta práctica no se realiza con cuidado y con pleno conocimiento de las características de la hidrogeología del área a recargar y de la fuente hídrica a usar puede llegar a ocasionar impactos negativos, como lo es la contaminación del agua subterránea nativa con subproductos provenientes de las reacciones químicas generadas (Izbicki, 2010).

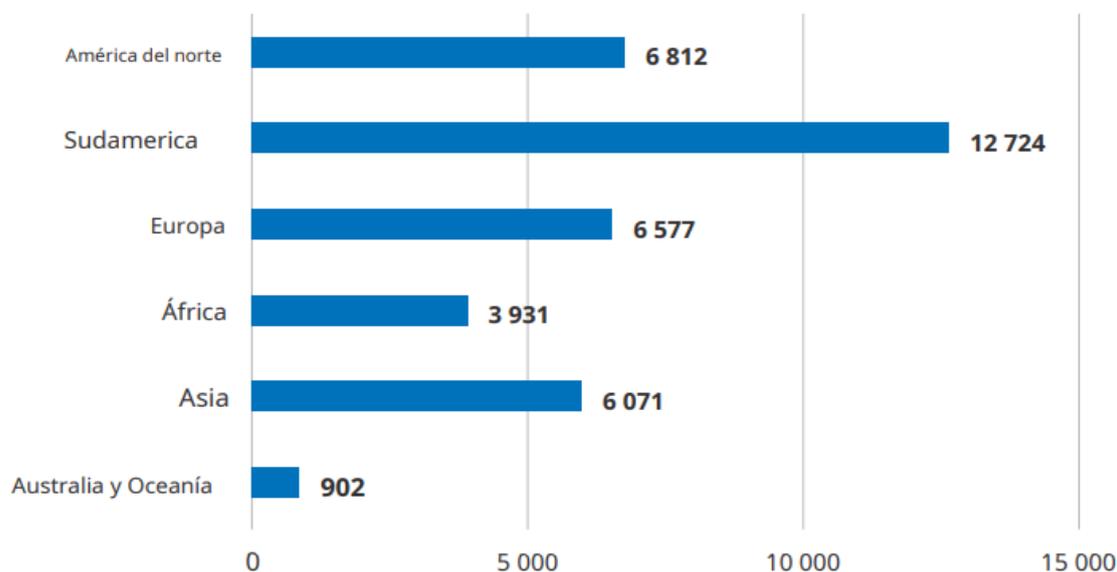
#### ***4.4.1 Antecedentes de la Recarga Artificial de Acuíferos***

El volumen de agua dulce se distribuye irregularmente sobre los continentes e irá cambiando con el tiempo por factores como la variación climática estacional, el cambio climático y la explotación intensiva del recurso hídrico, provocando impactos severos en el medioambiente. Entre estos impactos que desde ya se advierten la Unesco (2022) ha señalado que a futuro la degradación del ambiente y la explotación intensiva producirá: la reducción de los lagos, la desaparición de numerosos manantiales, caudales decrecientes en los ríos, y la disminución de los niveles de agua subterránea en los sistemas de acuíferos que han sido intensamente explotados. Escenario frente al cual se plantea la recarga artificial como solución por ser una práctica conocida que permite aumentar el recurso hídrico en el subsuelo, al tiempo que genera beneficios ambientales.

La llamada *recarga artificial de aguas subterráneas*, igualmente conocida como gestión de la recarga de acuíferos (MAR por sus siglas en inglés: *managed aquifer recharge*), recarga mejorada, banco de agua y almacenamiento subterráneo sostenible (Dillon, 2005), ha sido implementada desde mediados del siglo XX (Todd, 1959). Y desde entonces se reconocen los beneficios potenciales de esta práctica.

Incluso, en la literatura se ha encontrado un caso donde se implementó la recarga artificial de acuíferos, el cual data de finales del siglo XIX. Concretamente se habla del año 1890 cuando la East London Water Company de Inglaterra usó pozos en el mismo país para realizar experimentos de recarga artificial, aunque estos primeros experimentos aparentemente no quedaron registrados por escrito, dado que los informes no se han encontrado (O'Shea, 1994; O'Shea et al., 1995). Un siglo después, en diversos países y ciudades como China (1960), Ámsterdam (1975) y Estados Unidos (1980) se desarrollaron diferentes proyectos para el almacenamiento y la recuperación de acuíferos de los que sí se tiene registro, los cuales, a su vez, dieron solución a algunos de los problemas ambientales que se venían presentando como, por ejemplo, la intrusión de agua salada a los acuíferos, entre otros (Rong et al., 2017).

A nivel mundial, los métodos usados para la recarga artificial de aguas subterráneas son diferentes para cada país, dado que, sea que estas se realicen de forma natural o artificial, los sistemas están condicionados a almacenar agua principalmente de la fuente hídrica básica de toda recarga que son las precipitaciones (Pande y Moharir, 2015). De igual manera, el avance y uso de estas técnicas varían según sea la necesidad de cada región y/o país, pues la escasez hídrica y el estrés hídrico no es el mismo para todos los continentes ni para todas las naciones, al igual que la tasa de renovación de estos sistemas mediante la recarga (ver Figura 3).

**Figura 3***Renovación anual de agua dulce (km<sup>3</sup>/año)*

Nota. Adaptado de *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo*, por Unesco, 2022, [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa)

Con base en las estimaciones hechas recientemente se cree que la tendencia creciente que mostraron las extracciones de agua dulce durante el siglo pasado se mantendrá en esta centuria, pues los aumentos han sido y continúan siendo sustanciales en la mayor parte del mundo.

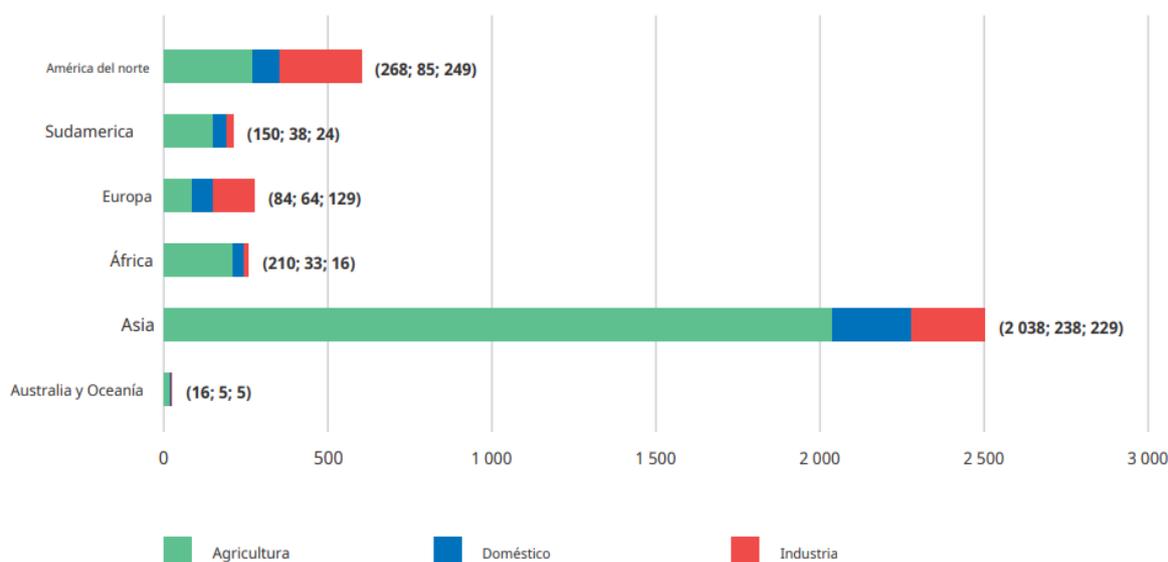
Los registros estadísticos indican que las extracciones de agua dulce pudieron haber sido de 600 km<sup>3</sup>/año aproximadamente en el año 1900, y que la práctica aumentó a un total de 3880 km<sup>3</sup>/año a la vigencia 2017. Las tasas de crecimiento, que aproximadamente aumentaron en un 3 % por año, fueron particularmente altas durante el periodo de 1950-1980 debido al incremento que se reflejó en las tasas de crecimiento demográfico y al rápido desarrollo de la práctica extractiva de aguas subterráneas destinadas especialmente para riego.

De acuerdo con el informe presentado por la Unesco (2022) la distribución por continente en cifras porcentuales de la cantidad de extracciones de agua dulce que se realizaron

al año 2017 a nivel mundial fue la siguiente: Asia registró la mayor cantidad de extracciones de agua dulce a nivel mundial con un 64.5 %, seguido en orden ascendente por la región de América del Norte con 15.5 %, Europa con 7.1 %, África con 6.7 % y la región de América del Sur con 5.4 %, siendo Australia y Oceanía (0.7 %) los que tuvieron la menor participación en el desarrollo de esta práctica a nivel mundial (ver Figura 4).

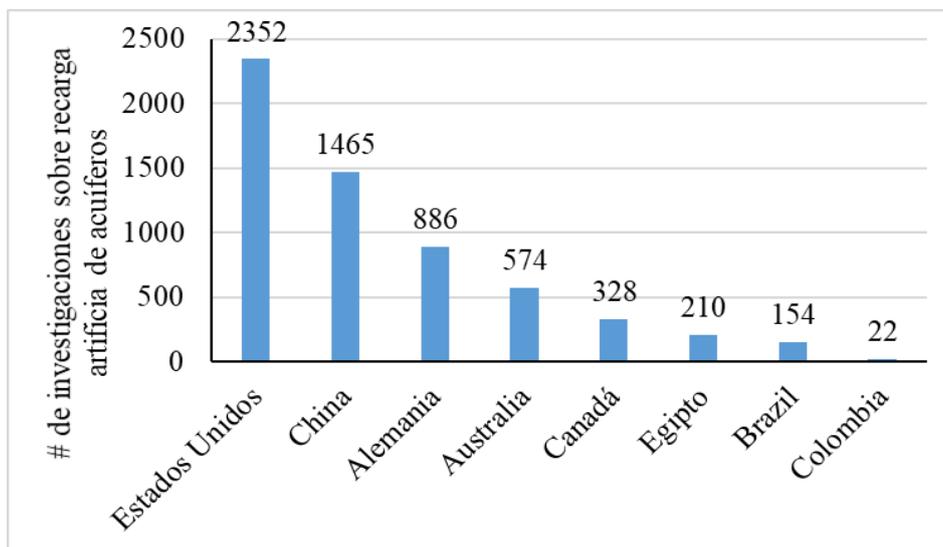
**Figura 4**

*Extracción de agua dulce en el año 2017 por continente y por uso (km<sup>3</sup>/año)*



Nota. Adaptado de *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo*, por Unesco, 2022, [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa)

Al hacer un comparativo entre los resultados registrados en los estudios que fueron consultados para la fundamentación de este trabajo y el documento oficial de la Unesco (2022) se corrobora que los datos informados por este órgano de gobierno concuerdan con los datos reflejados en la Figura 5. Allí se observa que los países de Estados Unidos y China, que son potencia en las regiones de América del Norte y Asia, los dos continentes con mayor puntaje en la estadística de extracciones de agua dulce a nivel mundial, son los que lideran la práctica extractiva a nivel país y cuentan con un mayor número de investigaciones sobre la recarga artificial de acuíferos.

**Figura 5***Investigaciones relacionadas con la recarga artificial de acuíferos por países*

Nota. Elaboración propia con base en los datos tomados de Scopus con el filtro “recarga artificial de acuíferos”

#### 4.5 Tipo de Recargas

La necesidad de acumular grandes volúmenes de agua dulce sigue estando vigente, la cual se refleja hoy en día en la práctica de reservar agua en tiempos de abundancia del recurso para usarla en tiempos de escasez. Con ese fin se han evaluado diversos métodos y estructuras para aumentar las zonas y realizar la recarga de agua, teniendo en cuenta el conocimiento característico del suelo, sus propiedades hidromorfológicas y parámetros como la variabilidad climática, el flujo hidrodinámico que gobierna los cauces naturales, la transmisibilidad, entre otros que son de especial importancia al momento de su aplicación (Bouwer, 2000).

Ahora bien, tal como se ha mencionado a lo largo del documento, hay varios factores que influyen en la elección de la técnica de recarga a usar como son: el costo de la implementación, operación y mantenimiento; el tipo de acuífero, pues, por ejemplo, si son

acuíferos compuestos por suelos de muy baja permeabilidad pueden requerir el uso de pozos; la calidad de la fuente de agua, pues, por ejemplo, si hay una alta turbidez, esta característica puede no ser adecuada para los métodos que usan pozos porque se obstruirían rápidamente; entre otros factores potenciales (Comisión Nacional de Riego [CNR], 2020) que se detallan por tipo de recarga en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Factores que influyen en la elección del tipo de recarga a usar de acuerdo con el IGRAC (2007)*

<b>Tipo de recarga</b>	<b>Objetivo principal</b>	<b>Tipo de acuífero objetivo al que se aplica</b>	<b>Fuente de agua que se aplica</b>	<b>Costos aproximados</b>
Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR, por sus siglas en inglés: <i>aquifer storage and recovery</i> )	Recuperar los niveles freáticos y actuar como barrera frente a la intrusión salina.	Acuíferos no confinados y confinados en el que su composición sea de rocas no consolidadas.	Aguas lluvias, ríos, lagos, subterránea, entre otros, en el que preferiblemente la calidad del agua sea buena para prevenir la obstrucción y contaminación del acuífero objetivo.	Medio a bajo
Transferencia y recuperación de almacenamiento de acuíferos (ASTR, por sus siglas en inglés: <i>aquifer storage, transfer and recovery</i> )	Recuperar los niveles freáticos y servir de tratamiento de las fuentes de agua.	Acuíferos no confinados y confinados en el que su composición sea de rocas no consolidadas.	Aguas residuales tratadas, de río, de lagos, agua subterránea, entre otros, en el que preferiblemente la calidad del agua sea buena para prevenir la obstrucción y contaminación del acuífero objetivo.	Alto a medio
Filtración de la orilla del río (RBF, por sus siglas en inglés: <i>river bank filtration</i> )	Mejorar la calidad del agua recargada.	Sedimentos no confinados.	Agua de río y de lago.	Alto a medio
Filtración de dunas	Mejorar la calidad del agua recargada.	Sedimentos no confinados.	Aguas residuales tratadas, agua lluvia y superficiales (río).	Medio

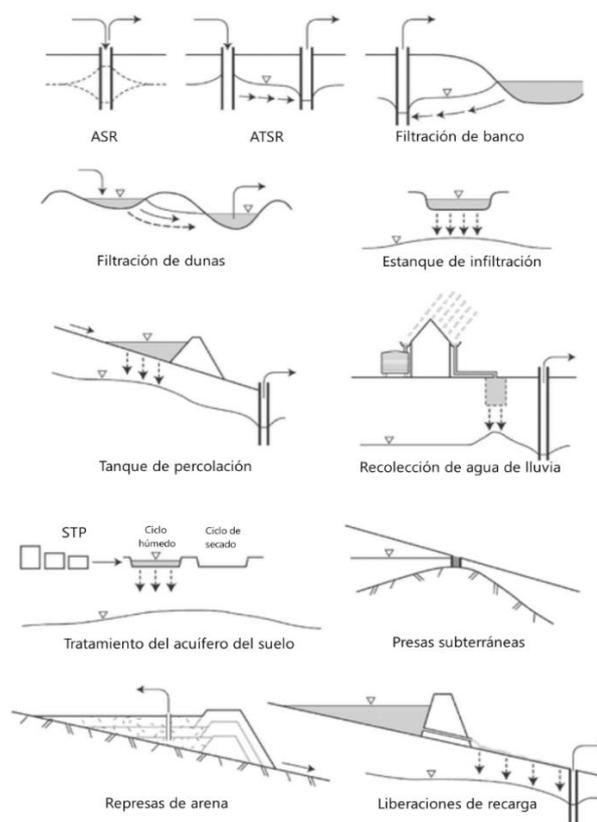
Tipo de recarga	Objetivo principal	Tipo de acuífero objetivo al que se aplica	Fuente de agua que se aplica	Costos aproximados
Estanque de infiltración	Usar el almacenamiento de agua para sus diferentes usos (agricultura, uso doméstico e industrial).	Acuíferos no confinados en el que su composición sea de rocas fracturadas y sedimentarias permeables.	Agua tratada, agua lluvia y aguas superficiales (lagos y ríos).	Medio a bajo
Tanque de percolación	Usar el almacenamiento de agua para sus diferentes usos (agricultura, uso doméstico e industrial).	Acuíferos no confinados en el que su composición sea de rocas fracturadas y sedimentarias permeables.	Aguas superficiales (río).	Medio
Recolección de agua lluvia	Almacenamiento de agua y mitigación de los impactos producto de la urbanización.	Acuíferos no confinados.	Agua lluvia.	Medio
Tratamiento del acuífero del suelo (SAT, por sus siglas en inglés: <i>soil aquifer treatment</i> )	Mejorar la calidad del agua recargada.	Acuíferos no confinados en el que su composición sea de rocas sedimentarias permeables.	Aguas residuales tratadas y de lluvia	Alto a medio
Represas de arena	Almacenamiento de agua.	Lechos arenosos.	Agua lluvia.	Bajo

Tipo de recarga	Objetivo principal	Tipo de acuífero objetivo al que se aplica	Fuente de agua que se aplica	Costos aproximados
Presas subterráneas	Almacenamiento de agua.	Acuíferos no confinados con capa impermeable que se encuentra a varios metros bajo la superficie.	Aguas superficiales (río).	Bajo
Liberación de recarga	Almacenamiento de agua.	Acuíferos no confinados.	Aguas superficiales (río).	Medio a bajo, dependiendo de la estructura de la presa.

Existen diversas estructuras que se pueden utilizar para realizar la recarga de los acuíferos, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes: tanques de percolación, diques de contención, diques para acumular en zonas de interés el agua de escorrentía que se produce en las zonas altas, infiltración en los sistemas de canales, pozos, pozo zanja, sistemas de estanques poco profundos que se inundan para la infiltración, túneles interconectados que recolectan las filtraciones de los suelos y dirigen esta agua hacia las zonas donde se realizará la recarga, entre otros (Dillon, 2005). Cada una de las estructuras y técnicas aquí mencionadas presentan ventajas y desventajas generales, las cuales están asociadas a su aplicación. A continuación, en la Figura 6 y la Tabla 2, se describen las técnicas más usadas a nivel mundial.

**Figura 6**

*Tipos de recarga a nivel mundial*



*Nota.* adaptado de Future management of aquifer recharge, por Dillon, 2005,

*Hydrogeology journal, 13(1)*

**Tabla 2**

*Descripción, ventajas y desventajas generales de los tipos de recarga más usados a nivel mundial*

Tipo de recarga	Descripción	Ventajas	Desventajas
Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR)	Esta técnica permite almacenar el agua inyectada en un acuífero por medio de un pozo, y puede recuperarse desde el mismo pozo o de pozos cercanos para su posterior uso, el cual puede ser doméstico, industrial, para riego, restauración de ecosistemas, agua potable, etc. (Maliva, 2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controla la intrusión de agua salada al actuar como una barrera hidráulica.</li> <li>• Mitiga el hundimiento de la tierra.</li> <li>• Aumenta el volumen de agua almacenada físicamente en un acuífero.</li> <li>• El agua almacenada desplaza el agua subterránea nativa de peor calidad.</li> <li>• Se puede extraer posteriormente agua subterránea adicional.</li> <li>• La recarga periódica de agua puede permitir el uso sostenible del acuífero al equilibrar las extracciones.</li> <li>• Permite el derecho de bombear agua subterránea extra, lo que de otro modo no estaría permitido.</li> <li>• Las zonas de almacenamiento de baja salinidad son muy favorables para las altas eficiencias de recuperación (Maliva, 2020).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La última cantidad de agua recargada en el acuífero puede llegar a tener un tiempo de residencia mucho más corto que la primera cantidad recargada.</li> <li>• El almacenamiento físico en los sistemas ASR solo se logra cuando un acuífero tiene una extensión geográfica limitada, y también podría lograrse en algunos acuíferos no confinados con una difusividad hidráulica baja (transmisividad / almacenamiento), lo que da como resultado tasas de disipación más bajas de los cambios de cabeza.</li> <li>• Cuando el agua dulce se almacena en acuíferos salobres o salinos el agua se vuelve irrecuperable debido a la mezcla con el agua subterránea nativa, y al movimiento impulsado por diferencias de densidad (flotabilidad) o gradientes hidráulicos locales.</li> <li>• Cuando el agua nativa está contaminada no es eficiente realizar la recarga (Maliva, 2020).</li> </ul>
Transferencia y recuperación de almacenamiento de acuíferos (ASTR)	El agua se inyecta por medio de un pozo y se almacena en el acuífero, para posteriormente recuperarse de un pozo diferente. Esta técnica, por lo general, se usa para para tratar el agua de forma natural a través de procesos de filtración, sorción y biodegradación (Maliva, 2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atenúa los contaminantes químicos y microbianos.</li> <li>• Proporciona tiempos de residencia constante y prolongados.</li> <li>• Aprovecha la filtración y la eliminación biogeoquímica de contaminantes proporcionada por los acuíferos, debido a los procesos físicos y biogeoquímicos que ocurren a lo largo de la trayectoria del flujo, desde el pozo de inyección hasta el pozo de recuperación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La eliminación de patógenos en el agua recuperada no se logra si los tiempos de residencia en el acuífero son bajos.</li> <li>• El acuífero debe estar muy bien detallado antes de realizar la recarga (Maliva, 2020).</li> </ul>

Tipo de recarga	Descripción	Ventajas	Desventajas
Filtración de la orilla del río (RBF)	Extracción de agua subterránea de pozos o cajones cerca o debajo de ríos o lagos para inducir la infiltración de cuerpos de agua superficiales, mejorando y haciendo más consistente la calidad del agua recuperada (Maliva, 2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los pozos de inyección del agua y los de extracción hacen parte de un sistema integrado (Maliva, 2020).</li> <li>• Disminuye el uso de productos químicos para el control de patógenos.</li> <li>• Reduce los costos de tratamiento de las aguas superficiales, dado que no se usaría otro tratamiento posterior a esta técnica de recarga.</li> <li>• Es eficiente en la mejora de la calidad del agua por los procesos de filtración, dilución, sorción y biodegradación (Thakur et al., 2021).</li> <li>• Es eficaz a la hora de contrarrestar la descarga de contaminantes accidentales (Stauder et al., 2012).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita un tratamiento posterior para eliminar los compuestos reducidos como el arsénico, el metano, el amonio, el hierro, el manganeso, entre otros.</li> <li>• Puede llegar a aumentar las sustancias húmicas (Stauder et al., 2012).</li> </ul>
Filtración de dunas	Infiltración de agua en las dunas de arena y extracción de agua de pozos o estanques de menor elevación, para mejorar la calidad del agua y equilibrar la oferta y la demanda (Maliva, 2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Áreas con alta permeabilidad.</li> <li>• Se pueden extraer cantidades de agua considerables.</li> <li>• Elimina eficientemente los contaminantes en el agua a recargar (Zuurbier et al., 2018).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere conocer muy bien el tiempo de viaje o el tiempo de residencia necesario para la eliminación de patógenos y mejorar la calidad de agua.</li> <li>• Tiene impactos visuales sobre los paisajes y la ecología en estas áreas.</li> <li>• Se necesita hacer un seguimiento exhaustivo del rendimiento de esta técnica (Zuurbier et al., 2018).</li> </ul>
Estanque de infiltración	Estanque o piscina, comúnmente construido fuera del cauce de un río, donde el agua superficial se desvía y permite que se infiltre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja obstrucción química y física en el lecho del estanque si el agua infiltrada tiene bajos contenidos de sólidos disueltos y suspendidos.</li> <li>• Bajo costo de inversión (IGRAC, 2007).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obstrucción en el lecho del estanque por capas de algas y/o bacterias.</li> <li>• Requiere grandes superficies que permitan la construcción, dependiendo de la cantidad de agua a recargar.</li> </ul>

Tipo de recarga	Descripción	Ventajas	Desventajas
	(generalmente a través de una zona no saturada) hacia el acuífero no confinado subyacente (CNR, 2020).		<ul style="list-style-type: none"> <li>• El suelo debe ser muy permeable.</li> <li>• La calidad de agua debe ser medianamente de buena calidad (Grau-Martínez et al., 2018).</li> </ul>
Tanque de percolación	Se conduce el agua y se almacena en depósitos contruidos en estanques temporales, donde el agua se retiene y se filtra a través del fondo para mejorar el almacenamiento en acuíferos no confinados y posteriormente ser extraída aguas abajo (CNR, 2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite que a lo largo de un mismo río se aplique esta técnica en serie para detener y recargar en diferentes puntos.</li> <li>• No ocupa tanto espacio como los estanques de infiltración (IGRAC, 2007).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La topografía adyacente debe permitir la construcción de los muros de las represas.</li> <li>• El curso del agua debe ser estrecho (IGRAC, 2007).</li> </ul>
Recolección de agua lluvia	La escorrentía del techo se desvía a un pozo o tanque lleno de arena o grava, y se filtra a la capa freática donde es recolectada por una bomba de pozo (Dillon, 2005).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprovechamiento y almacenamiento de las aguas lluvias en estructuras ya existentes (como los techos de las viviendas) para su captura.</li> <li>• Mitigación de inundaciones.</li> <li>• Se puede implementar en zonas urbanas donde hay escasez de espacio.</li> <li>• Su captación es fácil, así como lo es su operación y mantenimiento (Ganguly, 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La escasez de lluvia limita el uso de esta técnica.</li> <li>• Si no se hace el mantenimiento adecuado y de manera constante puede atraer vectores y transmitir enfermedades (IGRAC, 2007).</li> </ul>

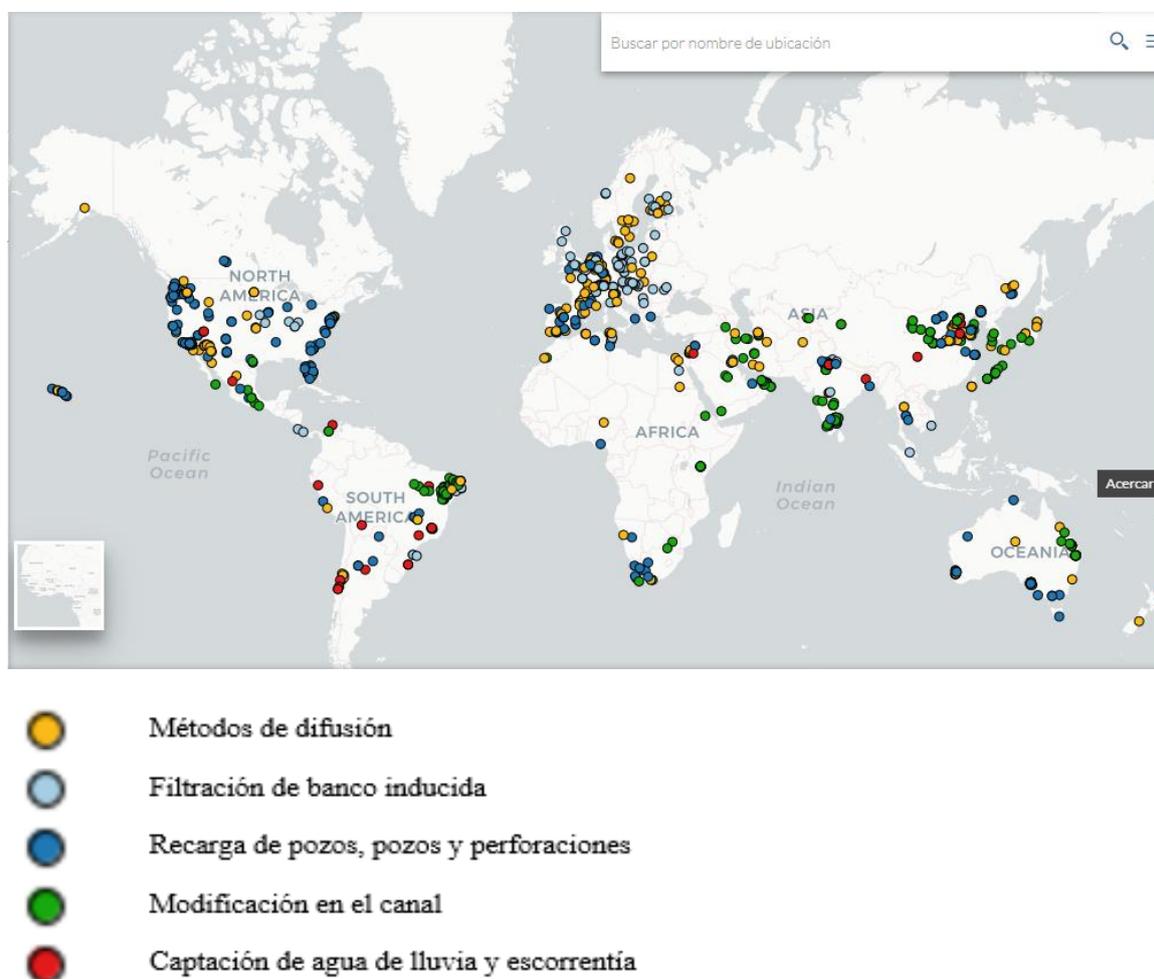
Tipo de recarga	Descripción	Ventajas	Desventajas
Tratamiento del acuífero del suelo (SAT)	<p>Esta técnica es una variación de los estanques de infiltración. Comúnmente se usan las aguas residuales tratadas para infiltrar intermitentemente y facilitar la eliminación de nutrientes y patógenos a su paso por la zona no saturada, para luego ser recuperadas por pozos después de que ingresan al acuífero (Maliva, 2020).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funciona como tratamiento terciario.</li> <li>• Es eficiente mejorando la calidad de las aguas residuales tratadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se debe hacer seguimiento constante a las condiciones del suelo.</li> <li>• Altos costos de mantenimiento.</li> <li>• Se puede llegar a obstruir fácilmente el suelo.</li> <li>• El uso constante de esta técnica puede llegar a modificar las propiedades hidrológicas del suelo.</li> </ul>
Represas de arena	<p>Son estructuras en bloques construidas en regiones áridas con litología de baja permeabilidad en los que se atrapan los sedimentos cuando reaparece la corriente natural del río, ya sea por un evento de lluvia o por sucesivas inundaciones, formando así barras de arena que a su vez forman un “acuífero” durante la estación seca (Dillon, 2005).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la captura de agua entre los espacios de los granos de arena.</li> <li>• Material natural proveniente de las zonas erosionadas.</li> <li>• Estas estructuras requieren poco mantenimiento.</li> <li>• Mejora las condiciones de vida evitando la aparición de enfermedades diarreicas causadas por la ingesta de agua contaminada.</li> <li>• Promueve la reforestación por la disponibilidad de agua (Teel, 2019).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La contaminación del agua puede ser alta si no se tiene cuidado con los puntos de extracción de esa agua.</li> <li>• Las tasas de infiltración son bajas.</li> <li>• Existe la posibilidad de que surjan conflictos por las propiedades donde están ubicadas estas presas (Teel, 2019).</li> </ul>
Presas subterráneas	<p>Las presas subterráneas son barreras de baja permeabilidad que se ubican en ríos temporales con un flujo altamente restringido por la roca madre. Se construye haciendo una zanja en el lecho del río para luego excavar en la roca madre, la cual se rellena con material de baja permeabilidad para así retener el flujo en el material</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede aplicar en zonas áridas.</li> <li>• No tiene interferencia con otros usos del suelo.</li> <li>• No necesita mucho mantenimiento.</li> <li>• Se produce poca pérdida de agua por evaporación.</li> <li>• Los impactos al medio son muy bajos y no existe peligro de rotura (Stevanović, 2016).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los gradientes y la conductividad hidráulica deben ser altos.</li> <li>• La calidad de la presa puede ser poco confiable.</li> <li>• La presa debe ser considerablemente larga para que pueda darse el bloqueo total del flujo.</li> <li>• Las tasas de infiltración no son grandes.</li> <li>• Se debe tener conocimiento de la capa impermeable subterránea.</li> <li>• Por los altos costos en la demolición de la capa impermeable, limitante del flujo vertical, se</li> </ul>

Tipo de recarga	Descripción	Ventajas	Desventajas
Liberación de recarga	<p>aluvial saturado (Stevanović, 2016).</p> <p>Las represas en los ríos temporales se utilizan para atrapar las aguas de inundación, y sus usos pueden incluir la liberación lenta aguas abajo del río para equilibrar la capacidad de infiltración del acuífero subyacente mejorando así significativamente la recarga (Dillon, 2005).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se pueden usar estructuras ya existentes.</li> <li>• No tiene problemas con los usos del suelo, dado que no se modifica.</li> <li>• Almacena agua proveniente de las crecidas repentinas (IGRAC, 2007).</li> </ul>	<p>desconocen comúnmente los volúmenes de agua almacenados.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si los proyectos de construcción de estas estructuras son de gran magnitud los estudios geológicos e hidrogeológicos a realizar para poder definir el diseño óptimo son complejos (Stevanović, 2016).</li> <li>• La principal desventaja proviene principalmente de la falla de la presa, dado que los daños en esta estructura podrían provocar daños irreparables aguas abajo (IGRAC, 2007).</li> </ul>

La información de las técnicas presentadas en el contenido de la Tabla 2 concuerdan con los datos consignados en el portal web del Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC) sobre las aplicaciones de recarga de acuíferos, los cuales fueron compilados por el Grupo de Investigación INOWAS basado en una encuesta integral que cubrió alrededor de 60 países, como se muestra en la Figura 7 (Glass et al., 2022).

### Figura 7

*Ubicación de los métodos de recarga artificial de acuíferos más usados en el portal web del IGRAC*



Nota. adaptado de *Home*, por GGIS, s.f., <https://ggis.un-igrac.org/view/marportal#/>

En la Figura 7 se puede observar cuáles han sido los métodos más usados en cada país, y analizar que el método en la modificación del canal (presas de arena y presas subterráneas) es ampliamente aplicado en los países donde las precipitaciones son muy bajas, es decir, en las

regiones semiáridas y áridas que principalmente se ubican en el continente africano donde se originan arroyos temporales por las pocas precipitaciones que se presentan, así estas estructuras tienen un buen aprovechamiento en los cauces de estos ríos (Stevanović, 2016). De igual modo, en varios ríos de Europa es muy común el uso de la técnica de filtración de banco o filtración de la orilla del río por su fácil aplicación y su nivel de eficiencia en el tratamiento del agua (Stauder et al., 2012). A diferencia de los anteriores, en los países de la región de América del Sur es más común la práctica de captación de agua lluvia, debido a las altas precipitaciones que se presentan en la zona sur del continente (ONU, 2020).

#### **4.6 Impactos en la Calidad del Agua Subterránea por la Explotación Inadecuada de los Acuíferos y las Técnicas más Usadas en la Recarga Artificial**

Debido al desarrollo cada vez mayor que ha tenido la práctica de explotación de las fuentes de agua subterránea, en las últimas 5 décadas se han dado numerosos avances en la elaboración y modificación de las herramientas que se utilizan para la perforación de pozos. Así, lo demuestran los estudios realizados desde finales de los 90 y las investigaciones que se han desarrollado en los años recientes (Burke et al., 1999; Llamas y Custodio, 2002; Shah et al., 2007).

Esas reflexiones y transformaciones se han ido dando debido a que se ha observado que la mayoría de las prácticas que se han desarrollado desde antaño para la abstracción de agua no han demostrado ser sostenibles hasta la fecha, dado que la dinámica de las superficies potenciométricas cambia drásticamente cuando la abstracción supera el proceso de recarga natural anual del acuífero (D'Elia et al., 2018), alterando así el gradiente hidráulico y, por ende, el flujo del agua (Gejl et al., 2019). Ello sucede con más frecuencia cuando se trata de zonas áridas y semiáridas, dado que estos sistemas son muy sensibles al momento en que se produce el bombeo (Martos-Rosillo y Moral, 2015), el cual conlleva a la disminución de las alturas

piezométricas (Nofal et al., 2018; Gejl et al., 2019) vulnerando el concepto de explotación segura (D'elia et al., 2018) y propiciando que los parámetros que evalúan la calidad del agua subterránea, como los sulfatos y los cloruros, se vean comprometidos (Gejl et al., 2019).

Una solución para disminuir el daño ocasionado al sistema, como se ha expuesto líneas atrás, es aumentar la tasa de recarga para que esta supere la tasa de extracción del agua subterránea. Con el aumento en la disponibilidad del agua subterránea en el acuífero se puede mejorar la oferta del recurso e incrementarla permitiendo que las necesidades de agua para el consumo humano y el desarrollo de las actividades agrícolas, industriales y demás actividades económicas, sean suplidas (Jódar et al., 2022). A su vez, la disponibilidad del agua aporta soluciones a diversos problemas ambientales como lo es la intrusión de agua salada en las zonas costeras, tal como ha quedado demostrado en diferentes estudios donde se ha comprobado que la recarga artificial de agua dulce es una buena alternativa para frenar el fenómeno de la intrusión marina en el acuífero, el cual se produce en las zonas semiáridas y áridas donde la extracción del recurso generalmente excede la recarga natural del sistema permitiendo que el agua salada del mar llene la reserva del acuífero (Rong et al., 2017; Pu et al., 2021).

Ahora bien, para hacer la recarga artificial es necesario conocer la calidad del agua que será inyectada al acuífero en estudio, dado que se utilizan aguas pluviales, superficiales, residuales y potables, y cada una de ellas presenta características fisicoquímicas diferentes. Esto hace que sea necesario prestar atención al campo hidrodinámico y químico del sistema, debido a que este puede reaccionar de manera no muy positiva a la recarga creando en consecuencia un problema medioambiental y/o afectaciones a la salud humana (Wood y Bassett, 1975).

Lo anterior es soportado por estudios como el realizado en Chipre, país ubicado al occidente del continente asiático, el cual concuerda con lo expuesto en el párrafo anterior al reconocer la importancia de monitorear las características químicas del acuífero y de evaluar

la eficiencia de la recarga artificial con aguas residuales, pues de esa manera se puede valorar la efectividad que tendrá el cambio antes de hacerlo y ver cómo el cambio podría afectar la composición química del sistema debido a la mezcla del agua subterránea con el agua residual. Estos monitoreos de los nutrientes y los niveles de cloruro y aluminio que están presentes de forma habitual en las aguas residuales son de suma relevancia para evitar efectos negativos sobre el medioambiente y la salud humana, dado que el proceso de recarga puede contaminar el acuífero de manera irreversible y generar problemas de salud debido a que dichas reservas son destinadas en su mayoría para el consumo humano (Tzoraki et al., 2018).

Estudios como el realizado por Liu et al. (2018) aconsejan, desinfectar el agua que se va a infiltrar antes de recargar el sistema acuífero para proteger la calidad del agua subterránea y la salud pública de los riesgos asociados con las bioincrustaciones y la posibilidad de que se transmitan algunos patógenos microbianos. Sin embargo, en los procesos de desinfección por cloración el agua clorada inyectada en los acuíferos ha generado subproductos al reaccionar con materia orgánica disuelta, siendo uno de ellos la creación del cloroformo. En China se realizó una prueba en un acuífero anóxico para observar la transformación del cloroformo durante la inyección del agua clorada, y se llegó a la conclusión de que la inyección de agua de recarga enriquecida con oxígeno disuelto promovió que las concentraciones de cloroformo fueran menores en los suelos esterilizados, lo que demuestra que la presencia de microorganismos condujo a la biodegradación (Liu et al., 2018).

Los impactos negativos sobre los ecosistemas naturales afectan las aguas subterráneas, debido a que las fuentes de agua para la recarga artificial de los acuíferos provienen de ríos, arroyos perennes o intermitentes que son cada vez más afectados por el desarrollo económico y social, por lo tanto, la calidad del agua puede variar según la ubicación del recurso, el clima y la existencia de algún tipo de intervención antrópica por las descargas puntuales o difusas al sistema.

Es importante enfatizar en este punto, dado que cuando se requiere que la infiltración en un canal sea revestida o conserve las propiedades naturales del entorno se pueden presentar diferentes problemas como la proliferación de algas debido a los nutrientes disponibles en el recurso hídrico, como el nitrógeno y el fósforo, que obstruyen las paredes del canal llegando a convertirse en una barrera natural del sistema. A su vez, los sedimentos transportados por el agua, dependiendo de su velocidad, pueden precipitarse y obstruir los espacios presentes en el subsuelo por donde el agua se moviliza. Y si estos hechos se presentan, según lo explicado por Bouwer et al. (2001), la actividad bacteriana se activa para la degradación de la materia orgánica, como el proceso de la desnitrificación, produciendo gases y ocupando las pequeñas zonas en el subsuelo por donde el agua fluye libremente por acción de la gravedad, lo que termina afectando la conductividad hidráulica del acuífero.

Esos procesos bacterianos se manifiestan generalmente en épocas de altas temperaturas, dado que el calor acelera el proceso de descomposición y contribuye con la producción de una serie de gases como el metano, sin embargo, su disponibilidad se ve afectada por la temperatura del suelo y del ambiente. Igualmente, estudios como los realizados por Bouwer (2001) y Baveye et al. (1998) corroboran que las obstrucciones de la superficie en los sistemas de infiltración pueden ser ocasionados por la actividad microbiológica.

Con relación a lo anterior, en diversos estudios se ha encontrado que los sólidos suspendidos totales en las fuentes de agua también se interponen como barrera para realizar el proceso de infiltración. Es el caso de la investigación realizada por los autores Rong et al. (2017), quienes desarrollaron un estudio en China en el que usaron un tanque de filtro como estrategia anti-obstrucción, el cual se instaló en el lecho del canal que estaba cubierto con geotextil, un filtro de arena gruesa de arriba abajo, dado que la zona de estudio, el río Yellow, es una de las corrientes de agua que presenta mayores sedimentos en el mundo, siendo, por

tanto, adecuado para realizar los experimentos del efecto de los sedimentos en la recarga artificial.

En otros países como en la India también se han realizado estudios sobre el efecto de los sólidos suspendidos totales, destacando entre ellos la investigación realizada por los autores Holländer et al. (2009) donde concluyeron que la remoción de estos sólidos es de suma importancia para la recarga del acuífero, pues de esa manera se evitará la obstrucción del sistema en el suelo.

Detrás de estos datos, se hace evidente la necesidad de crear nuevas investigaciones que apunten a realizar una eficiente recarga artificial, además de tener en cuenta que para llevar a cabo los procesos de extracción, la falta de infraestructura para la perforación y bombeo, han generado un deterioro en la calidad del agua, que se evidencia en la degradación de algunos minerales, ya que la entrada de oxígeno a estos reservorios facilita los estados oxidativos, al mismo tiempo en el proceso de la extracción la intrusión de agua salada y la entrada de contaminantes por nitratos se hace inminente (Mekki et al., 2017).

La revisión de estas fuentes de estudios, proporcionó información sobre las interacciones hidrogeoquímicas que influyen notoriamente en algunos parámetros que evalúan la calidad de agua a partir de las modificaciones en las condiciones hidrodinámicas de los acuíferos, además de brindar los planteamientos que se deben tener en cuenta para desarrollar un uso sostenible en la explotación de las aguas subterráneas.

#### **4.7 Normatividad Relacionada con el Agua Subterránea**

Las políticas relacionadas con la gobernanza y gestión de las aguas subterráneas deben garantizar la calidad del agua, la sustentabilidad, los planes de acción para emergencias y la participación de la comunidad y todos los interesados para garantizar la construcción adecuada

de los aspectos legales e instrumentos normativos que contengan las disposiciones que deben seguirse a fin de realizar una gestión ambiental adecuada. En concordancia, respecto a los sistemas de acuíferos la Unesco (2022) expuso que los marcos legales para estos sistemas deben incluir la protección de las zonas de descarga, las zonas de recarga y el área que rodea los pozos de suministro de agua, así como también normas de rendimiento sostenible y controles de extracción y regulaciones de uso conjunto.

Por lo anterior, en el proceso investigativo se decidió llevar a cabo un análisis del marco legal de algunos de los países en los que más se ha estudiado la recarga artificial de acuíferos, con la finalidad de conocer el estado en que se encuentra la práctica y la normatividad relativa, los objetivos con los que se desarrolla la práctica en cada Estado y las diferencias que presentan entre sí al respecto (ver Tabla 3).

**Tabla 3**

*Marco legal en materia de agua subterránea y recarga de acuíferos*

País	Entidades responsables y legislación	Fuente
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agencia de Protección Ambiental (EPA).</li> </ul>	<a href="https://www.epa.gov/sdwa">https://www.epa.gov/sdwa</a>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ley de Agua Potable Segura (SDWA, por sus siglas en inglés: Safe Drinking Water Act), la cual hace referencia a la calidad del agua.</li> </ul>	<a href="https://www.epa.gov/superfund/superfund-cercla-overview">https://www.epa.gov/superfund/superfund-cercla-overview</a>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) que trata la posible contaminación del agua subterránea con agentes químicos provenientes de las industrias.</li> </ul>	<a href="https://www.epa.gov/rcra">https://www.epa.gov/rcra</a>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ley Integral de Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambientales (CERCLA) que interpone impuestos sobre las industrias por contaminación del agua.</li> </ul>	<a href="https://www.epa.gov/uic/aquifer-recharge-and-aquifer-storage-and-recovery#background">https://www.epa.gov/uic/aquifer-recharge-and-aquifer-storage-and-recovery#background</a>
India	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El programa Control de Inyección Subterránea (UIC) de la EPA, el cual regula los pozos de inyección AR y ASR. Este programa no regula la recuperación del agua almacenada.</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ministerio del Agua (Jal Shakti), órgano principal del Gobierno de la India para la formulación de políticas y ejecución de normas y reglamentos sobre el agua, creado en el año 2019.</li> <li>• Comité Central de Aguas Subterráneas (CGWB), el cual explora acuíferos en diferentes condiciones</li> </ul>	

País	Entidades responsables y legislación	Fuente
México	<p>hidrogeológicas y determina los parámetros hidráulicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comisión Nacional del Agua (Conagua).</li> <li>• Ley de Aguas Nacionales, última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación DOF 11-05-2022 (artículos 3, 7, 40 y 91), donde la recarga de acuíferos se declara servicio ambiental de utilidad pública, se dispone se debe reportar el diagnóstico de daños en los ecosistemas hídricos y contar con el permiso para hacer la recarga con aguas residuales.</li> <li>• Norma Oficial Mexicana NOM-003-CONAGUA-1996, sobre los requisitos que se deben cumplir durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. Esta norma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación del 3 de febrero de 1997.</li> <li>• Norma Oficial Mexicana NOM-004-CONAGUA-1996 que contiene los requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y la rehabilitación de pozos de extracción de agua, y para el cierre de pozos en general. Esta norma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación del 8 de agosto de 1997.</li> <li>• Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003 que contiene los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Esta norma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación del 18 de agosto de 2009.</li> <li>• Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, sobre la infiltración artificial de agua a los acuíferos, las características y especificaciones de las obras y del agua. Esta norma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación del 18 de agosto de 2009.</li> <li>• Norma Mexicana NMX-AA-179-SCFI-2018, sobre la medición de los volúmenes de aguas nacionales extraídos de los cuerpos que son propiedad de la nación, la cual es aplicable a quien cuente con una concesión de aguas subterráneas.</li> </ul>	<p><a href="https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-nom-83264">https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-nom-83264</a></p> <p>Ley de aguas nacionales <a href="https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/sistema-de-lanmxaa179scfi2018-medicion-de-volumenes-de-aguas-nacionales-usados-explotados-o-aprovechados">https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/sistema-de-lanmxaa179scfi2018-medicion-de-volumenes-de-aguas-nacionales-usados-explotados-o-aprovechados</a></p>
Chile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ministerio de Obras Públicas.</li> <li>• Dirección Nacional de Aguas (DGA).</li> <li>• Decreto 203, el cual fue derogado por el Decreto 224, que contiene el Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas.</li> <li>• Ley 21435 que reforma el Código de Aguas en los artículos 66 bis, ter y quáter, 159 y el 293 bis, donde se definen los diferentes usos para la recarga artificial, se establecen requerimientos para la fuente</li> </ul>	<p><a href="https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1174443">https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1174443</a></p> <p><a href="https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1060095">https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1060095</a></p>

País	Entidades responsables y legislación	Fuente
	de la recarga, los permisos de ejecución de obras sin afectar a terceros y se exige que los planes estratégicos de las cuencas contengan información sobre nuevas fuentes de aprovechamiento (entre ellas la recarga artificial de acuíferos).	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Real Decreto Legislativo 1/2001 del 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.</li> <li>• Real Decreto 1514/2009 del 2 de octubre, por el cual se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.</li> </ul>	<a href="https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276">https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276</a>
España	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Real Decreto 2618/1986 del 24 de diciembre, por el que se aprueban medidas referentes a acuíferos subterráneos al amparo del artículo 56 de la Ley de Aguas.</li> <li>• Real Decreto 1620/2007 del 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas.</li> </ul>	<a href="https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2009-16772">https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2009-16772</a> <a href="https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1986-33757">https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1986-33757</a>

De acuerdo con la información recopilada sobre la normatividad vigente que contiene disposiciones relativas al manejo de las aguas subterráneas se encontró que de los países donde se habla específicamente de recarga artificial de acuíferos es en México y Chile cuya normatividad regula el control de los usos, las obras y la calidad del agua proveniente de los acuíferos. Si bien en los países de Estados Unidos y España se habla sobre la recarga de acuíferos, la legislación vigente se centra en la calidad del agua debido a la posible contaminación que se puede presentar por los insumos químicos provenientes de la industria. En India se observa que el país cuenta desde hace algunos años con un Comité Central de Aguas Subterráneas que se ha encargado de realizar las exploraciones y hacer la caracterización de los acuíferos en el territorio nacional; pero solo en el 2019 se creó el Ministerio del Agua.

En el caso concreto de Colombia existen varias entidades y se ha creado normatividad para regular el tema de las aguas subterráneas. Desde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) se recomienda la construcción del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) donde se exponen instrumentos de planificación y administración del agua, el cual se

complementa con la *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos* que fue publicada en el año 2014 para establecer criterios técnicos, procedimientos y metodologías relativas a la práctica.

También se cuenta con el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB) que formuló el MADS y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en compañía de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), algunas universidades del país, expertos en hidrogeología, entre otros interesados, procurando la articulación interinstitucional que busca apoyar el diseño y la promoción de estrategias a nivel nacional y regional que garanticen una adecuada evaluación y gestión del agua subterránea en Colombia en el marco de la Política Nacional de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH). Para dar cumplimiento a lo dispuesto en el PNASUB se plantearon los siguientes objetivos específicos:

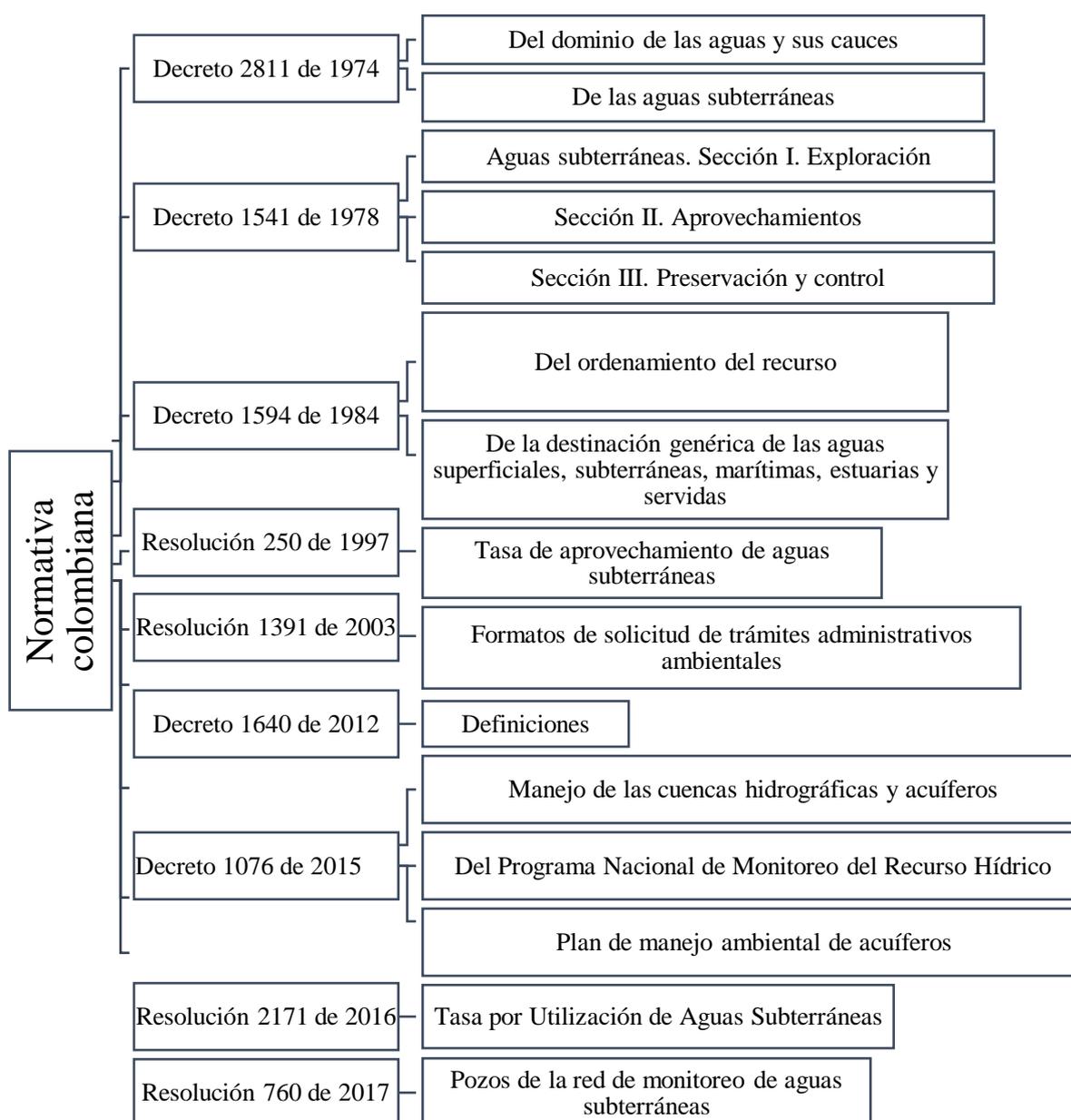
1. Diseñar, promover e implementar estrategias para la ampliación y consolidación del conocimiento hidrogeológico de sistemas acuíferos priorizados y el fomento de la formación permanente a nivel técnico, tecnológico y de posgrado en la temática.
2. Implementar estrategias de fortalecimiento institucional para la adecuada gestión del recurso hídrico subterráneo en términos de recurso humano suficiente, capacitado y con dedicación exclusiva, logística adecuada para labores de evaluación, monitoreo, seguimiento y control, y asignación de recursos económicos para la financiación de proyectos de conocimiento, evaluación, protección y conservación de sistemas acuíferos de importancia nacional y regional.
3. Formular e implementar estrategias para la gestión integrada de las aguas subterráneas soportadas en programas nacionales y regionales de monitoreo de sistemas acuíferos, articulados al SIRH [*Sistema de Información del Recurso Hídrico*].

4. Promover la formulación e implementación de medidas de manejo ambiental de acuíferos con base en mecanismos de participación, educación y resolución de conflictos y en instrumentos de planeación, comando y control, económicos y financieros, entre otros. (Ministerio de Ambiente, s.f., párr. 4)

Adicional a los instrumentos comentados, para la construcción de los planes y proyectos se cuenta con la legislación colombiana que se presenta a continuación (ver Figura 8).

**Figura 8**

*Normativa colombiana asociada a las aguas subterráneas*



A pesar de que en Colombia se han construido estos planes y se cuenta con políticas que contienen disposiciones sobre las aguas subterráneas y los acuíferos, hasta el momento la legislación colombiana no ha emitido normatividad ni pronunciamientos sobre la recarga artificial de los acuíferos. Posiblemente ello se deba a que el agua es un recurso muy abundante en el país, aunque en la práctica su distribución es desigual.

Se considera que la recarga artificial de los acuíferos, por todas las bondades que se han expuesto en este documento, podría aportar una solución a las sequías que se presentan en algunas zonas del país como la Guajira y Sucre. Esta consideración se soporta en experiencias previas de proyectos en los que se usa esta técnica que se han realizado en el país, a pesar de que la legislación colombiana aún no emite regulación alguna. Es el caso de la ciudad costera de Santa Marta donde se han estudiado y construido estos proyectos para garantizar el abastecimiento de agua dulce a la población en tiempos de sequía, y el departamento de Sucre donde se han desarrollado estos proyectos con el fin de promover la recuperación de los suelos y favorecer la recarga del acuífero Morroa mediante el aumento de la infiltración (Navarro, 2020).

## 5 Conclusiones

A nivel mundial el recurso hídrico siempre ha ocupado el primer lugar en la lista de las necesidades básicas diarias del ser humano. Y es en ese contexto que han ido evolucionando las ideas para la explotación de este importante recurso, así como las técnicas y habilidades para transformar este y otros recursos naturales.

Los estudios que se han realizado en los últimos años muestran cómo la contaminación, el cambio climático, el uso desmedido y poco sostenible del recurso hídrico y los cambios que se han ido dando en el uso del suelo se han convertido en las principales causas del desabastecimiento de agua, esto sumado a las afectaciones que causan en las diferentes etapas del ciclo hidrológico que impiden o dificultan la retención del agua subterránea. En la medida en que el agua ha ido escaseando, sea por las malas prácticas que se emplean en su aprovechamiento, el mal manejo de este recurso y/o por los fenómenos temporales que se producen en el comportamiento de las precipitaciones, han evidenciado que la escasez hídrica se ha convertido en uno de los problemas prioritarios en el mundo y que hay que buscar soluciones para mitigar sus impactos.

Es vital conocer la variabilidad climática a escala temporal y espacial, y comprender su comportamiento en la oferta y demanda, dado que el acceso a este recurso que es tan limitado para algunas poblaciones y comunidades es esencial para avanzar en el desarrollo de un país (Bedoya et al., 2010). En ese sentido, se debe tener en cuenta la particularidad de los suelos y los territorios, dado que los estudios sobre los impactos provocados por la variabilidad climática deben ser diferentes en cada parte del mundo, puesto que cada país presenta un escenario diferente, ya sea por su capacidad evolutiva en la economía, su capacidad de respuesta frente a eventos extremos de precipitación, temperatura, entre otros.

La documentación revisada en este estudio permite concluir que la recarga artificial de acuíferos puede llegar a ser un elemento demasiado útil para la gestión integrada de los recursos

hídricos, dado que hace posible la mejora de las condiciones de vida en regiones donde los acuíferos se han visto verdaderamente afectados por la falta de planificación y seguimiento que se les realiza a estos sistemas. Esta mejora va concatenada con otros beneficios que aporta la práctica, entre los que se hallan: ayudar a conservar los recursos hídricos superficiales, disminuir las extracciones exhaustivas, mejorar la calidad del agua subterránea, minimizar las pérdidas por evaporación y aumentar el volumen de agua subterránea disponible para sus diferentes usos.

Finalmente, en este cierre de la investigación es importante mencionar que, a pesar de que en Colombia se han elaborado planes y se han diseñado políticas que contienen disposiciones sobre el manejo de las aguas subterráneas y los acuíferos, es necesario que en el país se construya una legislación que permita el desarrollo y control de la recarga artificial de acuíferos en el territorio nacional como una vía de solución para enfrentar el fenómeno de las sequías que se presenta en algunas zonas del país.

## 6 Referencias Bibliográficas

- Abdelkareem, M., Mansour, A., & Akawy, A. (2022). Mapping Groundwater Recharge Potential in the Nile Basin Using Remotely Sensed Data and GIS Techniques. En *Sustainability of Groundwater in the Nile Valley*, (págs. 293-318). Springer.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B., DeLeo, P., & Sánchez de Lozada, D. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Crit Rev Environ Sci Technol, CRC Press*, 28(2), 123-191. <https://doi.org/10.1080/10643389891254197>.
- Bedoya, J., Castaño, G., & Ochoa, S. (2019). Tolerancia al plomo de aislamientos nativos de *Pseudomonas* spp. de aguas residuales del Valle de Aburrá. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 135-143. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.65146>.
- Bouwer, H. (2000). Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*, 45(3), 217-228.
- Bouwer, H., Ludke, J., & Rice, R. (2001). Sealing Pond bottoms with muddy water. *J Ecol Eng*, 18(2), 233-238. [10.1016/S0925-8574\(01\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00071-4).
- Burke, J., Sauveplane, C., & Moench, M. (1999). Groundwater management and socio-economic responses. En *Natural Resources Forum* (págs. 303-313). Blackwell Publishing Ltd.
- Choudhary, M., & Chahar, B. (2007). Recharge/seepage from an array of rectangular channels. *Journal of Hydrology*, 343(1-2), 71-79. [10.1016/j.jhydrol.2007.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.009).
- Comisión Nacional de Riego [CNR]. (2020). *Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos*. CNR.
- Congreso de la República de Colombia. (2008). Ley 1257 de 4 de diciembre de 2008. Diario Oficial No. 47.193. Bogotá, Colombia.

- Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology journal*, 13(1), 313-316. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-004-0413-6>.
- Gejl, R., Rygaard, M., Henriksen, H., Rasmussen, J., & Bjerg, P. (2019). Understanding the impacts of groundwater abstraction through long-term trends in water quality. *Water Research*, 156, 241-251. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/179417395/Manuscript.pdf>.
- GGIS. (s.f.). *Home*. <https://ggis.un-igrac.org/view/marportal#/>
- Glass, J., Junghanns, R., Schlick, R., & Stefan, C. (2022). The INOWAS platform: A web-based numerical groundwater modelling approach for groundwater management applications. *Environmental Modelling & Software*, 155, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105452>.
- Hashemy, S., Firoozfar, A., Maestre, J., Mallakpour, I., Taghvaeian, S., & Karimi, P. (2018). Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. *Agricultural Water Management*, 204, 234–246.
- Hatch, G. (2017). Agua subterránea y soberanía interdependiente: el caso de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la región binacional de Paso del Norte. *Norteamérica*, 12(2), [10.20999/nam.2017.b005](https://doi.org/10.20999/nam.2017.b005).
- Holländer, H., Mull, R., & Panda, S. (2009). A concept for managed aquifer recharge using ASR-wells for sustainable use of groundwater resources in an alluvial coastal aquifer in Eastern India. *Physics and Chemistry of the Earth, parts A/B/C*, 34(4-5), 270. [10.1016/j.pce.2008.05.001](https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.05.001).
- Izbicki, J., Petersen, C., Glotzbach, K., Metzger, L., Christensen, A., Smith, G., & Shannon, H. (2010). Aquifer Storage Recovery (ASR) of chlorinated municipal drinking water in a confined aquifer. *Applied Geochemistry*, 25(8), 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.04.017>.

- Jiménez, B., & Galizia, J. (2012). *Diagnóstico del Agua en las Américas*. Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS).
- Jódar, J., Zakaluk, T., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Lechado, C., Martín-Civantos, J., & Martos-Rosillo, S. (2022). *Artificial recharge by means of careo*. s/e.
- Kanagaraj, G., Suganthi, S., Elango, L., & Magesh, N. (2019). Assessment of groundwater potential zones in Vellore district, Tamil Nadu, India using geospatial techniques. *Earth Science Informatics*, 12(2), 211-223. 10.1007/s12145-018-0363-5.
- Liu, D., Liang, X., Zhang, W., Wang, Z., Ma, T., Li, F., & Chen, X. (2018). Formation and transformation of chloroform during managed aquifer recharge (MAR). *Journal of Environmental Management*, 219, 304-315. 10.1016/j.jenvman.2018.04.113 .
- Llamas, M., & Custodio, E. (2002). *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. CRC Press.
- Maliva, R. G. (2020). Recharge and Recovery Treatment Systems. In *Anthropogenic Aquifer Recharge* (pp. 603-621). Springer, Cham.
- Mekki, I., Ghazouani, W., Closas, A., & Molle, F. (2017). Perceptions of groundwater degradation and mitigation responses in the Haouaria region in Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, 101-110.
- Ministerio de Ambiente. (s.f.). *Programa Nacional de Aguas Subterráneas*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/planificacion-de-cuencas-hidrograficas/acuiferos/programa-nacional-de-aguas-subterraneas>
- Mohan, S., & Kuipally, N. (2021). *Groundwater and Conjunctive Use Management*. In *Handbook of Water Resources Management: Discourses, Concepts and Examples* (pp. 735-775). Springer, Cham.

- Navarro, J. (2020). *Monitoreo de las obras piloto de recarga artificial en el acuífero Morroa, departamento de Sucre, Colombia*. Universidad Eafit.
- Nijhawan, L., Janodia, M., & Muddukrishna, B. (2013). Informed Consent: Issues and Challenges. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 4(3), 134-140. 10.4103/2231-4040.116779.
- Nofal, E., Fekry, A., Ahmed, M., & El-Kharakany, M. (2018). Groundwater: Extraction versus recharge; vulnerability assessment. *Water Science* 32(2), 287-300. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1016/j.wsj.2018.07.002>.
- Ordoñez, J. (2011). *Ciclo hidrológico*. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf)
- O'Shea, M. (1994). *Borehole recharge—A drought management strategy*. American Society of Civil Engineers.
- O'Shea, M., Baxter, K., & Charalambous, A. (1995). The hydrogeology of the Enfield-Haringey artificial recharge scheme. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 115-129.
- Peñuela, L., & Carrillo, J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, (81), 18-32. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112013000200003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112013000200003).
- Rezaei, A., Hassania, S., Hassani, N., Jabbaric, S., & Fard Mousavid, S. (2019). Evaluation of groundwater quality and heavy metal pollution indices in Bazman basin, southeastern Iran. *¿Ground-water for sustainable development*, 9, 101–114. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X18300778>.

- Rong, Q., Wang, W., Qu, S., Li, J., Li, F., Xu, Q., . . . Deng, H. (2017). A MAR to address the water with high content of suspended solid with a case study in the Yellow River flood plain, China. *Agricultural Water Management*, 182, 165-175.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377416303808#!>
- Salako, A., & Adepelumi, A. (2018). *Aquifer, classification and characterization*. Intech.
- Schewe, J., H. J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N., Clark, D., . . . Colón-González, F. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América*, 111(9), 3245–3250.  
[doi.org/10.1073/pnas.1222460110](https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110).
- Shah, T., Burke, J., Villholth, K., Angelica, M., Custodio, E., Daibes, F., & Kendy, E. (2007). *Groundwater: a global assessment of scale and significance*. s/e.
- Song, S., Li, F., Li, J., & Liu, Q. (2013). Distribution and contamination risk assessment of dissolved trace metals in surface waters in the Yellow River Delta. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 19(6), 1514-1529.  
<https://doi.org/10.1080/10807039.2012.708254>.
- Stauder, S., Stevanovic, Z., Richter, C., Milanovic, S., Tucovic, A., & Petrovic, B. (2012). Evaluating bank filtration as an alternative to the current water supply from Deeper Aquifer: a case study from the Pannonian Basin, Serbia. *Water Resources Management*, 26(2), 581-594. <https://ideas.repec.org/a/spr/waterr/v26y2012i2p581-594.html>.
- Stevanović, Z. (2016). Damming underground flow to enhance recharge of karst aquifers in the arid and semi-arid worlds. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 1-14.  
[10.1007/s12665-015-5086-z](https://doi.org/10.1007/s12665-015-5086-z).
- Todd, D. (1959). *Annotated bibliography on artificial recharge of ground water through 1954*. US Government Printing Office.

- Tzoraki, O., Dokou, Z., Christodoulou, G. G., & Karatzas, G. (2018). Assessing the efficiency of a coastal Managed Aquifer Recharge (MAR) system in Cyprus. *Science of The Total Environment*, 626, 875-886.  
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183285132>.
- Unesco. (2022). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo* .  
[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa)
- Vadillo, I., & Ojeda, L. (2022). Carbonate aquifers threatened by contamination of hazardous anthropic activities: Challenges. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 26, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100336>. No esta referenciada en el doc
- Wood, W., & Bassett, R. (1975). Water quality changes related to the development of anaerobic conditions during artificial recharge. *Water Resources Research*, 11(4), 553-558.  
10.1029/WR011i004p00553.