

Métodos de almacenamiento del agua

Un elemento clave para la adaptación al cambio climático



INDICE

1	Introducción	4
2	El almacenamiento del agua desde tiempos remotos	6
3	Almacenamiento superficial del agua	9
3.1	Presas y embalses	9
3.2	Balsas	12
3.3	Tanques y cisternas	14
4	Almacenamiento subterráneo del agua	17
4.1	Métodos de recarga artificial de acuíferos	19
4.1.1	Métodos de distribución o de dispersión	21
4.1.1.1	Tratamiento suelo acuífero	21
4.1.1.2	Inundación controlada	22
4.1.1.3	Recarga incidental por riego	23
4.1.1.4	Estanques de infiltración o recarga	23
4.1.1.5	Zanjas o Canales de Infiltración	24
4.1.2	Modificaciones en el interior del canal	26
4.1.2.1	Represas de retención	26
4.1.2.2	Represas de arena	27
4.1.2.3	Represas subsuperficiales	28
4.1.2.4	Represas perforadas	29
4.1.2.5	Serpenteos	29
4.1.2.6	Escarificación del lecho	29
4.1.3	Pozos, túneles y perforaciones	30
4.1.3.1	Pozos abiertos de infiltración y pozos profundos	30
4.1.3.2	Galerías subterráneas	31
4.1.3.3	Sondeo, almacenamiento en acuífero con recuperación (AAR) y almacenamiento en acuífero, transporte y recuperación (AATR)	32
4.1.3.4	Dolinas o colapsos	34
4.1.4	Infiltración inducida	34
4.1.4.1	Filtración a las margenes de los ríos	34
4.1.4.2	Filtración interdunar	35
4.1.4.3	Riego subterráneo	35
4.1.5	Sistemas urbanos de drenaje	35
4.1.5.1	Recarga accidental en conducciones y alcantarillado	35
4.1.5.2	Sistemas urbanos de drenaje sostenible	36
4.1.6	Captación de agua de lluvia	36
4.1.6.1	Cultivo en tierra áridas	36
4.1.6.2	Captación en los techos	37
4.2	Calidad del agua para la recarga de acuíferos	39

4.3	Aspectos de diseño de un plan de recarga de acuíferos	44
5	Experiencias en captación y almacenamiento de agua a nivel global	49
6	Métodos de almacenamiento de agua con aplicación potencial en la vertiente del Pacífico de Guatemala	53
6.1	Aplicación de métodos superficiales de almacenamiento de agua	53
6.2	Aplicación de métodos subterráneos de almacenamiento de agua	53
7	Referencias bibliográficas	57

1 Introducción

Aunque Guatemala puede considerarse un país rico en recursos hídricos, posee la limitante en que la distribución de los mismos no es uniforme en el espacio y en el tiempo. En la mayor parte del país, claramente se identifica una época seca sin lluvias, y una época lluviosa que normalmente satisface los requerimientos consuntivos; pero que además, genera excesos de agua de los que gran parte se pierden por escorrentía y en ocasiones generan inundaciones. Así mismo, en la época de lluvias ocurre un período de canícula que -en algunos casos- se prolonga y afecta a la agricultura, provocando pérdidas de siembras por el déficit hídrico temporal. La distribución de las lluvias a nivel nacional es variada, pues existen regiones en las que se registran 800 mm de lluvia distribuidos en 75 días y otras regiones en las que se alcanzan hasta los 4000 mm distribuidos 275 días del año.

Además de la problemática de la distribución, otros factores como la contaminación del agua superficial y subterránea, el rápido crecimiento poblacional y la alta tasa de urbanización, ejercen presión sobre los recursos hídricos, principalmente en la ciudad de Guatemala (IARNA, 2004).

El crecimiento de zonas de riego es un factor importante del crecimiento en la demanda de agua, y para que sea una actividad sostenible es necesario considerar la gestión de los recursos hídricos.

En la actualidad se afrontan los efectos del cambio climático global, que implican incrementos en la demanda de agua y variaciones extremas en la disponibilidad de tal recurso, aspecto que afecta en forma directa la vida y actividades productivas, por lo se considera un serio reto para el desarrollo del país.

Según Adler (2006), éste desfase entre la disponibilidad y la abundancia de agua se resuelve acumulándola en épocas de abundancia para ser utilizadas en épocas de mayor. Gale (2005) indica que la gestión adecuada de acuíferos tiene potencial para el abastecimiento de comunidades pequeñas de zonas áridas y semiáridas así como reducción de la vulnerabilidad a eventos extremos de clima.

En este contexto, el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) se ha propuesto dedicar recursos a la investigación de métodos de captación y almacenamiento de agua con el fin de estudiar e implementar alternativas que contribuyan a la adaptación de los habitantes de Guatemala a los efectos del cambio climático. Como punto de partida de esta iniciativa se presenta este documento en el que

se hace una revisión acerca de métodos de almacenamiento de agua que se han aplicado en el mundo para dar a conocer sus características y para que sirva de base para proponer aplicaciones en el ámbito geográfico del ICC.

2 El almacenamiento del agua desde tiempos remotos

La ubicación de ciudades importantes en las riberas de los ríos en las fases iniciales de la civilización, obedeció a la disponibilidad inmediata del recurso agua. Esto se hace evidente al contemplar ciudades como Roma (a orillas del río Tiber), París (río Sena) Londres (río Támesis); las provincias de Lanzhou, Wuhai, Baotou, Kaifeng, y Jinan de China (río Amarillo) y muchas otras. Esta estrategia permitió el abastecimiento para consumo y para el desarrollo de la agricultura. Sin embargo, Ballén et. al. (2006) indican que con el incremento de las poblaciones, se hizo necesaria la colonización de regiones áridas o semiáridas, situación que favoreció el desarrollo de los métodos de captación y almacenamiento de aguas de lluvia.

De acuerdo con Ballén, et al (2006), los primeros aprovechamientos de agua de lluvia datan de 4000 años A.C. En el desierto del Negév (Israel y Jordania), se han descubierto vestigios de aprovechamiento de agua de lluvia consistentes en el desmonte de colinas y conducción del agua hacia parcelas agrícolas ubicadas en las partes bajas cuya antigüedad es de 4000 años o más. En Yemen del sur existe evidencia de terrazas y patios de templos utilizados hace 1000 años para la captación de agua de lluvia. Hacia los siglos III y IV A.C. las viviendas unifamiliares contaban con un espacio y estructuras para la captación y aprovechamiento de agua de lluvia; en Ganzhou, China, existen pozos y jarras para la captación de agua de más de 2000 años de antigüedad. En Irán se encuentran los Abarbans que consisten en sistemas tradicionales locales de captación y almacenamiento de aguas de lluvia. En el siglo X A.C. en Oxkutzcab (Yucatán) los Mayas captaron y almacenaron el agua de lluvia en cisternas subterráneas impermeabilizadas con yeso denominados Chultuns. En Cerros, Belice (año 200 D.C.), existió infraestructura consistente en canales, diques y depósitos que les permitió disponer de agua en épocas secas. También en Edzná, Campeche existió un canal de 50 m de ancho y 1 m de profundidad para captar agua de lluvia y proveer agua para riego y consumo humano. Sin embargo, el mismo autor también anota que en los siglos XIX y XX se potenció el aprovechamiento del agua superficial a través de obras de captación y conducción para el abastecimiento de ciudades y riego, lo que desplazó sistemas locales de captación de agua de lluvia principalmente en regiones coloniales europeas tales como América y la India.

En tal sentido Berga (2008) indica que debido a la distribución geográfica y temporal del agua, el hombre se ha visto en la necesidad de almacenar agua desde hace más de 5000 años por medio de la construcción de presas. En la actualidad existen construidas 50,000

grandes presas con alturas mayores a los 15 m o con alturas entre 5 a 15 m pero con capacidad de embalse de 3 millones de m³. Además se estima que existen más de un millón de presas pequeñas construidas por lo que el volumen de embalse creado por las presas es de cerca de 7000 km³.

Por otro lado, la historia de la recarga de acuíferos, como método de almacenamiento de agua, se remonta hasta 3000 A.C. con la construcción de represas de control, tanques de percolación, tanques de almacenamiento en zonas áridas y semiáridas de la India (Chadha, citado por Gale 2005). Según Ballén, et. al. (2006) a principios del siglo XXI se vive un nuevo escenario, en el que el desarrollo de grandes poblaciones ejercen presión sobre el recurso hídrico lo que genera conflictos especialmente en épocas de escasez.

Ballén, et. al. (2006) también hacen una extensa presentación experiencias en diferentes países en la captación y almacenamiento de agua de lluvia realizada en diferentes países y que se han convertido en una solución de diversas problemáticas entre las que se encuentran el crecimiento poblacional, dificultad para abastecer poblaciones dispersas, la contaminación de aguas superficiales, las regiones afectas a sequías, limitación de recursos hídricos, nuevos desarrollos urbanos en los que se considera a la captación y almacenamiento de agua de lluvia como una solución. Dichos proyectos están asociados a la construcción de tanques o cisternas de almacenamiento de agua de diferentes materiales de construcción y tamaños.

En los últimos años se le ha dado especial importancia a la recarga artificial de acuíferos (RA) o gestión de la recarga artificial de acuíferos (GRA), como técnicas para el almacenamiento y recuperación de agua. En relación a esto Bouwer (2002) indica que la recarga y recuperación de agua en acuíferos han tenido éxito en el sur de Australia desde 1993, en donde se observa la expansión de ésta práctica con piedra caliza, roca fracturada y en acuíferos aluviales.

De acuerdo con Fernández (2006) existen experiencias en recarga de acuíferos en varios países industrializados, tales como Australia, Holanda, Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Alemania, República de Sudáfrica, etc. Por otro lado, reporta varios programas en desarrollo en países menos industrializados, tales como Nueva Zelanda, Tailandia, Taiwán, Kuwait, India, etc. El autor indica que ciudades como Dusseldorf y Budapest dependen en un 100% de las aguas de la recarga artificial y Berlín en un 75%. Las aguas de recarga derivadas de algún río representan un 45% del abastecimiento en Hungría, un 16% en Alemania, un 5% en Holanda, un 50% en Eslovaquia. Se han

probado distintos esquemas de recarga artificial desde 1870 en Dusseldorf (Alemania) y desde 1879 en Nigmejen (Holanda) (Grischek et al citados por Fernández, 2006).

En función del desarrollo histórico, se identifican diferentes métodos de almacenamiento de agua que en forma general pueden clasificarse como métodos de almacenamiento superficial y métodos de recarga de acuíferos (almacenamiento en acuíferos), ambos casos se pueden asociar con la captación de aguas superficiales o de aguas de lluvia.

3 Almacenamiento superficial del agua

3.1 Presas y embalses

Un embalse es una acumulación artificial de agua en un ambiente natural, es producto de una intervención humana con el objetivo de almacenar agua para fines de uso y/o consumo. Un embalse se genera con la construcción de un cierre (presa o dique) para interceptar un curso de agua, aunque también pueden aprovecharse depresiones naturales del terreno conduciendo agua por medio de canales, tuberías o túneles. El objetivo de los embalses es el de regular el recurso hídrico para transferir agua a épocas de mayor demanda y para garantizar así su disponibilidad en éstas épocas (Adler, 2006; Winter, et. al. 2002).

Adler (2006) también indica que en la mayoría de los casos la disponibilidad de aguas superficiales no es uniforme en todo el año por lo que el desfase entre la disponibilidad y la demanda se resuelve acumulando agua en épocas de abundancia para su uso en épocas de mayor consumo y disponibilidad. Cuando se aprovecha un río, sin posibilidades de guardar el agua, se toman sus caudales tal como se presentan en el ciclo natural, por lo que no existe garantía de lograr la satisfacción de necesidades o prestación de servicios en las épocas de mayor demanda.

El objetivo de almacenar agua en embalses es el utilizar el agua para su uso como agua potable, irrigación, generación de energía eléctrica, regulación de crecidas de ríos; además se pueden utilizar para la recreación y proveer de hábitat a la vida silvestre (Winter, et. al. 2002)

Según Adler (2006), en los embalses se observan pérdidas de agua que se dan por evaporación (especialmente en regiones áridas), por infiltración (en función de la geología del lugar), por infiltración a través de la pared y cimentación de la presa (lo que depende de los materiales de construcción y pérdidas de volumen útil por acumulación de sedimentos).

En la figura 1 se ilustra la distribución de los fines con los que se han construido las presas a nivel mundial:

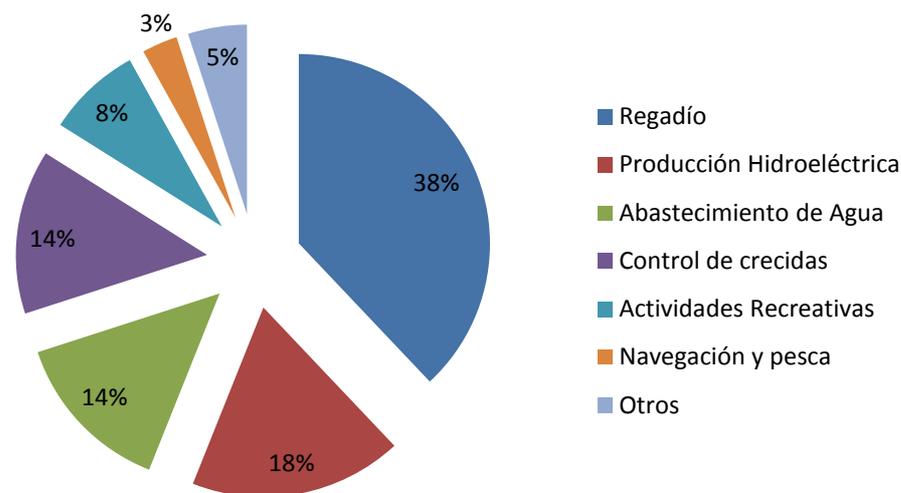


Figura 1. Distribución de fines para los que se han construido presas en el mundo.
Fuente: Berga (2008)

Adler también apunta que, de acuerdo al sitio y las condiciones en que funcione un embalse, se pueden presentar problemas como los siguientes: afectación a la calidad del agua por cambios de temperatura; elevación de los niveles freáticos, en especial en valles contiguos lo que puede llevar a un proceso de salinización de suelos fértiles; afectación del cauce aguas abajo por el arrastre de los sedimentos sin reposición de los mismos; riesgo aguas abajo por posibles colapsos; enfermedades de origen hídrico como la esquistosomiasis; afección a los peces por el cambio en el régimen del río y por la colocación la presa que funciona como una barrera física; contaminación del agua se agrava si el embalse recibe aguas contaminadas; transformación aguas abajo si se trata zonas que ya no sufren el problema de inundaciones se modifica la dinámica por la existencia de terrenos aprovechables. Aunque estos problemas no necesariamente se presentan todos ni en la misma intensidad, deben de preverse y evaluarse en las etapas iniciales.

Malinow (2010) agrega problemas originados por la construcción de grandes presas en aspectos sociales tales como desplazamientos, desarticulación comunitaria y pérdida de recursos comunales, afección a comunidades asentadas aguas abajo con pérdida de fertilidad y fauna acuática de importancia económica, cambios de régimen de caudales, pérdidas de patrimonio cultural. También anota otros efectos ambientales como: daños al ecosistema, hábitat y migración de especies, pérdida de biodiversidad modificación de ciclos naturales de inundación, contribución al cambio climático por descomposición de vegetación, algas y suelos inundados que emiten metano y anhídrido carbónico.

En contraposición, Burgueño (2002) interpreta los siguientes como efectos positivos de las presas: retención de sólidos provenientes de la erosión aguas arriba, aparición de nuevas especies en nuevos hábitats generados, regulación de nutrientes en suspensión que afectan a la piscicultura aguas abajo, mejora paisajística por un nuevo espejo de agua, efecto de regulación microclimático.

Según Stephens (2010) antes de construir cualquier presa, debe de hacerse un análisis de potencial de riesgo tomando en cuenta los aspectos que se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de riesgos en la proyección de construcción de presas.

Pérdidas de vida	Pérdidas económicas	Potencial de riesgo
Casi imposible	Insignificante	Ninguno
Extremadamente improbable	Mínimo	Muy bajo
Improbable	Marginal	Bajo
Posible	Apreciable	Moderado
Probable	Excesivo	Alto

Fuente: Stephens (2010).

Las presas valoradas con potencial de riesgo alto no deben ser construidas sin orientación profesional en el diseño y en la construcción. Por otro lado, las presas valoradas con riesgo moderado pueden necesitar modificaciones de diseño incluyendo el incremento de períodos de retorno de los caudales de diseño. Para todas las presas, a excepción de las que son valoradas con ningún potencial de riesgo, se debe contemplar la elaboración de un plan de acción de emergencia (Stephens, 2010).

Berga (2008) anota que de acuerdo con el material de construcción las presas se pueden clasificar en: presas de tierra, presas de escollera (mezcla de arcilla y rocas de diferente tamaño) y presas de mampostería o de concreto.

Las presas de tierra se pueden construir con materiales homogéneos o de la misma tierra cuando es lo suficientemente impermeable. Tanto las presas de tierra como las de escollera existen variantes de acuerdo al material impermeable y en ambos casos puede ser un núcleo impermeable, una pantalla de concreto aguas arriba o núcleo asfáltico.

Las presas de mampostería o de concreto poseen características de resistencia, impermeabilidad, requieren menos volumen de material y han evolucionado con el fin de reducir la cantidad de material para su construcción desde presas de gravedad, presas de contrafuertes, arco gravedad, arco y de bóveda.

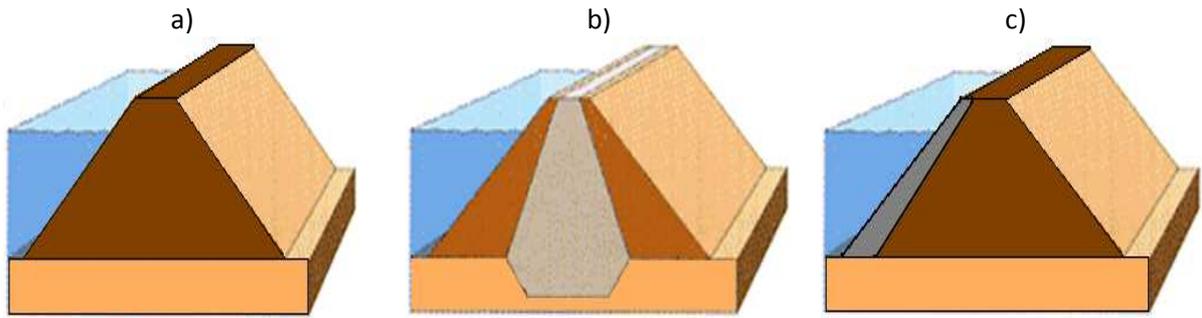


Figura 2. Presas de tierra y presas de escollera: a) presa de tierra (arcilla), b) Presa de tierra o de escollera con núcleo impermeable, c) presa de tierra o de escollera con pantalla impermeable.

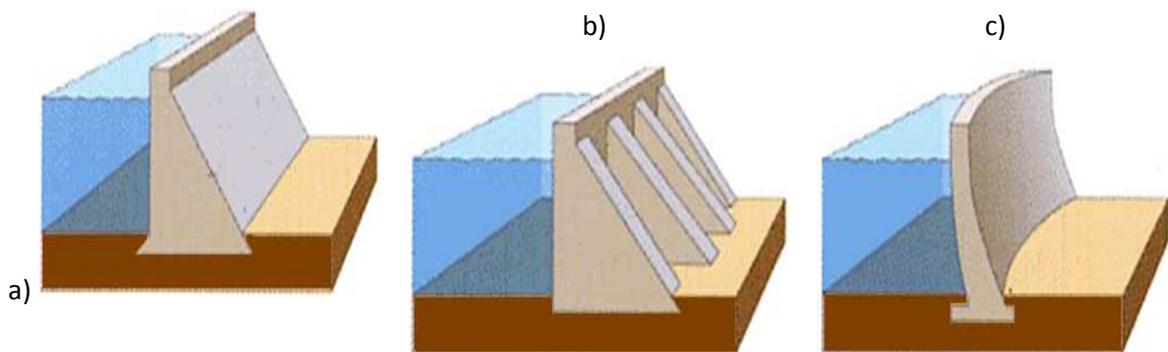


Figura 3. Presas de concreto: a) presa de gravedad, b) presa de contrafuertes, c) presa de bóveda.

En el desarrollo de un proyecto de construcción de presa y embalse es necesaria la realización de estudios hidrológicos, hidrogeológicos, topográficos, geológicos, tectónicos, económicos y de impacto ambiental.

3.2 Balsas

Segura y Sánchez (2008) apuntan que una balsa “es un elemento para almacenar agua, que no intercepta ningún curso de agua, normalmente de dimensiones modestas, creado generalmente por movimientos de tierra y alimentado de agua en forma artificial”.

La función de las balsas es almacenar y regular pero no captar agua, función que la diferencia de los embalses. Por otro lado los embalses se contruyen con la interceptación de un curso de agua, pero las balsas se construyen en el lugar en dónde se necesitan sin importar las condiciones geotécnicas del sitio y por lo mismo no están sujetas al tránsito de avenidas y, finalmente, los diques de las balsas se construyen con material excavado

para formar el vaso (Generalitat Valenciana, 2009). Esta técnica de almacenamiento es utilizada principalmente con fines de regadío (Segura y Sánchez, 2008).

De acuerdo con Generalitat Valenciana (2009) las balsas, en sus inicios, estaban limitadas por los materiales de construcción, que se reducían a arcillas y muros de mampostería. Esta condición restringía los lugares, por la viabilidad de utilizar arcilla y por el alto costo de la mampostería. Sin embargo posteriormente se contó con la impermeabilización por lámina, que mejoró las condiciones de almacenamiento, por lo que la balsa pasó a ser una excavación en cualquier terreno cuya capacidad se aumenta con la colocación de diques contruidos con material de excavación y se impermeabiliza con lámina plástica hasta de unos pocos milímetros de espesor.

Generalitat Valenciana también anota que las balsas pueden ser impermeabilizadas con: arcilla, láminas, asfalto y hormigón. En la actualidad predominan las impermeabilizadas con láminas, sin embargo para balsas con capacidades mayores d 1 Hm³ se recomienda el uso de asfalto si la cimentación lo permite.

El mismo autor continúa indicando que los estudios que deben realizarse previo a la construcción de una balsa son de carácter: hidrológicos (régimen de avenidas, tormentas, granizo), geológicos (caracterización geológica sobre: geología presente, permeabilidad, tectónica, sismicidad) orientados a determinar sobre la necesidad de impermeabilización y tipos más adecuados de impermeabilización, materiales disponibles y su influencia en la estabilidad de la estructura. Finalmente, lo estudios geotécnicos son orientados a conocer el comportamiento del terreno de cimentación y las características de los materiales a utilizar en la contrucción de los diques.

También hace mención que en el caso de las balsas, al igual que el caso de los embalses es necesario contar con un plan de emergencia que aminore los daños en caso de colapso de la balsa considerando que las mismas se construyen más cercanas a poblaciones que los embalses.



Figura 4. Vista de una balsa de Alicante, España. Fuente: Generalitat Valenciana (2009)

3.3 Tanques y cisternas

Ingeniería León S.A. (s.f.) define tanque como un depósito diseñado para almacenar o procesar fluidos a presión atmosférica o con presiones internas relativamente bajas.

Los tanques o reservorios de almacenamiento de agua pueden ser elevados, apoyados o enterrados. Los reservorios elevados regularmente toman formas esféricas, cilíndricas o de paralelepípedo y son colocados sobre torres, columnas o pilotes. Los reservorios apoyados se construyen directamente sobre la superficie del suelo y los enterrados son construidos bajo la superficie del suelo denominados también cisternas. Tanto los reservorios apoyados como los enterrados se construyen con base rectangular o con base circular (paralelepípedos o cilindros) (Agüero, 2008).

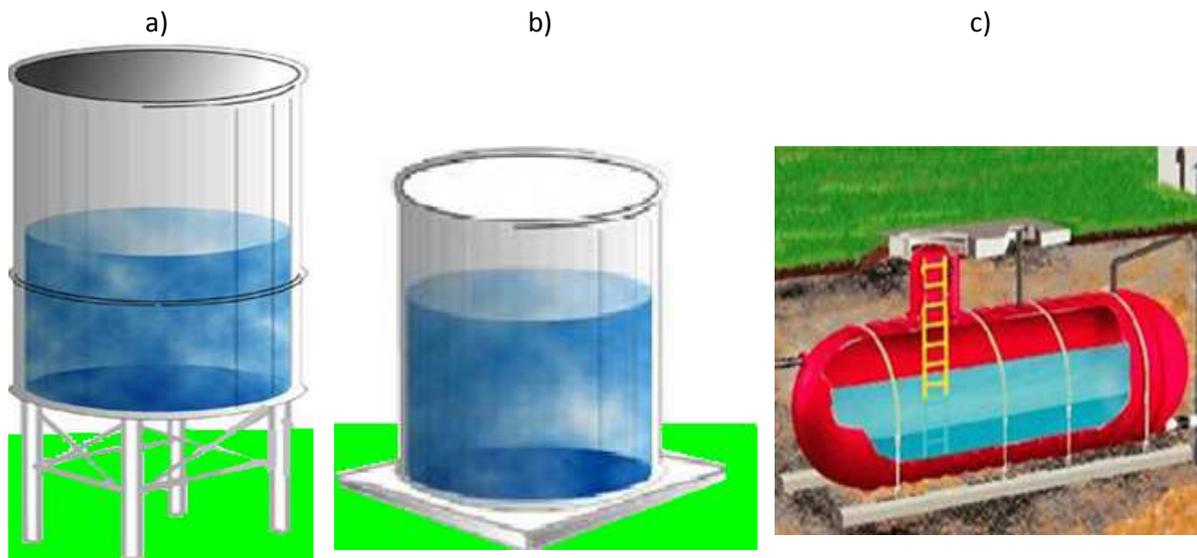


Figura 5. Tipos de tanques: a) elevados, b) apoyados, c) enterrado o cisterna. Fuente: Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca. (s.f.) y Prado (2012)

Pavón (2001) indica que en los depósitos superficiales es más sencillo efectuar la instalación, el mantenimiento, operación y mantenimiento de las tuberías de entrada y de salida, pero su construcción debe tomar en cuenta que el terreno sobre el que se instale tenga la capacidad de soportar las cargas que se le impongan.

El mismo autor continúa indicando que los depósitos enterrados se utilizan cuando es necesario cavar para encontrar un estrato de soporte más resistente y tienen la ventaja de resguardar el agua del cambio de temperaturas, no alteran el paisaje y su cubierta puede utilizarse para diversas funciones. En estos depósitos se dificulta la operación y el mantenimiento y las excavaciones pueden ser costosas.

Pavón también observa que la configuración más adecuada para un depósito es aquella que, para su altura y volumen, tenga un perímetro mínimo, lo que implica una forma cilíndrica, pero pueden existir otros factores que obliguen a una base rectangular o cuadrada. Por otro lado los depósitos destinados para el almacenamiento de agua para consumo humano, deben de ser cubiertos para resguardar el agua de la contaminación.

La ubicación de un reservorio o tanque debe tener en cuenta que además de servir como un recipiente de almacenamiento de agua puede servir para el mantenimiento de la presión de una red garantizando la disponibilidad y una presión mínima de servicio.

De acuerdo a la ubicación los tanques pueden ser de cabecera o flotantes. En el primer caso reciben directamente la captación y alimentan en forma directa a la población

pudiendo ser elevados, apoyados o subterráneos. En el segundo caso, el tanque funciona como regulador de presión, casi siempre son elevados y se caracterizan porque la entrada y salida del agua se realiza por el mismo tubo (Agüero, 2008).

Rodero (s.f.) identifica diferentes tipos de depósitos para almacenamiento de agua de acuerdo al material de construcción: de ladrillo, de mampostería, hormigón armado, de polietileno, de fibra de vidrio y metálicos. La altura del tanque en función del material es de: 2 m para ladrillo, 1.5 m para mampostería, 3 m para hormigón armado, polietileno de 1 m a 3 m con diferentes capacidades hasta 25,000 l, fibra de vidrio hasta de 2500 l, metálicos con una altura hasta de 4.2 m y hasta 4 millones de litros.

Sin embargo, la variedad en cuanto a materiales y técnicas de construcción se ponen de manifiesto al procurar el uso de recursos disponibles como el caso del tanque australiano, construido a partir de lámina galvanizada, malla metálica y polietileno. En el caso de Tailandia, el agua de lluvia se almacena en vasijas de arcilla con volúmenes entre 1000 a 3000 litros equipados con tapa, grifo y drenaje; capaces de abastecer de agua a familias de seis integrantes en la época de escasez. (Hidalgo, et. al., 2008; Ballen, 2006).

4 Almacenamiento subterráneo del agua

Bouwer (2002) indica que la recarga natural de acuíferos se da como parte del ciclo hidrológico y resulta de las diferencias entre las entradas de agua al suelo (precipitación, infiltración de cuerpos superficiales de agua) y las salidas (evapotranspiración y escorrentía).

El mismo autor anota que la recarga natural puede ser mejorada, inducida o accidental. La recarga mejorada se realiza por medio del manejo de la vegetación, privilegiando la vegetación que favorece la infiltración del agua en el suelo. La recarga inducida se realiza mediante la colocación de pozos cerca de arroyos que favorezcan la infiltración del agua hacia el acuífero utilizados principalmente cuando el agua de río está contaminada. La recarga incidental se da cuando se realizan actividades humanas cuyo fin no es la recarga del acuífero tales como: percolación profunda de campos irrigados, eliminación de aguas residuales por medio de tanque sépticos.

De acuerdo a Bouwer (2002) “la recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo donde se infiltra y alcanza el acuífero”.

Bouwer también indica que los objetivos de la recarga artificial de acuíferos pueden orientarse a almacenar agua, reducir la intrusión marina, mejorar la calidad del agua por medio del tratamiento suelo acuífero (geopurificación) utilizar los acuíferos como sistema de conducción de agua y para hacer acuíferos en dónde el agua subterránea se prefiere para el consumo humano sobre el agua superficial.

La recarga artificial de acuíferos permite almacenar agua proveniente de ríos, depuradoras, desaladoras, humedales, escorrentía de zonas urbanas, etc.; en los acuíferos para luego ser extraída para diferentes usos o para servir como barrera a la intrusión marina y contaminación (Fernández, 2006).

Casas et. al. (2011) reconocen limitaciones del uso de la recarga artificial de acuíferos tales como la existencia de formaciones geológicas aptas para recarga, disponibilidad de terrenos para aplicación de métodos de recarga superficiales, el control de la calidad del agua incrementa los costos, interacciones no deseadas con el medio receptor suelo acuífero, complejidad de dispositivos para la recarga directa.

Cuadro 2. Comparación entre el almacenamiento de agua en embalses y en acuíferos

Factor	Embalses	Acuífero
Evaporación	Pérdidas importantes	No hay pérdidas
Vectores de Enfermedades	Proliferación	En función del método de recarga
Costos	Alto costo de construcción	No se construyen estructuras de almacenamiento
Opinión Pública	Oposición	No visible o bien ocupa poco espacio superficial
Ecología	Interferencia con ecología del río	Interfiere con la dinámica del acuífero
Vida útil	Afectada por acumulación de sedimentos	Problemas de oclusión limita la filtración de agua
Período de almacenamiento	Corto Plazo	Largo Plazo
Tratamiento del agua para uso posterior	Necesario	Reducido por la geopurificación

Fuente: Bouwer (2002).

Fernández (2006) indica, además que el almacenamiento en acuíferos no necesita de terrenos inundables por lo que estos terrenos pueden utilizarse para otros usos, la recarga artificial puede realizarse en terrenos forestales para aprovecharse en las cuencas bajas para uso agrícola, no es necesaria la instalación de tuberías para la distribución, reduce el descenso del nivel freático por sobrebombeo, compensa la reducción de superficies de infiltración por construcciones, se puede utilizar como barrera ante la intrusión marina, previene problemas geotécnicos, combate a la desertización, cambio climático y erosión de suelos, mantenimiento de masas forestales y humedales.

Por otro lado Gale (2005) indica que los beneficios de la recarga de acuíferos entre otros son: almacenar agua para uso futuro, reducir fluctuaciones de abastecimiento/demanda, estabilizar los niveles de agua subterránea en dónde existe sobreexplotación, es aplicable cuando no hay un sitio adecuado para almacenamiento superficial de agua, reducen pérdidas por evaporación y escorrentía, control de la escorrentía y erosión del suelo mejora y reducción de las variaciones de la calidad del agua, mantenimiento de los caudales ecológicos de los ríos, gestión de la intrusión salina y subsidencia de tierra disposición de agua de tormenta y reutilización de aguas residuales.

El mismo autor continúa indicando que el origen del agua para recarga de acuíferos puede ser: de corrientes permanentes o intermitentes, canales, agua de inundación, embalses, tormentas urbanas, agua potable tratada, agua de lluvia recolectada, agua residual o reciclada.

Los métodos de recarga artificial surgen como una opción de almacenamiento de agua con la ventaja de presentar costos menores a otros métodos de almacenamiento de agua como se puede observar en la figura siguiente.

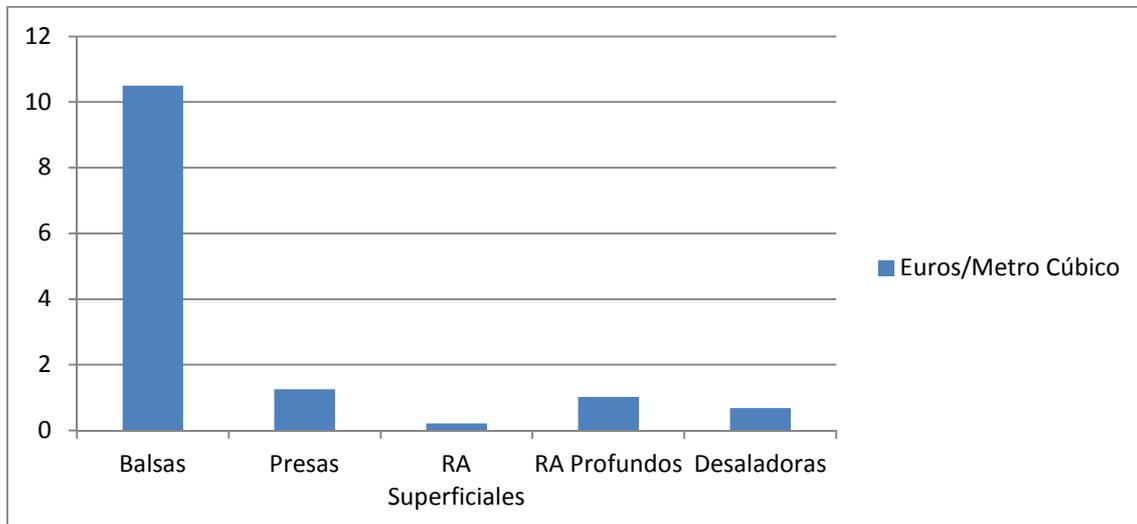


Figura 6. Comparación de costo del agua almacenada por método de almacenamiento en España. Fuente: Fernández (2006)

En la gráfica anterior se puede apreciar que el menor costo de almacenamiento de agua se le atribuyen a los métodos de recarga artificial superficiales, muy por debajo de los métodos de almacenamiento convencionales (presas y balsas).

4.1 Métodos de recarga artificial de acuíferos

Fernández (2006) indica que los métodos de recarga artificial pueden ser: pozos de infiltración, zanjas, embalses, diques, canales y sondeos de inyección. Según Bouwer (2002) los sistemas de superficie de infiltración para recarga artificial se dividen en sistemas con modificaciones dentro del canal y fuera del canal. Los sistemas dentro del canal consisten en presas colocadas en las corrientes efímeras o permanentes para detener el agua y extenderla con el fin de incrementar el tiempo y el área de infiltración. Los sistemas fuera del cauce consisten en construcciones especiales como lagunas, pozos de infiltración, riego de inundación, tubos perforados o cualquier otra instalación donde el agua se pone en contacto con el suelo fuera del cauce para su infiltración.

Por otro lado Gale (2005) clasifica los métodos en las siguientes categorías: métodos de distribución; modificaciones en el interior del canal; recarga con pozos, túneles y perforaciones; infiltración inducida y captación de agua de lluvia. Sin embargo, Fernández y San Sebastián (2012) agregan los sistemas de drenaje urbano sostenibles.

Los métodos superficiales de infiltración requieren suelos superficiales y permeables, libres de capas de arcilla, para obtener altas tasas de infiltración. Los acuíferos deben ser confinados y lo suficientemente transmisivos para acomodar el flujo lateral del agua infiltrada lejos de la zona de recarga. Además, los suelos, las zonas vadosas y los acuíferos deben estar libres de contaminantes indeseables ya que pueden ser transportados por el agua (Bouwer, 2002).

Casas et. al. (2011) especifican que los métodos superficiales de recarga se utilizan en acuíferos someros entre los que no exista capa impermeable entre la zona no saturada y el acuífero mientras que la recarga directa la recomiendan cuando el agua se desee llevar a acuíferos profundos, o cuando existan capas impermeables entre la zona no saturada y el acuífero.

Cuadro 3. Comparación de métodos superficiales contra métodos directos de recarga artificial.

Factor	Método de recarga artificial	
	Superficial	Subterráneo
Disponibilidad del terreno	Grande	Pequeño
Factores estéticos y ambientales	Pueden surgir proliferación de insectos, roedores, requieren cercas o vallas para protección contra animales y personas	Escasos
Permeabilidad del acuífero	Media a elevada	Variable, alternancia de niveles permeables e impermeables o niveles poco permeables en la zona no saturada y en el acuífero.
Construcción de instalaciones	Acondicionamiento previo del terreno. Estructuras para captación y para conducción de agua.	Instalaciones de inyección complicadas
Volumen recargable	Puede llegar a ser significativa	Inferior a métodos superficiales
Pérdidas por evaporación	Pueden llegar a ser altas	Inexistentes
Colmatación	Problemas moderados	Muy grandes, implican costos de mantenimiento

Fuente: Casas, et. al. (2011).

Los pozos de recarga directa se utilizan cuando los suelos tienen bajas tasas de infiltración o el área de tierra para infiltración no está disponible, las zonas vadosas no son adecuadas para zanjas o pozos y los acuíferos son profundos y/o confinados. Para estos casos el agua utilizada para inyección debe cumplir con las normativas de calidad de agua para consumo humano para minimizar la obturación del acuífero y para evitar su contaminación, principalmente si el acuífero es aprovechado por bombes para

abastecimiento de agua potable. Sin embargo, cuando el acuífero no es utilizado para extraer agua con fines de consumo humano, es posible utilizar agua de menor calidad siempre que la calidad del agua del acuífero sea menor (Bouwer, 2002).

Según Gale (2005) la gestión adecuada de acuíferos puede contribuir a: reducción de la pobreza, reducción de riesgo económico y de salud, incremento de cosechas por contar con riego seguro, incremento de ingresos económicos, equidad en la distribución del agua y reducción a la vulnerabilidad a eventos extremos de clima.

Continúa indicando que la gestión de la recarga de acuíferos en conjunto con la cosecha de agua de lluvia tiene potencial para contribuir a los objetivos de desarrollo del milenio de las Naciones Unidas en lo que concierne al abastecimiento de agua en comunidades pequeñas de zonas áridas y semiáridas.

4.1.1 Métodos de distribución o de dispersión

Estos métodos se aplican cuando el acuífero libre o semiconfinado a recargar se encuentra cerca de la superficie del suelo. La recarga se realiza por infiltración superficial. En estos métodos la superficie disponible para la filtración y la tasa de infiltración determinan el volumen de la recarga potencial (Gale, 2005).

4.1.1.1 Tratamiento suelo acuífero

Consiste en la filtración de aguas residuales previamente tratadas para aprovechar el tratamiento filtrante del suelo. Esto produce agua utilizable para fines diferentes a los de consumo humano como riego o recreativo. Sin embargo, también puede ser recuperada para consumo humano pero estará limitada por el contenido de carbono orgánico residual y deberá someterse a proceso de tratamiento de ósmosis inversa o filtración del carbono previo al proceso de tratamiento suelo acuífero (Gale, 2005)



Figura 7. Infiltración de agua residual luego de ser tratada en pozos de absorción o en campos de infiltración. Fuente: Rotoplast (s.f.)

4.1.1.2 Inundación controlada

Consiste en campos grandes limitados por bordes a los que se conduce agua para recarga desde fuentes como ríos para su inundación a una velocidad que no implique riesgo de erosión. Este método es muy efectivo, sin embargo, requiere de la disponibilidad de grandes superficies (Gale, 2005).

Esta es una técnica útil en dónde la hidrogeología es favorable para la recarga de acuíferos libres por el almacenamiento de excedentes de agua de ríos o canales. El agua almacenada puede ser bombeada en épocas secas para proporcionar riego en áreas adyacentes (Ray, 2002).

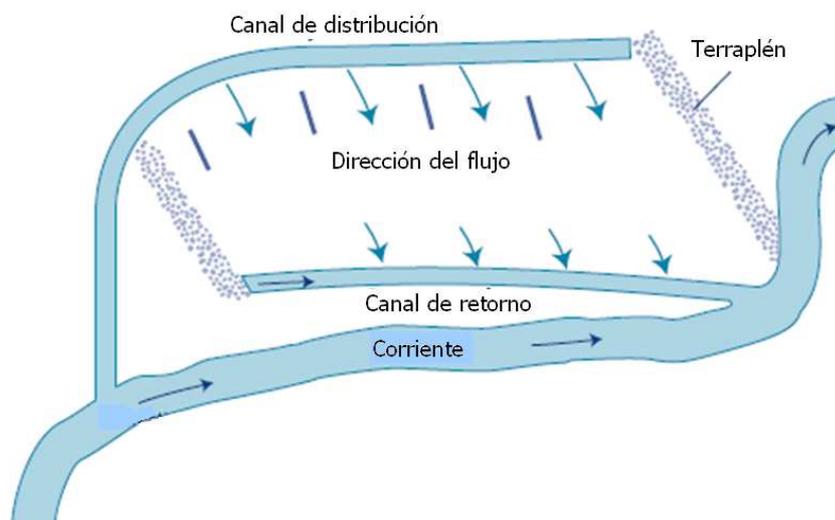


Figura 8. Recarga de acuífero por inundación controlada. Fuente: Ray (2002)

4.1.1.3 Recarga incidental por riego

El excedente de agua de riego puede causar problemas de salinización y saturación, sin embargo este problema puede convertirse en oportunidad al gestionar las aguas excedentes y utilizarlas para la recarga artificial. En la actualidad existen métodos de riego cuya eficiencia de aplicación alcanzan el 60% o menos, lo que indica que el resto del agua se pierde ya sea por percolación profunda que funciona como un método de recarga y por escorrentía que constituye agua susceptible de utilizar para recarga artificial (Gale, 2005).

El riego en exceso, cuando el agua superficial está disponible, junto a la existencia de redes de canales sin revestir contribuyen significativamente a la recarga no intencionada en muchas áreas (Ray, 2002).



Figura 9. Recarga incidental por riego. Fuente: Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca. (s.f.)

4.1.1.4 Estanques de infiltración o recarga

De acuerdo con Gale (2005), son excavaciones en el suelo o depresiones de tierra en la que se retiene agua para hasta lograr su percolación. La depresión no debe ser muy profunda para que permita su rápido drenaje para limpieza y restauración de las tasas de infiltración.

Según Ray (2002), se requiere de un área de terreno muy permeable para hacer que la escorrentía superficial se filtre hacia el acuífero y lograr así la recarga y almacenamiento de agua por lo que se prefiere que el lecho del tanque sea arenoso con el fin de reducir el peligro de la colmatación

Ray también indica que para un buen funcionamiento del tanque de infiltración las condiciones hidrogeológicas deben ser favorables con la existencia de roca fracturada, con buena permeabilidad. Por otro lado debe asegurarse la disponibilidad de agua que garantice el llenado del tanque en cada temporada.

Debido a que el principal problema lo constituyen los sedimentos que se depositan en el fondo, el manejo para mantener las tasas de infiltración debe considerar períodos de secado para eliminar caspas microbianas y raspado para eliminar los sedimentos, también puede hacerse un pretratamiento al agua de recarga por medio de sedimentación y cloración, arado del suelo para mejorar las tasas de infiltración y/o aplicar una capa de arena en el fondo del estanque como filtro para reducir la oclusión (Gale, 2005).

El tamaño del tanque está regido por la velocidad de infiltración de los estratos de la cama del mismo, pero normalmente se diseñan para una capacidad de almacenamiento de 200,000 a 600,000 m³ con profundidades de agua de 3 a no más de 6 m (Ray, 2002).

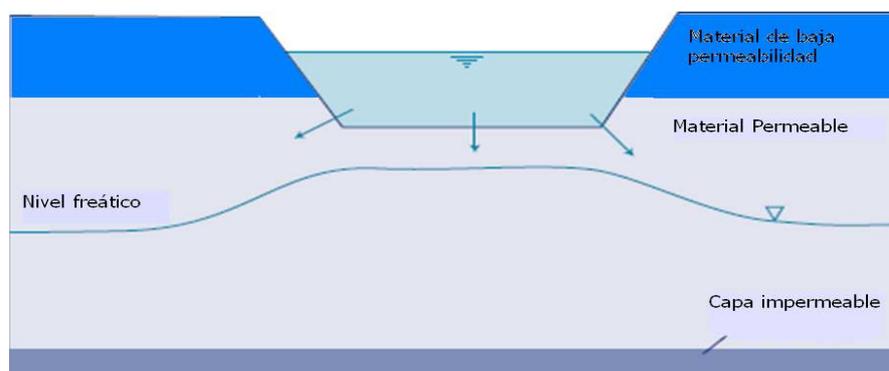


Figura 10. Estanque de infiltración. Fuente: Ray (2002)

4.1.1.5 Zanjas o Canales de Infiltración

De acuerdo con Bouwer (2002), cuando existen suelos superficiales impermeables, pero es posible encontrar capas permeables a profundidades cercanas a 2.5 m, las zanjas de infiltración pueden ser una opción más efectiva. Las zanjas pueden rellenarse con arena gruesa o con grava fina para evitar la luz solar, intervención de animales o de personas y para hacer la trinchera invisible.

Gale (2005) afirma que las zanjas se utilizan para la recarga de acuíferos superficiales en zonas en las que las capas superficiales tienen baja permeabilidad.

Las zanjas pueden tener dimensiones de 1 m de ancho por 5 m de profundidad rellenas con arena y grava fina, se contruyen procurando máxima área lateral y minimizando al área del fondo. El tamaño y distancia entre zanjas están en función de la permeabilidad del suelo (Bouwer, 2002; Ray, 2002; Gale 2005)

La tasa de recarga que se obtiene en las zanjas de infiltración se puede estimar de la siguiente manera (Bouwer, 2002):

$$Q = 0.20 \frac{2\pi K L_z^2}{\ln\left(\frac{2L_z}{A/2}\right) - 1}$$

En dónde Q = tasa de recarga por metro de zanja, K = conductividad hidráulica, L_z = profundidad del agua dentro de la zanja A = ancho de la zanja.

Según Gale (2005), las zanjas son costosas de contruir y recargan poca agua por lo que es mejor aprovechar aquellos lugares en los que ya existen excavaciones pero de acuerdo a Ray (2002) ésta técnica es menos sensible a la sedimentación.

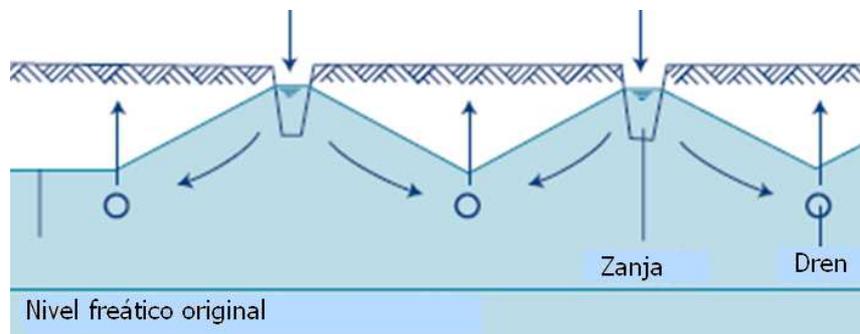


Figura 11. Canales o zanjas de infiltración. Fuente: Ray (2002)

En general se pueden considerar tres patrones de trazado de zanjas: lateral, en contorno y dendrítico. El patrón lateral consiste en el trazo de zanjas en ángulo recto con respecto al canal de derivación y al canal de retorno, la velocidad del flujo se controla por medio de compuertas y la profundidad de la zanja está determinada por la topografía. En el patrón de contorno las zanjas se trazan siguiendo el contorno de la superficie con una pendiente segura (no erosiva) y con una trayectoria serpenteante para lograr el máximo de retención de agua. El patrón dendrítico el agua se desvía a un canal principal y varios canales pequeños ramificados que se continúan hasta infiltrar toda el agua (Ray, 2002).

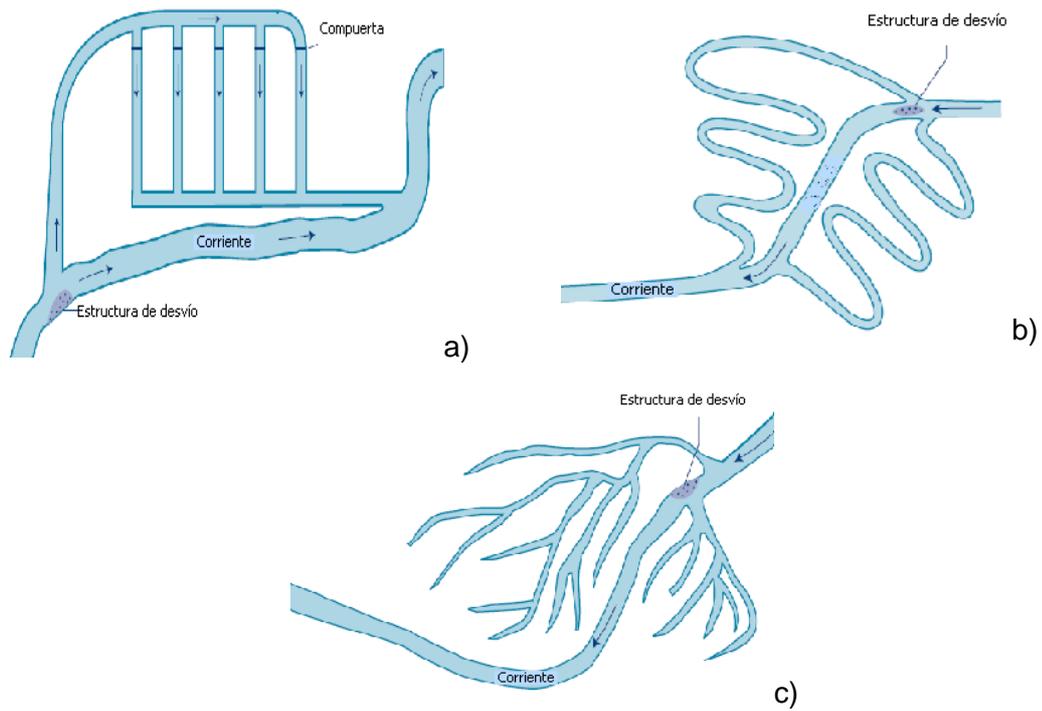


Figura 12. Patrones de trazo de canales o zanjas de infiltración: a) paralelo, b) dendrítico, c) en contorno. Fuente: Ray (2002)

4.1.2 Modificaciones en el interior del canal

Estos métodos consisten en la aplicación de intervenciones en el cauce de corrientes permanentes, intermitentes o efímeras para favorecer la percolación de agua hacia los acuíferos.

4.1.2.1 Represas de retención

Los represas o diques de contención son una variante de las grandes presas y se construyen en forma transversal a las corrientes de los ríos con el fin de contener y canalizar la escorrentía superficial lo que favorece la infiltración del agua retenida hacia el subsuelo (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008).

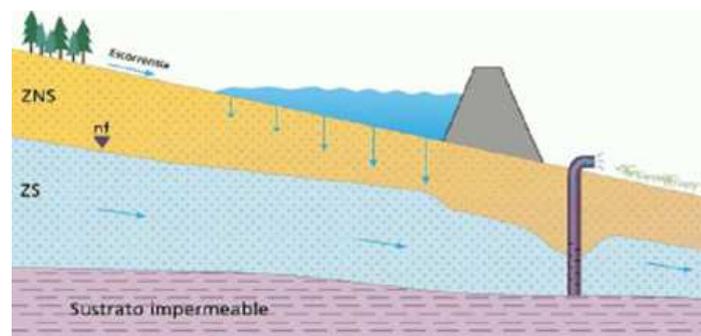


Figura 13. Represa o dique de contención. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino (2008) y Fernández y San Sebastián (2012).

4.1.2.2 Represas de arena

Este tipo de estructura se recomienda para terrenos ondulados de clima árido, especialmente para contener la escorrentía repentina. Se construyen sobre el cauce de corrientes intermitentes de ríos arenosos, como resultado se evitan inundaciones repentinas. Luego de cada evento de inundación, las arenas se asientan en el fondo del cauce y con ello se va elevando la pared de la represa. Con el tiempo se forma un acuífero artificial favoreciendo el almacenamiento en lugar de la escorrentía (Gale, 2005).

El proceso de llenado de la presa de arena puede llevar mucho tiempo y está en función del transporte de sedimentos por las corrientes de agua por lo que la presa se construye por etapas para evitar la retención de sedimentos finos y favorecer la sedimentación de rocas y arenas. En la etapa inicial se puede considerar una altura de 1.50 m con el aumento de 0.50 a 1 m de altura cada año (Ray, 2002).

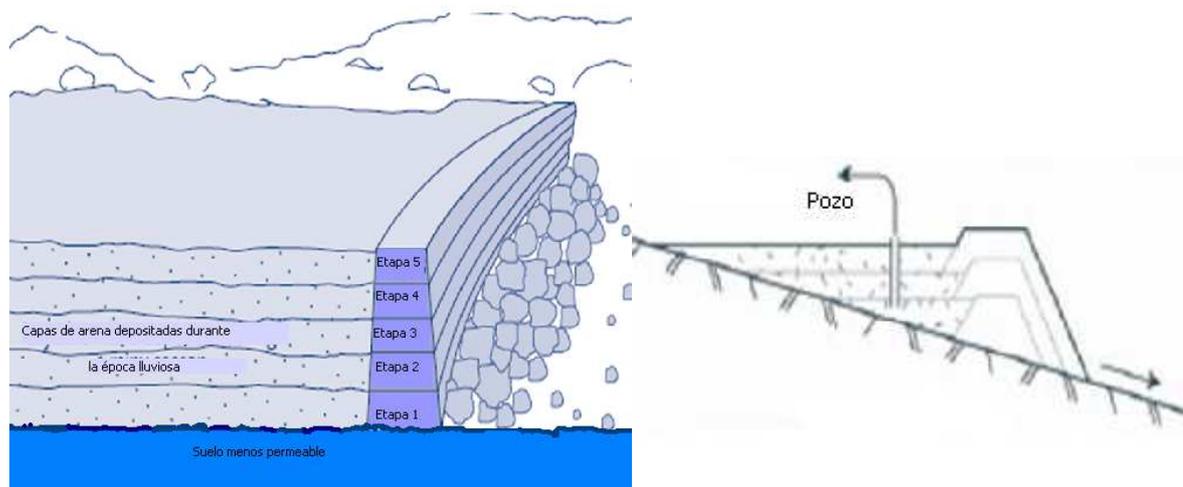


Figura 14. Represas de arena. Fuente: Ray (2002) y Gale (2005).

Según Ray (2002), el almacenamiento del agua en los poros de la arena reduce las pérdidas por evaporación, pero la ubicación de la presa es importante ya que se requiere un lecho impermeable para evitar las pérdidas por percolación.

El mismo autor también indica que la protección de la estructura es importante por lo que la base debe ser firme y los anclajes en las orillas deben ser reforzados así como la inclusión de un aliviadero que la proteja de la erosión.

El agua se retira por medio de un pozo o por medio de tubos en la que el agua no necesita ser tratada pues el sedimento funciona como filtro.

4.1.2.3 Represas subsuperficiales

Se usan para retener el agua de acuíferos aluviales y consiste en la construcción de una zanja perpendicular al cauce de corrientes intermitentes en los que la roca de basamento restringen el caudal. Esta zanja se rellena con material impermeable (arcilla o mampostería), inmersa en la roca de basamento (Gale, 2005).

Cuando se construye una presa de arcilla, se debe iniciar inmediatamente después de la época de lluvia y debe tenerse especial cuidado en su compactación. La fundación de este tipo de presa debe hacerse desde una base sólida y resistente al agua; debe extenderse lo suficiente hacia los lados para evitar las filtraciones laterales y el ancho recomendado es de dos metros como mínimo. Se recomienda ubicarla en dónde el lecho del río es mas estrecho así como la protección de la parte superior contra la erosión que pueda provocar la corriente (Ray, 2002).

A diferencia de las presas de arcilla, el ancho recomendado para las presas de mampostería es de 0.50 m con localización de roca impermeable a no más de 5 m debajo del lecho del río y debe ser protegida aguas abajo contra la erosión provocada por las corrientes (Ray, 2002)

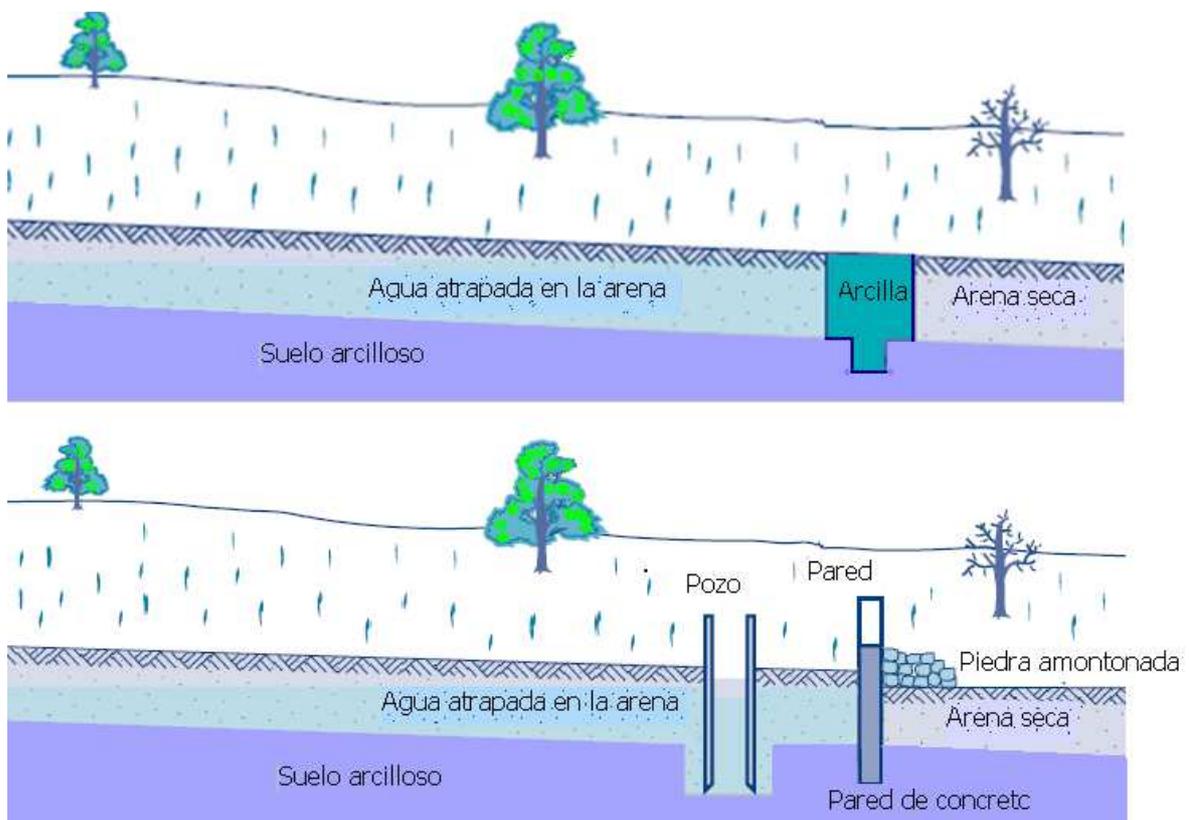


Figura 15. Presas subsuperficiales. Fuente: Ray (2002)

4.1.2.4 Represas perforadas

Son represas construidas en los cauces de los ríos intermitentes lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos del agua, la que posteriormente se elimina por medio de cañerías aguas abajo en dónde puede ocurrir la recarga artificial (Gale, 2005).

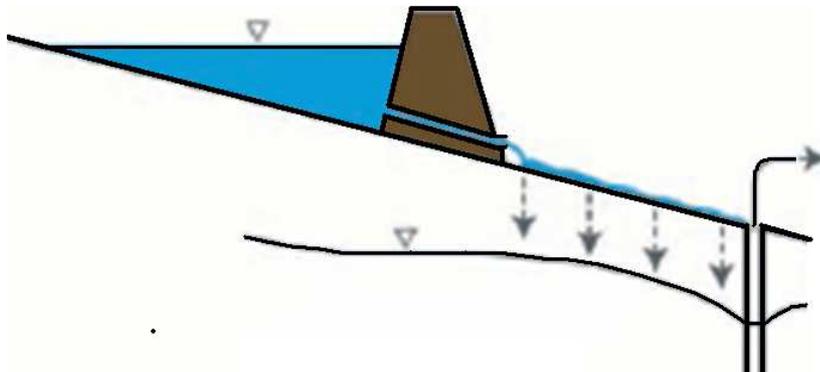


Figura 16. Represa perforada. Fuente: Gale (2005)

4.1.2.5 Serpenteos

Los serpenteos son dispositivos en T o en L que se instalan en los ríos para reducir su velocidad y favorecer la infiltración del agua (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008; Fernández y San Sebastián, 2012).

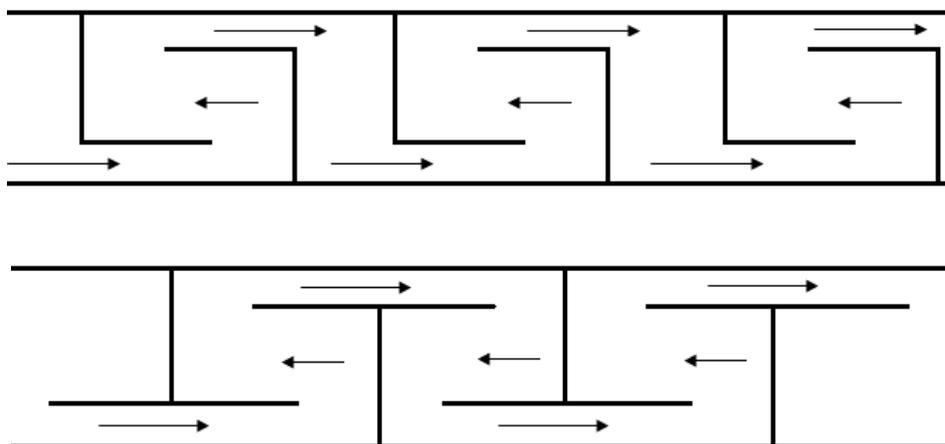


Figura 17. Serpenteos contruidos en el cauce de un canal. Fuente: Bouwer (2002).

4.1.2.6 Escarificación del lecho

La escarificación del lecho consiste en el tratamiento mecánico del lecho del río, como aradura, raspado, etc; con el fin de eliminar la capas de baja permeabilidad formadas por el proceso de colmatación por la sedimentación de las partículas en suspensión trasportadas por la corriente para aumentar la infiltración natural y favorecer la recarga

del acuífero (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008; Fernández y San Sebastián, 2012).

4.1.3 Pozos, túneles y perforaciones

4.1.3.1 Pozos abiertos de infiltración y pozos profundos

Los pozos abiertos de infiltración y los pozos profundos se utilizan cuando las capas superficiales son de baja permeabilidad. Los pozos abiertos de infiltración alcanzan de 5 a 15 m de profundidad (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008; Fernández y San Sebastián, 2012).

De acuerdo con Gale (2005) los pozos al igual que las zanjas se utilizan para la recarga de acuíferos superficiales en zonas en las que las capas superficiales tienen baja permeabilidad. Para este tipo de aprovechamiento se requiere limpiar el agua de los sólidos en suspensión para reducir los problemas de obstrucción.

Los pozos secos o de recarga son perforaciones de 1 a 2 m de diámetro por 10 a 50 m de profundidad rellenos con grava y arena con tubos perforados en el centro, donde el agua se suministra a través de tubos más pequeños insertos dentro del tubo perforado por debajo del nivel del agua y con un orificio pequeño o válvula al final del tubo para evitar la caída libre y regular el flujo

Bouwer (2002), indica que para capas profundas de restricción (3 a 40 m) se pueden utilizar pozos mientras que los pozos de inyección directa se utilizan cuando las capas que restringen el acuífero se encuentran fuera del alcance de los pozos convencionales.

Según Gale (2005), los pozos se contruyen procurando una máxima área lateral en y minimizando al área del fondo.

El problema principal de los pozos secos o de recarga es la obstrucción de sus paredes y la imposibilidad de remediarlo con técnicas como bombeo y limpieza, por lo que se debe prevenir o minimizar la obstrucción mediante el uso de agua de buena calidad libre de sólidos en suspensión, carbono orgánico asimilable, nutrientes y microorganismos. El tratamiento que puede aplicarse para tratar las obstrucciones es el de períodos de secado, limpieza mecánica y lavado a presión, lo que permitiría otros períodos de recarga aunque a tasas menores de infiltración (Bouwer, 2002; Gale, 2005)

La tasa de recarga en los pozos secos se puede calcular con la siguiente ecuación (Bouwer, 2002)

$$Q = \frac{2\pi K L_w^2}{\ln\left(\frac{2L_w}{R_w}\right) - 1} \quad \text{para } L_w \geq 10 R_w$$

En dónde Q = tasa de recarga, K = conductividad hidráulica, L_w = profundidad del agua dentro del pozo, R_w = radio del pozo.

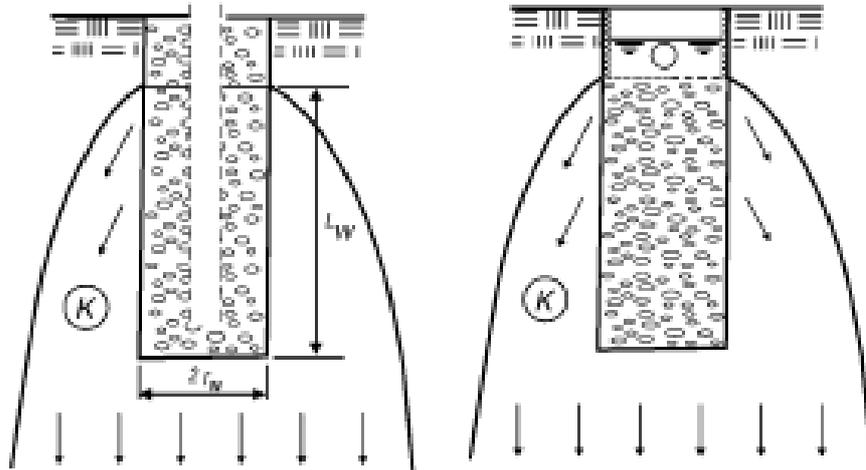


Figura 18. Pozos de infiltración. Fuente: Bouwer (2002)

Construir pozos para recarga de acuíferos, es costoso, por lo que se recomienda el aprovechamiento de pozos ya existentes (Gale, 2005).

4.1.3.2 Galerías subterráneas

El sistema qanats o galerías subterráneas fue inventado en Irán hace miles de años, debido a su sencillez y eficacia fue adoptado en otras regiones del Oriente Medio y en todo el Mediterráneo. En éste sistema de galerías el agua que fluye por el interior se mueve por gravedad, sin necesidad de equipos de bombeo para su transporte y extracción. El sistema consta de un túnel principal, a lo largo del cual se excavan una serie de pozos que proporcionan ventilación y acceso para reparaciones así como para eliminación de material de excavación. Los pozos de ventilación y acceso, eventualmente funcionan para la recarga de acuíferos al captar agua de lluvia (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008; Fernández y San Sebastián, 2012).

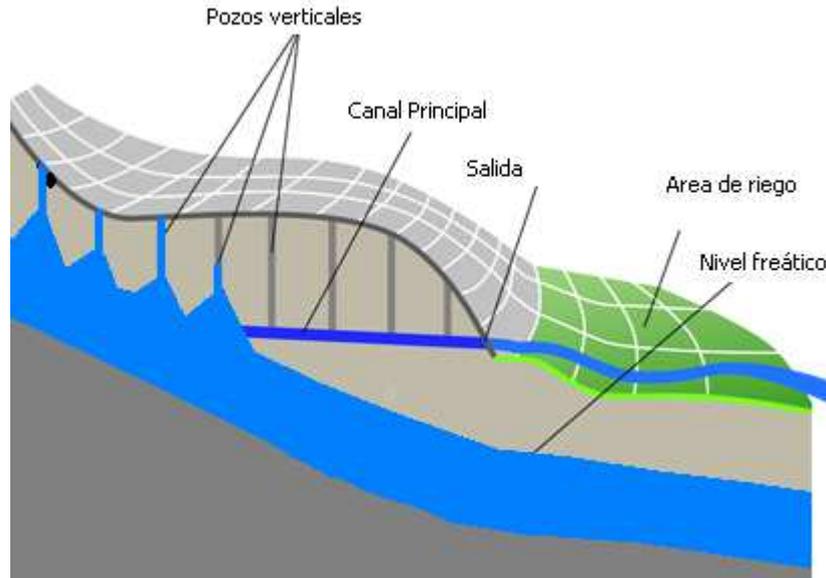


Figura 19. Galerías subterráneas (qanats)

4.1.3.3 Sondeo, almacenamiento en acuífero con recuperación (AAR) y almacenamiento en acuífero, transporte y recuperación (AATR)

En los sondeos, RAA y AATR, el agua es inyectada en el acuífero mediante bombas u otro dispositivo. Estas técnicas se utilizan cuando se tiene un estrato superior grueso y de baja permeabilidad y la recarga de agua es directa hacia el interior del acuífero por lo que se requiere de agua de alta calidad (Gale, 2005).

En el caso de los sondeos el agua inyectada en el acuífero fluye siguiendo el gradiente hidráulico de la zona hasta ser recuperado en lagunas, ríos, manantiales, y otras fuentes superficiales, aumentando el volumen de los mismos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008; Fernández y San Sebastián, 2012).

En la técnica de almacenamiento en acuífero con recuperación (AAR), el agua es inyectada y recuperada a través de una sola perforación (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008).

El agua, también, puede ser inyectada desde una perforación y recuperada en otra para favorecerse del tratamiento del acuífero (AATR) y el proceso de inyección se realiza mediante una válvula que asegure el mantenimiento de una columna continua de agua hasta la superficie (Gale, 2005).

Según Bouwer (2002) es una práctica nueva y en expansión, que combina la recarga y el bombeo de pozos. La recarga se efectúa cuando existen excedentes de agua y el bombeo cuando el agua es necesaria para satisfacer necesidades de uso.

Bouwer también anota que el uso de acuíferos de recarga y recuperación, es a menudo más barato que el uso de plantas de tratamiento y embalses superficiales diseñados sobre la base de la demanda pico. Estos han sido utilizados en lugares en donde existe demanda de aguas subterráneas pero la misma se agota en épocas secas.

Las ventajas que se aprecian de la recarga y recuperación son: almacenamiento para absorber las diferencias estacionales o de largo plazo entre la oferta de efluentes y la demanda de agua regenerada, la mejora de la calidad del agua por geopurificación, economía favorable, beneficios estéticos y una mejor aceptación pública (Crook, et al, citado por Bouwer, 2002).

Los principales problemas en esta técnica lo constituyen: la acumulación de sedimentos, la precipitación química y el crecimiento microbiano, por lo que el tratamiento del agua con filtración, floculación y desinfección pueden ser necesario. Para pozos obstruidos es recomendable el bombeo, oleadas de agua para remover partículas finas y crecimiento bacteriano y el uso de humectantes en el caso de pozos obstruidos con aire (Gale, 2005).

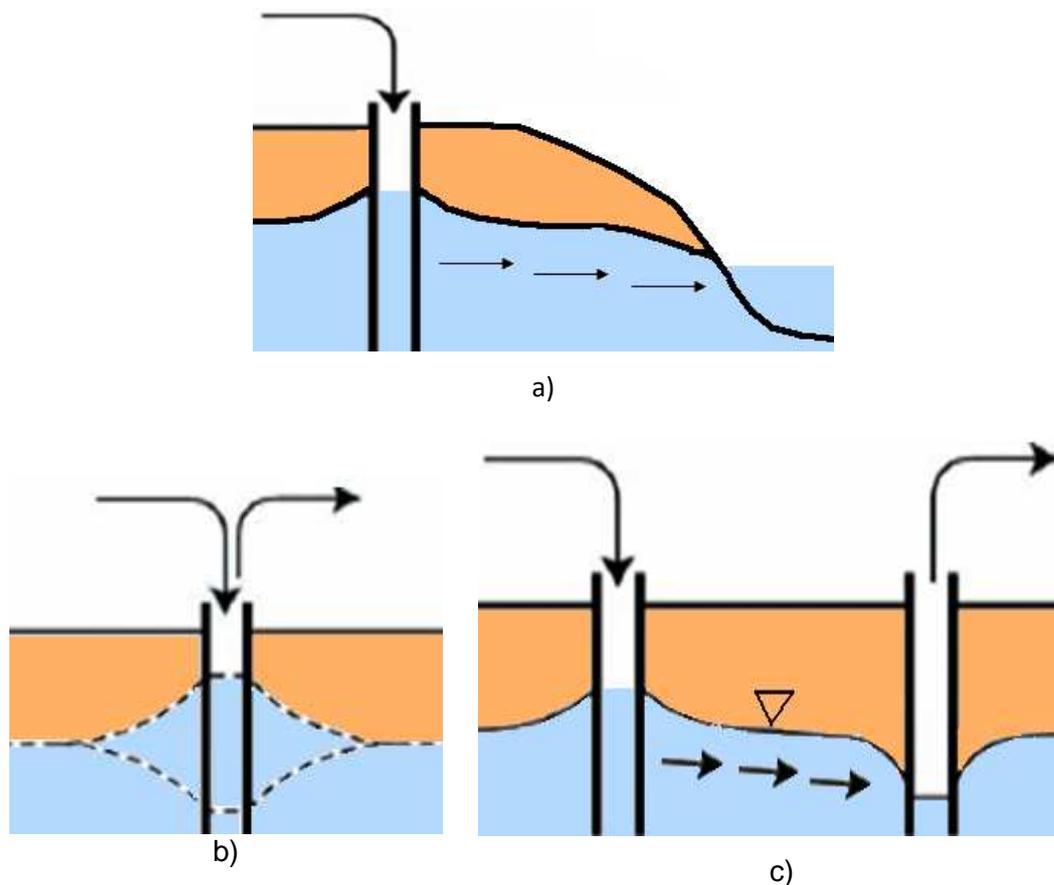


Figura 20. Inyección directa a) Sondeo, b) Almacenamiento en Acuífero y Recuperación, c) Almacenamiento en Acuífero transporte y recuperación. Fuente: Gale (2005)

4.1.3.4 Dolinas o colapsos

El Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino (2008) apunta que las dolinas son depresiones cerradas de origen kárstico que concentran el agua de lluvia que fluye por la superficie permitiendo su infiltración hacia las partes más profundas del karst. Suelen estar conectadas con un sistema kárstico que funciona como almacén del agua de recarga.

El agua de recarga es conducida desde la fuente, que puede ser un río, canal, laguna, etc., hasta la dolina o colapso en la que es introducida al acuífero. En éste método de recarga se debe considerar, especialmente, la calidad del agua de recarga, para evitar posibles reacciones químicas en su interacción con la matriz del acuífero.

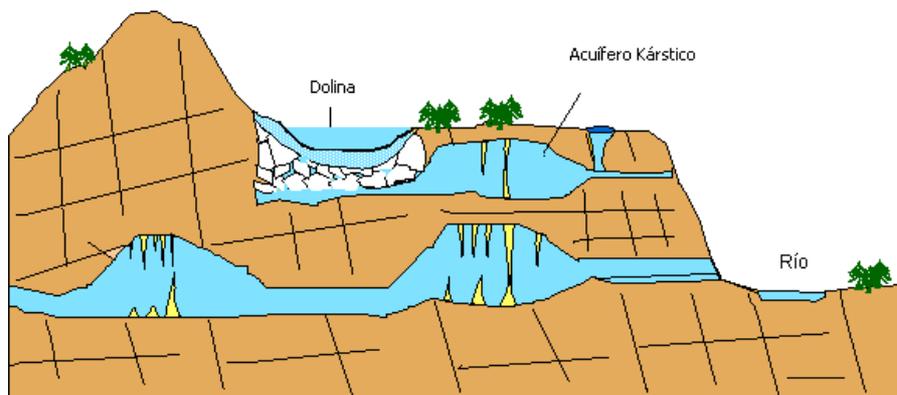


Figura 21. Recarga de acuífero kárstico por medio de una dolina o colapso. Fuente: Sánchez (s.f.)

4.1.4 Infiltración inducida

4.1.4.1 Filtración a las márgenes de los ríos

Consiste en excavar pozos o galerías en las márgenes de los ríos con el fin de bombear y succionar agua del acuífero, lo que hace que el agua del río fluya hacia el bombeo. Para que exista un efectivo tratamiento del agua por el filtrado del suelo se necesita que la misma recorra entre 30 a 60 días por lo que la distancia que recorra el agua debe asegurar esto (Gale, 2005).

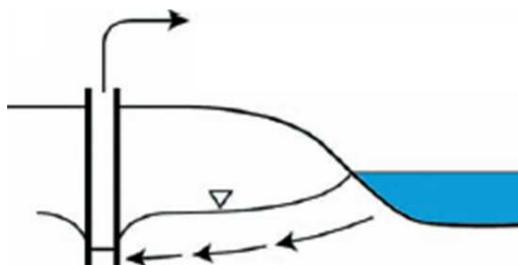


Figura 22. Filtración a las márgenes de los ríos. Fuente: Gale (2005)

4.1.4.2 Filtración interdunar

Este método es utilizado en zonas costeras y consiste en la inundación con agua de río de un valle de arena, el agua se filtra entre los sedimentos y la arena y crea un volumen de recarga aprovechable. Las dunas de arena sirven como filtro para el surgimiento del agua de mejor calidad en un valle adyacente (Gale, 2005).

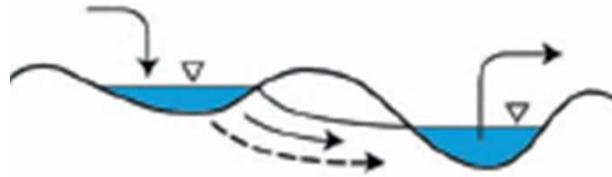


Figura 23. Filtración interdunar. Fuente: Gale (2005)

4.1.4.3 Riego subterráneo

El riego subterráneo consiste en la aplicación de agua en zonas profundas con lo que se pretende conseguir la creación de franjas húmedas a la profundidad deseada, o la creación de niveles freáticos artificiales (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008).

4.1.5 Sistemas urbanos de drenaje

4.1.5.1 Recarga accidental en conducciones y alcantarillado

La recarga accidental de acuíferos ocurre cuando existen fugas en los sistemas tradicionales de conducciones y alcantarillado. Todo sistema de conducción tiene fugas, que pueden representar más de un 50% del agua en pérdidas. Esto generalmente se percibe solamente como algo negativo puesto que se necesita extraer más agua de la necesaria para suplir a la población, o bien, hay parte de la población que no recibe el recurso debido a dichas pérdidas. Sin embargo, en centros urbanos en donde se ha permeabilizado gran parte de la superficie, es probable que las fugas sean una de las únicas fuentes de recarga para los acuíferos locales. Esto es de gran importancia particularmente en aquellos lugares en donde la extracción de agua de pozos es utilizada para abastecer a parte de la población. Esta recarga artificial es negativa en términos económicos, especialmente si el agua del sistema es tratada puesto que los costos de tratamiento son elevados.

4.1.5.2 Sistemas urbanos de drenaje sostenible

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se encuentran dentro de las nuevas estrategias destinadas a mejorar el funcionamiento y desarrollo urbano sostenible de las ciudades. El crecimiento urbano sin control ha generado un incremento de las superficies impermeables, lo que genera y agrava los problemas relacionados con el drenaje y la gestión del agua pluvial, así como una reducción en la recarga de acuíferos (Rodríguez, s.f.).

Entre los objetivos de este tipo de sistemas están: contribuir a la restauración del ciclo natural del agua, recuperar el mayor volumen de agua de lluvia, controlar las inundaciones y la reducir los sólidos en suspensión y demás contaminantes presentes en el agua de escorrentía (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2008; Perales y Domenech, s.f.; Rodríguez, s.f.).

Rodríguez (s.f.) apunta que el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción integra los sistemas urbanos de drenaje sostenible en la siguiente clasificación:

Medidas preventivas: legislación, educación y programación económica.

Sistemas de infiltración o control en origen: superficies permeables, pozos y zanjas de infiltración, depósitos de infiltración.

Sistemas de transporte permeable: drenes filtrantes o drenes franceses, cunetas verdes, franjas filtrantes.

Sistemas de tratamiento pasivo: depósitos de detención, estanques de retención, humedales artificiales.

4.1.6 Captación de agua de lluvia

4.1.6.1 Cultivo en tierra áridas

Todas aquellas prácticas de cultivo orientadas a la reducción de la escorrentía y la evaporación y a favorecer la infiltración, tales como: cultivos en contorno, bancales, barreras vivas, barreras muertas, acequias, inundación de áreas de cultivo se consideran prácticas de cultivo que contribuyen a la recarga de acuíferos (Gale, 2005).

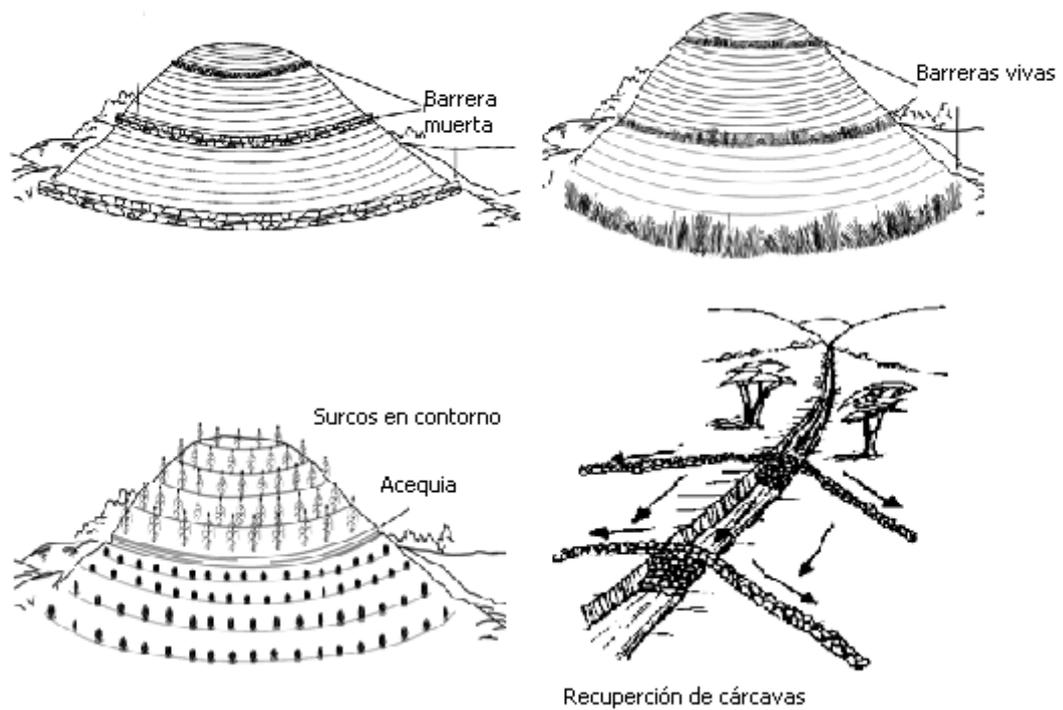


Figura 24. Prácticas de conservación de suelo y agua.

4.1.6.2 Captación en los techos

Consiste en capturar el agua de lluvia que cae en los techos por medio de canales y depósitos con el fin de consumo directo (uso de tanque de almacenamiento) o de recarga artificial de acuíferos (uso de estructuras de recarga). Las fuentes de contaminación de ésta técnica lo constituyen insectos, deposiciones aéreas, las excretas de aves y de otros animales. Esta práctica reduce la cantidad de agua de escorrentía de tormenta y las inundaciones asociadas (Gale, 2005).

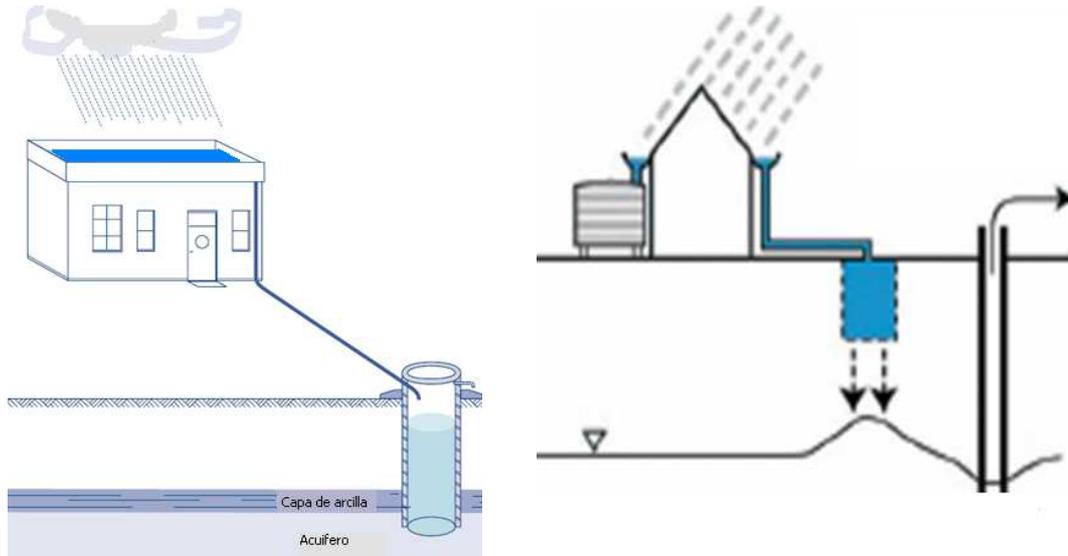


Figura 25. Captación en techos de agua de lluvia. Fuente: Ray (2002) y Gale (2005).

En la figura siguiente se aprecia la aplicación de diferentes métodos de recarga de acuíferos:

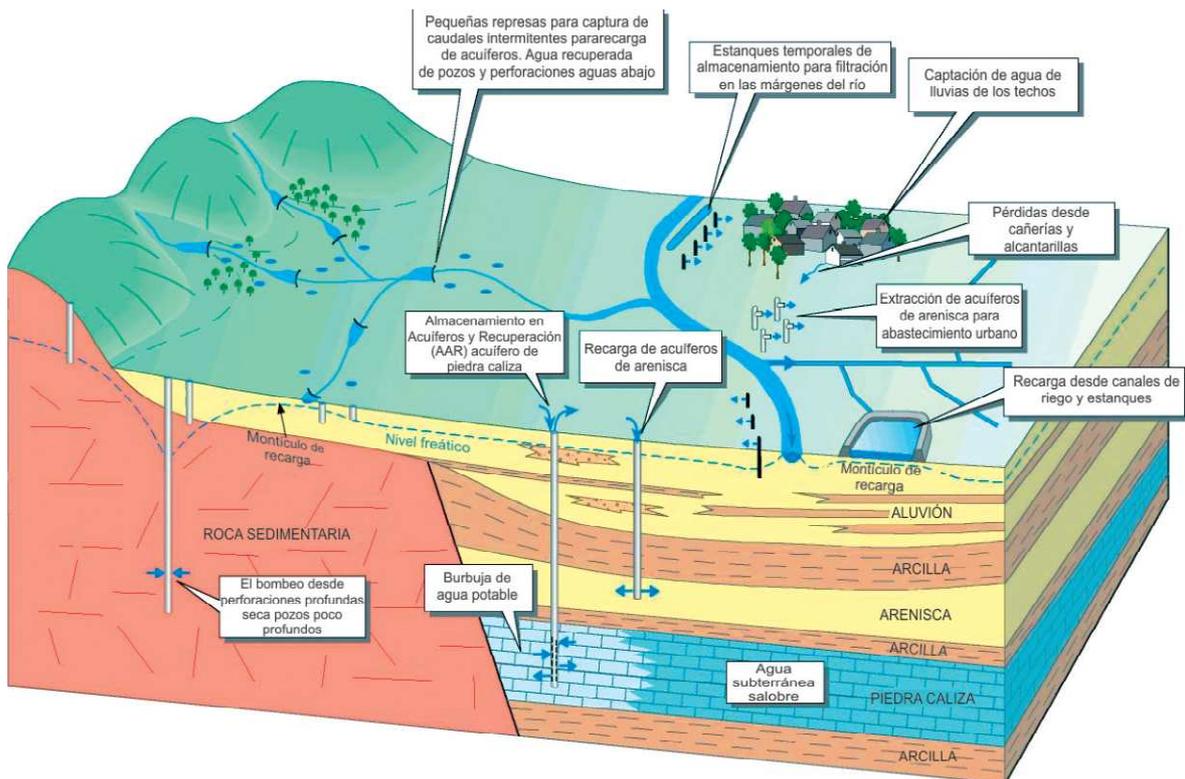


Figura 26. Esquema de métodos de recarga artificial de acuíferos con aprovechamientos.

Tomado de Gale (2005)

4.2 Calidad del agua para la recarga de acuíferos

De acuerdo con Gale (2005), la calidad del agua de los acuíferos sin intervención antrópica, normalmente es excelente desde los puntos de vista físicos, químicos y biológicos, debido a que la misma es resultado de la filtración natural y tratamiento microbiológico en el proceso de percolación a través del suelo. Sin embargo, el agua subterránea puede presentar limitaciones para el consumo humano por concentraciones naturales de hierro, fluor, arsénico, manganeso, boro o sales.

Gale sigue indicando que la calidad del agua subterránea puede ser alterada por actividades humanas tales como: la extracción de agua subterránea, el riego, el incremento de la recarga, cambios de uso de la tierra, actividades agrícolas y forestales, disposición de residuos líquidos y sólidos. Pero, se consideran como mayores amenazas a la intrusión marina, la percolación profunda del riego y de las aguas residuales.

El mismo autor afirma que las implicaciones para la calidad del agua en procedimientos de recarga de acuíferos pueden ser: la remoción de sólidos en suspensión, patógenos, metales pesados, materia orgánica y nutrientes del agua de recarga; dilución del agua subterránea de mala calidad o posible contaminación del agua subterránea de buena calidad, incremento de solutos por mezcla y disolución, reacciones geoquímicas adversas con hierro, arsénico, manganeso y/o flúor.

Una preocupación es la posibilidad de que las aguas residuales pueden incluir productos farmacéuticos y hormonas o compuestos con actividad hormonal cuyo efecto e importancia para la salud son poco conocidos (Jones-Lepp, 2001, citados por Bower, 2002).

En tal sentido, de acuerdo con Treodux, et. al. (2009), la recarga debe cumplir con requerimientos siguientes:

- No debe significar impactos negativos o de significancia al medio ambiente.
- Debe garantizar el uso sostenible del acuífero de preferencia con fines de consumo humano.
- El tratamiento del agua recuperada de los acuíferos de recarga debe ser mínimo como estabilización y desinfección por lo que el agua de recarga debe cumplir con los parámetros guía para agua potable y no agregar riesgos a la salud de los usuarios comparado con los recursos actuales.

- No deben surgir problemas técnicos como resultado de la inyección de agua como colmatación, corrosión ni se debe necesitar mucho tratamiento antes de la distribución.
- El agua resultante debe cumplir con parámetros aceptables de calidad del agua.
- Se deben revisar las directrices de los parámetros de calidad del agua de manera periódica.

Según Bouwer (2002), la obstrucción de las estructuras de recarga artificial es el principal problema de ésta práctica ya que su resultado es la reducción de las tasas de infiltración. La obstrucción es ocasionada por procesos físicos, químicos y biológicos. Los procesos físicos se deben a la sedimentación de partículas orgánicas e inorgánicas que transporta el agua o bien a la lixiviación de partículas finas dentro del suelo con la posterior formación de una capa de partículas finas en el subsuelo de menor tasa de infiltración. Los procesos químicos incluyen la precipitación de carbonatos de calcio, fosfatos yeso y otros precipitados. Los procesos biológicos consisten en la acumulación de flóculos de bacterias y/o algas en la superficie filtrante, formación de biopelículas o biomasa y producción de gases que bloquean los microporos. Por estos motivos es esencial considerar la calidad del agua de recarga.

Cuando el agua contiene aire disuelto y/o es más fría que el suelo o el acuífero, el agua se calienta por lo que se libera aire y forma atrapados que reducen la conductividad hidráulica (Bouwer, 2002).

El pretratamiento del agua para la recarga de acuíferos es necesario para reducir los sólidos suspendidos, nutrientes y carbono orgánico así como para el control del crecimiento microbiológico en la superficie filtrante (Baveye et. al. citado por Bouwer, 2002).

La presedimentación es una práctica necesaria especialmente cuando se utiliza agua de arroyos o aguas de inundación (Bouwer, 2002).

Treodux, et. al. (2009) afirman que para que la recarga de acuíferos tenga éxito es necesario contar con acuíferos con una capacidad de almacenamiento considerable y la calidad del agua a inyectar en él de forma directa debe cumplir al menos con los requerimientos de calidad del agua para consumo humano y que el conocimiento sólido de la calidad del agua en las diferentes zonas del acuífero, así como las potenciales interacciones entre la roca y el agua son importantes, en la planificación de la recarga artificial de acuíferos, para asegurar la sostenibilidad de esta práctica.

También indican que las reacciones entre el agua inyectada y el agua del acuífero tienen relación con el potencial de óxido-reducción entre ambas así como la presión parcial de dióxido de carbono. La inyección de agua de la superficie saturada con oxígeno cambia las reacciones redox y causa interacción con la matriz de la roca. El ingreso de oxígeno a un reducido ambiente crea desequilibrio y la promoción de reacciones de oxidación-reducción que con los posteriores incrementos en los niveles de agua (naturales o inducidos) disuelven los químicos solubles y como consecuencia producen cambios en la hidroquímica del acuífero. La intensidad de estos efectos depende del método de recarga y método de inyección.

Como una referencia en el cuadro siguiente se presenta una guía de parámetros de calidad de agua de recarga propuesta para la inyección de agua en el acuífero Windhoek, Namibia.

Cuadro 4. Estándares provisionales de calidad para recarga del acuífero Windhoek

Parámetro	Valor guía	Valores propuestos	Motivo
Oxígeno Disuelto	5	4	Consumo de oxígeno
Crecimiento del Carbono Orgánico Asimilable (tasa/h)	0.15	0.15	Colmatación
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{m}$)	70	60	Calidad del agua
Cloro (mg/l)	100	100	Calidad del agua
Sulfato (mg/l)	200	50	Calidad del agua
Nitratos y Nitritos como N (mg/l)	6	5	Calidad del agua

Nota: La conductividad eléctrica puede ser ajustada hasta un máximo de 70 mS/m en áreas en donde las aguas subterráneas prevalezcan valores menores a 60 $\mu\text{S}/\text{m}$.

Fuente: Treodux, et. al. (2009).

Del cuadro anterior se puede interpretar que en la propuesta se anotan valores menores en relación a los valores guía en el caso del oxígeno disuelto para reducir la inyección de oxígeno y no favorecer cambios en las reacciones redox del acuífero. Por otro lado se consideran los valores de conductividad eléctrica, cloro, sulfatos y nitratos básicamente para no incrementar la salinidad del agua del acuífero ni la contaminación por éstos parámetros.

Treodux, et. al. también agregan que la presencia de hierro en los acuíferos es un indicador de la posibilidad de la obstrucción de pozo, por lo que deben monitorearse las concentraciones de especies de hierro.

En Estados Unidos, el agua utilizada para la inyección es a menudo clorada y tiene cloro residual de aproximadamente 0.5 mg/l, las aguas residuales para inyección deben recibir tratamiento de filtración de arena y cloración o radiación ultravioleta con lo que se pretende eliminar sólidos suspendidos, protozoarios, parásitos, huevos de helmintos, bacterias y virus. El efluente terciario es tratado posteriormente con filtración por membrana (microfiltración y ósmosis inversa) para eliminar patógenos que sobrevivan al tratamiento anterior así como nitrógeno, fósforo, carbono orgánico, sales y otros productos químicos. Además debe existir compatibilidad geoquímica entre el agua subterránea y el agua de recarga (Dillon y Pavel citados por Bouwer, 2002).

California ha establecido un límite máximo 1 mg/l de carbono orgánico total, para el uso de aguas residuales en la recarga de acuíferos, ya que esto permite tratar el agua con procesos de ósmosis inversa o filtración de carbono (Bouwer, 2002).

A continuación se presenta la guía propuesta por el Estado de California para el control de la calidad de agua recuperada de los acuíferos sometidos a recarga artificial:

Cuadro 5. Guía propuesta por California para el uso potable de aguas subterráneas de acuíferos recargados con aguas residuales.

Tipo de contaminante	Tipo de recarga	
	Superficial	Inyección Subterránea
Microorganismos Patógenos	--	--
Tratamiento secundario	SS<30mg/l	--
Filtración	≤2 UNT	--
Desinfección	4 log inactivación de virus, < 2.2 Coliformes totales/ 100 ml	--
Tiempo de retención subterránea	6 meses	12meses
Separación horizontal	150 m	600 m
Contaminantes regulados	Cumplir con requerimientos de agua potable	--
Contaminantes no regulados		--
Tratamiento secundario	DBO≤30 mg/l, COT ≤16 mg	--
Ósmosis Inversa	≤ 1 mg/l COT	100% tratados ≤ 1mg/l COT
Difundir criterios para SAT 50% de remoción de crédito COT	Profundidad de las aguas subterráneas por tasa inicial de percolación <0.5 cm/min = 3 m, <0.7 cm/min = 6 m	NA
Opción de control de montículo	Demostrar factibilidad de montículo	NA
Aporte de agua reciclada en el pozo	≤50%	--

Fuente: Bouwer (2002).

En el cuadro anterior se observan mayores requerimientos para el agua recuperada de la recarga artificial, lo que se justifica debido a que el agua de recarga en los métodos superficiales no requiere de muchos tratamientos previos ya que se espera que los procesos de geopurificación contribuyan a la limpieza del agua. En el caso de inyección subterránea el agua de recarga debe cumplir con los requisitos del agua potable, por lo que en este caso el acuífero funciona como un almacén del agua y los procesos de geopurificación son menores.

De acuerdo con el origen del agua de recarga se pueden presentar problemas de calidad del agua comunes y que se sintetizan en el cuadro siguiente:

Cuadro 6. Problemas, tratamiento y métodos de recarga artificial de acuerdo al origen del agua de recarga.

Origen	Ambiente	Problemas	Tratamiento	Métodos de Recarga
Agua Superficial	Húmedo: Corrientes permanentes	Limos	Estanque de sedimentación	Filtraciones al margen del río Transporte a instalaciones de recarga.
	Árido/Semiárido: Corrientes intermitentes			
	Lagos	Normalmente agua limpia, a menos que exista descarga de residuos	Normalmente ninguno	Directos.
Escorrentía de tormenta	Urbano	Contaminación en calles, desechos industriales y domésticos	Eliminar primera descarga	Pavimentos porosos, humedales, recolección de agua de lluvia en techos con recarga por medio de galerías, pozos, perforaciones
	Rural	Contaminación Agrícola	Diques de contención	Estanques de infiltración, áreas con pastos, pozos de infiltración
Agua Reciclada	Varios	Contaminación de acuerdo al origen (industrial o doméstico) Uso limitado	Tratamiento obligado previo a uso como recarga. Y posterior si se usa para consumo humano	Métodos superficiales
Agua potable	Varios	Ninguno	Ninguno	Inyección directa en pozos

Fuente: Gale (2005)

La información del cuadro anterior revela que el origen del agua de recarga implica problemas relacionados con la calidad del agua de recarga y por lo tanto deben considerarse métodos de tratamiento y aplicaciones específicas de métodos de recarga artificial de acuíferos.

A pesar del control de la calidad del agua de recarga, los problemas de colmatación siempre se mantienen latentes por lo que los tratamientos para recuperar las tasas de infiltración son necesarias.

De acuerdo con Bouwer (2002) la operación frecuente de bombeos en los pozos contribuye a su limpieza y mantenimiento para evitar las obstrucciones con lo que se puede reducir la exigencia en la calidad del agua de recarga, en relación a los materiales obturantes, eliminando procesos costosos como la filtración por membrana. Además, el crecimiento de algas y biológico en general se controlan con la eliminación de nutrientes en el agua como nitrógeno, fósforo y el carbón orgánico. La aplicación de cloro o de otros desinfectantes reduce la actividad biológica. Secar las estructuras de infiltración puede resolver el problema de obstrucción ya que este procedimiento permite que las capas de obstrucción se descompongan, rompan y agrieten; restaurando así la tasa de infiltración. La eliminación mecánica con raspadores, motoniveladores, rastras, arados es otra práctica a considerar para mejorar las tasas de infiltración.

La evaluación del impacto en la calidad del agua de los acuíferos, por efecto de la recarga artificial, conlleva un programa de monitoreo de la calidad del agua subterránea, el conocimiento de la hidrogeología y actividades antrópicas dentro del área (Gale, 2005).

4.3 Aspectos de diseño de un plan de recarga de acuíferos

El diseño y gestión de los sistemas de recarga artificial implican aspectos geológicos, geoquímicos, hidrológicos, biológicos y de ingeniería. Debido a que los suelos y formaciones acuíferas son en su mayoría heterogéneos; la planificación, diseño y construcción de aprovechamientos de recarga de acuíferos se recomienda avanzar con cautela partiendo de pruebas para luego revisar la viabilidad general y luego iniciar pruebas piloto antes de que un sistema completo pueda ser diseñado (Bouwer, 2002).

Casas, et. al. (2011) indican que también es necesaria la caracterización del clima, principalmente aspectos como: precipitación, temperatura, viento, radiación solar, evaporación y evapotranspiración. Luego afirman que las actividades específicas a considerar son: la caracterización hidrogeológica del medio receptor (zona no saturada y zona saturada), el estudio de la interacción del agua a utilizar para la recarga artificial con

el medio receptor y luego el diseño y planificación del sistema de recarga artificial y del sistema de control.

Por su lado, Gale (2005) indica que para evaluar un sitio para la gestión de la recarga de acuíferos se debe desarrollar un modelo conceptual del ciclo hidrológico, comprender la hidrología y meteorología, estimar el espacio disponible para almacenamiento en el acuífero, cuantificar los componentes del balance hídrico, estimar la calidad del agua del acuífero y del agua de recarga, utilizar modelos numéricos para evaluar el plan y evaluar el impacto de la estructura aguas abajo.

De acuerdo con Bouwer (2002) el punto de partida para el diseño son los mapas de suelo y los estudios hidrogeológicos para identificar los puntos promisorios. La textura del suelo (proporción de arena, limo y arcilla) y la conductividad hidráulica típica son los primeros valores a conocer.

Los valores de la conductividad hidráulica en función de la textura son los siguientes:

Cuadro 7. Valores de conductividad hidráulica en relación a la textura del suelo.

Textura	Conductividad Hidráulica (m/día)
Arcilla	<0.1
Franco	0.2
Franco arenoso	0.3
Arena franca	0.5
Arena fina	1
Arena media	5
Arena gruesa	10

Fuente Bouwer (2002)

Las condiciones hidrogeológicas determinan la capacidad de percolación a través de la zona no saturada y la capacidad del acuífero para almacenar agua de recarga. En el aspecto hidrogeológico los principales factores a considerar del acuífero son: los límites físicos e hidráulicos, propiedades hidrogeológicas y formaciones superiores, gradiente hidráulicos, profundidad desde el nivel del suelo hasta la superficie del acuífero, calidad y mineralogía del agua subterránea (Gale, 2005).

A continuación se presenta una síntesis de las características hidrogeológicas y las opciones de recarga artificial más acordes.

Cuadro 8. Relaciones entre la hidrogeología con la recarga artificial.

Ambiente Hidrogeológico	Descripción	Características	Criterios de recarga artificial
Aluvión	Depósitos fluviales, marinos o lacustres Profundidad Variable Topografía baja Sedimentos: grava gruesa hasta , limos o finos impermeables	Si existen ríos permanentes los acuíferos son poco profundos. En zonas áridas o en zonas de bombeo intenso el acuífero puede estar a mayor profundidad	Cuencas de infiltración, zanjas
Roca Fracturada	Rocas ígneas metamórficas o volcánicas	Baja capacidad de almacenamiento y transmisibilidad Recarga en zonas erosionadas o fracturadas	Inyección por perforación
Arenisca consolidada	Porosos y /o fracturados	Alta capacidad de almacenamiento y alta transmisibilidad. Si el suelo es de origen de arenisca entonces la capacidad de recarga es alta, si existen depósitos aluviales de grano fino será limitada. La recarga puede perderse por la alta permeabilidad	Almacenamiento en época de lluvias para recuperar en la época seca
Acuíferos de Carbonato	Rocas solubles, calizas, dolomitas, mármoles	Volumen de agua y flujo se encuentra en las fracturas. Proporción de volumen de fracturas/volumen intergranular es bajo en piedras calizas rocosas y es alto en rocas cársticas Acuíferos cársticos con extrema disipación del agua de recarga.	Almacenamiento en acuíferos confinados

Fuente: Gale (2005)

Ravi y Mohan (2005) aseguran que, además de conocer aspectos hidrogeológicos, es importante tomar en cuenta aspectos geomorfológicos y la variación de la tabla de agua para identificar los sitios idóneos para trabajar la recarga artificial. La primera tarea es identificar regiones con alto, medio, bajo o muy bajo potencial de agua subterránea tomando en cuenta parámetros hidrogeomorfológicos y para la selección de sitios para ubicar recarga artificial propone investigar: la fluctuación de la tabla de agua, recopilar datos geológicos como densidad de fallas, profundidad a la cama rocosa, profundidad del suelo; datos geomorfológicos como: densidad de drenaje, topografía, uso y cobertura de

la tierra y pendiente. El método específico de recarga consideran que debe estar relacionado con la morfología del drenaje.

Por otro lado, Ghayoumian et. al. (2007) para identificar sitios para recarga artificial en la costa del sur de Irán, utilizaron criterios de geomorfología y de suelo cuyos parámetros fueron: pendiente, tasa de infiltración, profundidad de la capa aluvial y la conductividad eléctrica del suelo.

Anbazzhagan, et. Al. (2005) propusieron un modelo GIS para ubicar sitios idóneos para recarga artificial. El modelo toma en cuenta los siguientes factores: geológicos, geomorfológicos, geología subterránea e hidrogeología para determinar la mejor localización de trabajos de recarga artificial. Por otro lado, el estudio del uso y cobertura de la tierra, comportamiento hidrológico de los suelos y la lluvia para estimar la escorrentía y la estimación de la dimensión del acuífero para considerar el volumen de almacenamiento. La integración de esta información permite la planificación de la recarga artificial.

Casas, et. al. (2011) indican que, además, es necesaria la caracterización del agua a utilizar en la recarga de artificial de acuíferos, evaluar la compatibilidad química y de las interacciones físicas con el medio así como evaluar las afecciones a las captaciones.

Los mismos autores señalan que el diseño de un sistema de recarga, además de las especificaciones propias, deberá incluir un sistema de monitoreo y control:

- a) Sistema de recarga superficial: dimensiones, número y localización de estructuras de captación y recarga.
- b) Sistemas de recarga subterránea: número y ubicación de pozos de recarga, esquemas constructivos de los pozos y dispositivos de aporte de agua al sistema.
- c) Diseño del sistema de control: distribución y número de piezómetros, profundidad, ubicación, esquema constructivo.

También indican que en la planificación de la recarga se deben considerar períodos de recarga (caudal y volumen), períodos de reposo, períodos de mantenimiento de la capacidad de infiltración y métodos a aplicar, así como el análisis de la evolución de la tasa de recarga.

Además, aportan que en la planificación del monitoreo y control se debe definir la sistematización y frecuencia de toma de los datos siguientes:

- a) En métodos superficiales: el caudal y calidad del agua de recarga.

- b) En métodos directos, el control de: caudal de recarga, caudal de bombeo, nivel piezométrico y calidad del agua de recarga.
- c) En ambos sistemas: control de la superficie piezométrica y evolución de la calidad del agua del acuífero tras la recarga.

Para finalizar, Gale (2005) indica que la evaluación de los beneficios de la recarga de acuíferos debe considerar: evaluación de los niveles piezométricos, medición de caudales base en los ríos, abatimiento de la intrusión marina, disponibilidad de agua para riego, medición de la erosión del suelo, análisis beneficio/costo, cambios en el nivel de vida de los beneficiarios.

5 Experiencias en captación y almacenamiento de agua a nivel global

Existen varias experiencias en cuanto a captación de agua y su almacenamiento para la satisfacción de las demandas de poblaciones humanas para diferentes usos. De acuerdo a lo observado, el agua de captación puede tener su origen en fuentes superficiales como corrientes efímeras, intermitentes o permanentes o lagos o lagunas; pero otra fuente de agua de la que se obtienen captaciones lo constituye el agua de lluvia.

Los diferentes métodos de captación y almacenamiento de agua se ven necesariamente ligados para lograr la satisfacción de las necesidades humanas y a lo largo de la historia han resuelto diferentes problemas relacionados con el abastecimiento de agua tales como el incremento de la demanda de agua, la disponibilidad de recursos financieros, naturales y materiales; condiciones ambientales como: clima, contaminación del agua y disponibilidad de fuentes superficiales y subterráneas de agua; así como las prácticas culturales y la legislación vigente en cada región (Ballén, et. al., 2006).

En el cuadro siguiente se sintetizan casos de captación y almacenamiento de agua de lluvia.

Cuadro 9. Casos de captación y almacenamiento de agua de lluvia.

Ciudad	Problema	Detalles de Captación y Almacenamiento
Kenya ¹	Zonas áridas y semiáridas	Captación en techos de casas, conducción y almacenamiento 10 a 30 m ³ en cisternas de ferrocemento.
Bangladesh ^{1,3}	Aguas contaminadas con Arsénico	Almacenamiento en cisternas de 0.5 a 3.2 m ³ de ferrocemento, ladrillo, concreto reforzado o mampostería. No potabilizan
Chennai, India ¹	Sequía crónica	Captación en azoteas de 70,000 construcciones: edificios, escuelas y parques. Con cámaras de decantación y filtración.
República Popular de China ¹	Incremento de demanda, contaminación del agua superficial	Proyecto 121 desde 1988 financia área de captación de agua, dos almacenamientos y un terreno para cultivar. En un año cada persona puede contar con 10 l por día y el animal grande puede disponer de 30 l por día.
Japón ^{1,3}	Islas con alta población	Construcción de Ronjinson que es un sistema de captación de agua en techo de casas con pozo subterráneo en el que se almacena y luego se extrae con bomba manual.
Tailandia ¹	80% población rural 25% de población cuenta con servicio de agua	Construcción de 10 millones de cisternas de arcilla de 1000 a 3000 litros para el almacenamiento de agua de lluvia con capacidad de abastecer a seis personas por seis meses
Texas ¹	Zona semiárida	Una casa típica tiene 200 m ² de techo con la que se puede recolectar 150,000 l de agua con una precipitación anual media de 850 mm.
Canadá ^{1,3}	Alta demanda de agua en verano	Subsidio de compra de cisternas plásticas de 284 l para almacenar agua de lluvia proveniente de los techos para regar jardines y césped, ahorro de 4920 l de agua y mejora de disponibilidad de agua en épocas de mayor demanda
México ¹	Distribución desuniforme del agua en el tiempo y en el espacio. Mala calidad del agua	Establecimiento del Centro Internacional de captación y aprovechamiento de agua de lluvia (CIDECALLI) promueve la captación, purificación y envasado de agua de lluvia. Proyectos de captación filtración y purificación de agua de lluvia en Estado de México, Guanajuato, Morelos, Michoacán,

		Puebla. Captación de techos de edificios o de escorrentía superficial. Almacenamiento del agua en balsas recubiertas con geomembrana de PVC o en cisternas de ferrocemento. Uso para consumo humano, envasado para venta, consumo de animales y/o riego de hortalizas de traspatio.
Brasil (región semiárida) ^{1,3}	Prolongadas temporadas de sequía	En 1983 inició programa con construcción de pequeñas represas y fabricación de 12,000 cisternas rurales acordes a tipos de suelos, materiales disponibles y costo con una capacidad total de 360,000 m ³ y con la meta de 1 millón de cisternas. No se purifica el agua. Beneficiados: 5 millones de personas La captación de agua se ha incorporado al sistema educativo
Honduras ^{1,2,3}	Limitación al acceso de servicio de agua y saneamiento	Captación en techos de casas y almacenamiento en cisternas con materiales disponibles. No se purifica el agua
Nicaragua ¹	Solo el 28% de la población con acceso a servicio de agua	30 proyectos en conjunto con 24 organizaciones para el establecimiento de cisternas rectangulares con techo de lámina de zinc o teja de barro para captación de agua de lluvia
Loes de Ganzu, China ³	Escasez de agua superficial, agricultura depende de las lluvias	En 1988 se iniciaron pruebas de captación de agua de lluvia. Entre 1995 y 1996 el gobierno financio la instalación de sistemas de captación de lluvia para suministro de 260,000 familias (1.2 millones de personas) y 1.18 millones de cabezas de ganado
Alemania ³	Inundaciones, mejora del microclima, uso racional del agua	A partir de 1998 se integró el aprovechamiento de agua de lluvia en desarrollos urbanos a gran escala como DiamlerChrysler Potsdamer Platz y el Belss-Luedecke-Strasse Building State para utilizar el agua en usos diferentes al de consumo humano.
Colombia ³	Comunidades con problemas de abastecimiento	Edificios comerciales y de educación construidos bajo el concepto de captación de agua de lluvia con lo que obtienen el 75% de autosuficiencia, o para descarga de inodoros y alimentación de espejos de agua.
Islas Vírgenes ^{1,3}	Contaminación del agua subterránea, escases de aguas superficiales	Existe legislación para la captación de agua de lluvia. Uso de cisternas de diferentes tipos.
Chiquimula, Guatemala ⁴	Clima semiárido	En el 2008 instalación de ejecución de un proyecto piloto de instalación de cisternas para la cosecha de agua de lluvia financiado por el Fondo de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Fuente: ¹ Anaya y Martínez (2007) ² Rivera y Fuentes (2003) ³ Ballén (2006) ⁴Villatoro y Melgar (2010)

En los casos observados en el cuadro anterior, los problemas resueltos con la captación y almacenamiento de agua de lluvia giran en torno a escasez de agua por causas climáticas, contaminación de las fuentes superficiales y subterráneas, limitaciones en recursos naturales, incremento de la demanda de agua. Estas captaciones de agua de lluvia, por lo general se asocian al almacenamiento en tanques o cisternas de diferentes materiales de construcción. Llama la atención del caso de Alemania, cuyos problemas difieren al resto ya que la captación y almacenamiento de aguas de lluvia se orientan al control de inundaciones, mejora del microclima y del uso racional del agua. Este tipo de captaciones y almacenamientos están limitados por la capacidad de almacenamiento de las cisternas o tanques por lo que su aplicación generalmente se orienta al consumo doméstico o riego de pequeñas áreas.

Por otro lado la captación y almacenamiento de agua en acuíferos se ha practicado alrededor del mundo con grandes resultados en la mejora de la disponibilidad del agua para diferentes usos. En el cuadro siguiente se explican algunos casos de recarga artificial de acuíferos y sus resultados.

Cuadro 10. Casos y resultados de prácticas de recarga artificial de acuíferos en el mundo.

Ciudad	Acción	Resultados
Puebla, México ¹	Programa agua para siempre en región mixteca. Aplicación de tecnologías de conservación de suelo y captación de agua: terrazas de piedra, barreras vivas, diques de gaviones en los cauces.	Construcción de pozos, captación de manantiales, redes de distribución y tanques de almacenamiento para abastecimiento de poblados
Guanajuato, México ¹	Rehabilitación de ríos y arroyos del río Laja. Construcción de presas filtrantes, pozas que guardan el agua por más tiempo, áreas de exclusión, recuperación de vegetación nativa y creación de humedales.	Resultados esperados: estabilización de ríos y arroyos, reducir la velocidad del agua, prevenir inundaciones, recuperar manantiales, infiltrar agua en acuíferos.
Río Arvari, India ^{2,5}	Construcción de represas (johad) para coleccionar agua de escorrentía de tormentas y prácticas de conservación de suelo, agua y bosque por 20 años	Restauración de niveles de agua subterránea para uso privado y comunitario, adhesión de 70 aldeas más al programa. Río Arvari actualmente con caudal permanente. Incremento de la agricultura, empleo, nivel del acuífero y reducción de migraciones.
Dorz -Sayban, Irán ²	Construcción de represa de desviación sobre corriente efímera del Kaftari y conducción del agua hacia superficies de inundación	Altas tasas de infiltración, mejora de la calidad del agua del acuífero, recuperación del nivel freático de pozos explotados para irrigación.
Balochistán, Pakistán ²	Construcción de presas perforadas (gaviones con desfuegos) en zanjones y piezómetros de control, gestión del pastoreo y plantación de arbustos para la reducción de sedimentos obstructivos en el área de infiltración	Se espera la recuperación de niveles freáticos deteriorados por la sobreexplotación para consumo, riego e industria en una zona de sequía
Adelaida, Australia ²	Retención del agua de escorrentía de tormenta de área periurbana en humedales y cuencas de captación, tratamiento con pantallas o filtros e inyección a acuífero de piedra caliza de agua salobre 100 m bajo suelos arcillosos con baja tasa de infiltración y construcción de pozos de observación. Limpieza de obstrucción con inyección de aire a presión	Al inicio el agua recuperada presentó excedencia en coliformes fecales cuyos valores decayeron semanas después. Inyección de 240,000 m ³ de agua a una tasa de inyección de 15 a 20 lps. Reducción de sólidos totales disueltos. Agua de buena calidad para riego.
Atlantis, Sudáfrica ²	Sistema comprendido por dos cuencas de recarga de 50 ha, fuentes de recarga: escorrentía de tormenta, agua subterránea y agua residual tratada de residencias que se mezcla con el agua de escorrentía de tormenta. El agua residual proveniente de industrias no se utiliza para recarga, se trata y se dispone en cuencas de infiltración costeras. Control de la cantidad del agua de recarga para no afectar la calidad del agua subterránea	Cobertura total de la demanda de agua potable en una zona con 450 mm de lluvia anual distribuida principalmente de mayo a septiembre
Windhoek, Namibia ²	Instalación de pozos de inyección, inyección de agua potable de buena calidad en tres etapas, la primera y la segunda en perforaciones existentes y una tercera fase con nuevas	Primera etapa se inyectaron 3.7 Mm ³ /año, segunda etapa se proyecta una inyección de 8.1 Mm ³ /año, y para la tercera etapa se espera inyectar 16

	perforaciones	Mm ³ /año. Se espera tener disponibilidad de agua subterránea para satisfacer la demanda total en época de sequía.
Kenya ²	Barreras muertas con desechos de cosecha, bandas de pasto, microcaptaciones en hoyos utilizados para plantar árboles o frutales, montículos de tierra o piedra en contorno, zanjas para retener agua de escorrentía, terrazas, represas de piedra y hoyos, represas de arena en el lecho del río.	Mitigación de sequías
Sierra Nevada, España ^{2,7}	Agua de deshielo conducida por extensos canales hasta por 15 km a un área de alta permeabilidad desde el año 1139.	Surgimiento de manantiales temporales que se utilizan para riego y manantiales perennes que se utilizan para consumo humano. Recuperación de la vegetación
Budapest, Hungría ²	Agua filtrada en las márgenes del río Danubio	Reducida necesidad de tratamiento de agua
Comarca Lagunera, México Norte ²	En el año 2000 se hicieron pruebas de inyección en una zona de regadío, derivando agua y transportándola a través de infraestructura existente, utilizando pozos preexistentes para el monitoreo y control	Se infiltraron 5 Mm ³ entre mayo y agosto se tuvieron problemas de obstrucción ya que la capacidad de infiltración se redujo de 2m/d a 0.116 m/d
Paltas, Loja, Ecuador ³	Creación de sistema de captación de agua de lluvia por medio de 72 lagunas ubicadas en las partes altas, muros de contención en quebradas, reducción de escorrentía con manejo de cobertura vegetal, mejora del microrriego, organización de la comunidad	170000 m ³ de agua que almacenadas en acuíferos, riego de nuevas huertas y reactivación de huertas abandonadas, incremento de caudales en pozos en el término de dos años.
Cusco, Perú ⁴	Construcción de 6200 m de zanjas de infiltración, plantación de forestales nativas, cercado de manantiales, tala de eucaliptos, participación comunitaria	Mejora de la calidad del agua y del paisaje, incremento de áreas de cultivo y de áreas de irrigación.
Honduras ⁶	Pozos excavados o perforados manualmente, microcaptaciones de agua (excavaciones en el curso de quebradas o nacimientos rellenas de material filtrante) bombas manuales de fabricación artesanal, tuberías y tanques pequeños elevados de almacenamiento. Organización comunitaria para operación.	Abastecimiento de agua domiciliar para uso doméstico.

Fuente: ¹Red de Aprendizaje, Intercambio y Sistematización de Experiencias hacia la Sostenibilidad, et. al. (2005) ²Gale (2005) ³Proyecto de Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina (2009) ⁴ Sotomayor y Choquevilca (2009) ⁵ Sight (2009) ⁶ Rivera y Fuentes (2003) ⁷ Fernández (2006)

En el cuadro anterior se observa la aplicación de diferentes métodos de recarga artificial de acuíferos en los que se evidencia una alta capacidad de almacenamiento de los acuíferos, lo que permite además de aportar mejoras en la calidad del agua, mejorar la disponibilidad del recurso a tal punto que se ha logrado incrementar las áreas de riego y los niveles de vida en regiones en donde se ha practicado este concepto.

6 Métodos de almacenamiento de agua con aplicación potencial en la vertiente del Pacífico de Guatemala

Luego de revisar los diferentes métodos de almacenamiento de agua es posible hacer una aproximación a las aplicaciones potenciales de los mismos en el área de la vertiente del Pacífico de Guatemala.

6.1 Aplicación de métodos superficiales de almacenamiento de agua

El método de balsas es atractivo para la habilitación de terrenos cultivables en condiciones de riego, debido a su adaptación a cualquier tipo de condición geotécnica y a que no están expuestas al tránsito de crecidas. La construcción de balsas para el almacenamiento de agua de riego puede orientarse a la solución de las zonas semiáridas e incluso aquellas zonas que no presentan estas condiciones pero que sí manifiestan déficit hídrico estacional (época seca) o déficit hídrico en la época de canícula. El régimen de almacenamiento puede ser diario, con la captación de agua durante las noches y su consumo durante el día o de régimen estacional con almacenamiento en la época de exceso (época lluviosa) y con consumo en la época de déficit de agua (época seca y/o canícula). Entre los aspectos de importancia que deberán considerarse en la construcción de balsas, en la zona de la vertiente del Pacífico de Guatemala, está la condición sísmica del área y la carga de sedimentos de las aguas superficiales principalmente en la época de lluvias.

Por otro lado el uso de tanques o cisternas, es recomendable combinarlo con la captación de fuentes superficiales o de agua de lluvia.

6.2 Aplicación de métodos subterráneos de almacenamiento de agua

De acuerdo con Bouwer (2002) para la aplicación de estos métodos es importante tener conocimiento de la geología, la hidrogeología, la geoquímica, biológicos y de ingeniería. El punto de partida son los estudios de suelos y los estudios hidrogeológicos (Bouwer, 2002).

Para la república de Guatemala existen diversos estudios de suelos a diferentes niveles de detalle, a partir de los que es posible determinar la textura de los suelos de las regiones del país e inferir sobre la permeabilidad así como sobre las posibles aplicaciones de métodos de recarga de acuíferos. Sin embargo, el conocimiento de la estructura hidrogeológica de la vertiente del Pacífico es vital para poder tener certeza de los volúmenes que se pueden almacenar así como la distribución de los acuíferos para su aprovechamiento. En tal sentido es recomendable emprender investigaciones que

contribuyan a caracterizar la hidrogeología en cuencas, subcuencas, microcuencas o de localidades previo a emprender proyectos de recarga artificial de acuíferos con el fin de lograr una aplicación y gestión racional de éstos métodos de almacenamiento de agua.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se visualizan como potenciales las siguientes aplicaciones:

De acuerdo con el MAGA (2000), en los departamentos de Retalhuleu y Suchitepéquez existen altos porcentajes de territorios con suelos vertisoles (56% y 34% respectivamente) los que se caracterizan por contener altos porcentajes de arcillas expandibles que condicionan a estos suelos a una permeabilidad lenta. Dado a la profundidad de estos suelos, en esta zona existiría el potencial para la recarga de acuíferos por medio de métodos de inyección directa tales como: pozos de infiltración o inyección en pozos profundos.

En el caso del departamento de Escuintla, de acuerdo con MAGA (2000), el 47% del territorio presenta suelos del orden Mollisol, los que se caracterizan, en este departamento, por presentar texturas que van de francas a arenosas (Cengicaña, s.f.), los que prometen altas tasas de infiltración, por lo que en estas condiciones los métodos de distribución tales como: zanjas de infiltración, inundaciones controladas, estanques de infiltración; tendrían posibilidades de aplicación. En donde existen redes de canales de riego, se les puede utilizar también con el propósito de infiltrar agua en el suelo para su almacenamiento y para su posterior aprovechamiento.

En sitios en donde los acuíferos libres sean profundos, es posible practicar el método de tratamiento suelo acuífero, bajo estricta vigilancia, para la infiltración de aguas residuales de casas aisladas, de comunidades o de municipios. La vigilancia en la aplicación de este método consistiría en observar con rigor que el agua que se infiltre sea tratada previamente por medio de trampa de grasas, tanques séptico y filtros anaeróbios.

La construcción de presas de retención o de presas perforadas (permeables), es recomendable en corrientes efímeras o interminterentes en las partes altas, medias y bajas de las cuencas de la Vertiente del Pacífico. Con la aplicación generalizada de esta práctica, además de contribuir con la infiltración de agua hacia los acuíferos, adicionalmente se podría contribuir a la regulación de las crecidas en época de lluvias.

La práctica de almacenamiento en acuífero con recuperación (AAR) o de almacenamiento en acuífero transporte y recuperación (AATR) (inyección de acuíferos) se visualizan como métodos factibles de aplicar en regiones con acuíferos profundos o con acuíferos confinados profundos en los que se ha notado el descenso de los niveles

freáticos como el caso de los acuíferos de la ciudad de Guatemala (IARNA, 2004) en los que podrían justificarse inversiones en instalaciones de inyección de agua tratada en épocas de exceso en los acuíferos que abastecen el consumo humano.

A nivel de cascos municipales, es posible la aplicación de sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS) por medio de sistemas de transporte filtrantes para la conducción de aguas de lluvia, sistemas de tratamiento pasivo como la creación de humedales artificiales, sistemas de infiltración o control de origen como pozos de infiltración, zanjas filtrantes, etc. Así como potenciar este tipo de métodos por medio de la reglamentación municipal sobre las construcciones y nuevos desarrollos urbanos.

Los sistemas de transporte filtrantes para la conducción de aguas de lluvia son recomendables en la construcción de carreteras y caminos rurales, lo que significaría un cambio en el paradigma de los actuales modelos de construcción (canales y tuberías impermeables).

El método de filtración a las márgenes de los ríos se podría aplicar en las épocas de exceso de lluvia para la obtención de agua de buena calidad, misma que podría almacenarse en balsas o en cisternas para su uso posterior o inmediato para el abastecimiento de comunidades o para otros usos.

La captación de agua de lluvia en techos combinada con la construcción de tanques cisterna es aplicable en comunidades aisladas para lograr el abastecimiento de agua de consumo pero también es aplicable en cabeceras municipales principalmente en edificios públicos tales como escuelas, mercados, salones de usos múltiples y salones comunales, así como en centros comerciales e incluso en nuevos desarrollos urbanos, para suplir de agua a la población usuaria de estos sitios y para evitar emergencias. La regulación de este tipo de construcciones podría incluirse en las reglamentaciones municipales de construcción.

En los campos de cultivo, en general, es importante impulsar el uso de prácticas de conservación de suelos, tales como acequias, terrazas, barreras vivas, barreras muertas; las que, además de contribuir a la protección de los suelos contra la erosión hídrica, favorecen la infiltración de agua a los acuíferos.

Cuadro 11. Síntesis de métodos de almacenamiento de agua aplicables en la vertiente del Pacífico de Guatemala.

Método	Aplicación
Balsas	Comunidades agrícolas (agua para riego)
Almacenamiento en tanques cisterna	Aguas superficiales y aguas de lluvia.
Métodos de distribución: inundaciones controladas, zanjas de infiltración, tanques de infiltración.	Uso de zanjas de riego para recarga en época lluviosa en zonas con suelos permeables
Pozos y pozos profundos	En terrenos impermeables (vertisoles)
Tratamiento suelo acuífero	Tratamiento de agua residual de casas o de comunidades
Represas de retención, presas perforadas	En corrientes efímeras, o semipermanentes en diferentes puntos de cuencas.
Sondeo, RAA, AATR	Pozos profundos de acuíferos confinados
Sistemas urbanos de drenaje sostenible	En ciudades, comunidades, carreteras
Filtración a las márgenes de los ríos y su almacenamiento por métodos superficiales.	Bombeo para obtener agua de buena calidad en las márgenes de los ríos en épocas de exceso.
Captación de agua de lluvia en techos y almacenamiento en tanques cisterna	En edificios públicos, comunidades dispersas, centros comerciales, considerarlos en reglamentación municipal.
Captación de agua de lluvia (prácticas de conservación de suelos)	En terrenos con cultivos en pendiente

7 Referencias bibliográficas

Adler, FJ. 2006. Los embalses y los recursos hídricos superficiales. Tucumán, Argentina. *Ciencias Exactas y Tecnología* (27): 51-62.

Agüero, R. 2008. Guía para el diseño y construcción de reservorios apoyados. Lima, Perú. CEPIS, OPS. 34 p.

Anaya Garduño, M y Martínez, JJ. 2007. Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para el uso doméstico y consumo humano. México. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Colegio de Postgraduados. Publicaciones Diamante. 151 p.

Anbazhagan, S.; Ramasamy, SM.; Das Gupta, S. 2005. Remote sensing and GIS for artificial recharge study, runoff estimation and planning in Ayyar basin, Tamil Nadu, India. *Environ Geology* (48): 158-170.

Ballén Suárez, J.A.; Galarza García, M.A. y Ortíz Mosquera, R.O. 2006. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia. Seminario Iberoamericano sobre sistemas de abastecimiento urbano de agua. João Pessoa, BR, se. s.p.

Berga Casafont, L. 2008. Forma y función de las presas de embalse. Barcelona. *Ingeniería y Territorio* 3(81): 80-85.

Bouwer, H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hidrology and engeneering. US, *Hydrogeology Journal* (10):121–142.

Burgueño Muñoz, Antonio. 2002. Beneficios medioambientales de las presas. In I Congreso de Ingeniería Civil: Territorio y Medio Ambiente. Madrid, v. 1. p. 883-891.

Casas, A. et. al. 2011. Guía metodológica para el uso de aguas regeneradas en riego y para recarga de acuíferos. ES. Consolider-Tragua, 45 p.

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar. Texturas de la zona cañera de Guatemala (en línea). Consultado 4 de sep. de 2012. Archivo PDF. Disponible en: <http://www.cengicana.org/es/mapas-zona-canera/Mapas/Suelos/Textura/>

Fernández Escalante, E. 2006. Gestión de la recarga artificial de acuíferos como práctica alternativa a la gestión hídrica: El proyecto DINA-MAR. In Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA 8): Cumbre del desarrollo sostenible. Madrid. ES. Grupo Tragsa, 32 p.

Fernández Escalante, AE.; García Rodríguez, M. y Villarroya Gil, F. 2006. Las acequias de careo, un dispositivo pionero de recarga artificial de acuíferos en Sierra Nevada, España: Caracterización e inventario. Madrid, ES, *Tecnología y Desarrollo*, 4: 33.

Fernández Escalante, EF; San Sebastián Sauto, J. 2012. Rechargeable sustainability: the key is storage. ES, DINA-MAR, Tragsa, *The Three water ways*. 57 p.

Generalitat Valenciana. 2009. Guías para el proyecto, construcción, explotación, mantenimiento, vigilancia y planes de emergencia de las balsas de riego con vistas a la seguridad. Valencia, ES, Addo impresores, 245 p.

Ghayoumian, J; Mohseni Saravi, M.; Feiznia, S; Nouri, B.; Malekian, A. 2007. Application of GIS techniques to determinate area most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* (30): 364-374.

Hidalgo, P; Sindoni, M.; Brito, J.J.; Martínez F. Navarro, M.; Medina, Y. 2008. Tanque artesanal tipo australiano una alternativa económica para riego de cultivos hortícolas en zonas rurales. *Venezuela, INIA. INIA Divulga* (11): 63-67.

IARNA (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente), Instituto de Incidencia Ambiental. 2004. Perfil Ambiental de Guatemala, informe sobre el estado del ambiente y bases para su evaluación. Guatemala, GT. F & G editores, p. 149-166.

Ingeniería León. S.A. s.f. Diseño de tanques de almacenamiento. s.n.t. 130 p.

Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca. s.f. Procedimiento para la realización de evaluaciones de riego por superficie. Andalucía, ES, se, 16 p.

Malinow, W. 2010. Presas de embalse y el reparo de las comunidades, ¿cómo superarlos? In. VI Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. Neuquén, AR. VICAPYAH, Comité Argentino de Presas. sp.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA). 2000. Mapa de clasificación taxonómica de suelos de la república de Guatemala. GT. escala 1:250,000. se.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino. (2008). Gestión de la recarga de acuíferos: su implicación contra la desertificación. Tipologías y dispositivos de recarga artificial. ES, se, 10 p.

Gale, E. (ed). 2005. Estrategias para la gestión de recarga de acuíferos (GRA) en zonas semiaridas. Paris. UNESCO, 30 p.

Pavón R. V. M. 2001. Diseño y construcción de estructuras de concreto para contener líquidos. México. Fundación ICA AC, Universidad Autónoma del Estado de México, se, 225 p.

Perales Momparler, S; Domenech, IA. s.f. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible. Valencia, ES, se, 15 p.

Prado. 2012. Tanque de agua: recipiente de vida (en línea). Consultado 25 jun. 2012. Artículo Web. Disponible en: <http://www.articulosweb.net/ambiente-natural/tanque-de-agua-recipiente-de-vida>.

Proyecto de Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina (PREDECAN). 2009. Sembrando agua. Manejo de microcuencas: Agua para la parroquia de Catacocha y las comunidades rurales. Lima, PE, (Serie Experiencias significativas de desarrollo local frente a los riesgos de desastres), se, 28 p.

Ray, S. Artificial recharge. 2002. In. International Water and Sanitation Centre (IRC). Small community water supplies: Technology, people and partnership. NL. Smet, J.; Wijk, Ch van (eds), se, p 102-128.

Ravi Shankar, M. N.; Mohan, G. 2005. A GIS based hydrogeomorphic approach for identification of site specific artificial recharge techniques in the Deccan Volcanic Province. IN. *Journal Earth System Science*, (114): 505-514.

Rivera, K.; Fuentes, D. 2003. Soluciones Innovadoras para el suministro de agua en comunidades rurales dispersas en Honduras. Programa de Agua y Saneamiento, Región América. Perú, Biblos. 11 p.

Red de Aprendizaje, Intercambio y Sistematización de Experiencias hacia la Sostenibilidad; Instituto de Investigaciones Sociales de la Universidad Nacional Autónoma de México; Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Gobierno del estado de Michoacán. 2005. II Seminario Taller: Gestión territorial del agua y servicios ambientales. Patzacuaro, Michoacán, MX. se. p. 18-20.

Rodero Oña, B. s.f. Depósitos para riego. Valladolid, ES, Escuela Universitaria de Ingeniería. 10 p.

Rodríguez Bayron, J, et. al. s.f. Sistemas urbanos de drenaje sostenible: SUDS. ES, Grupo de investigación de la tecnología de la construcción; Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander; Universidad de Cantabria; 25 p.

Rotoplast. S.f. Sistema séptico domiciliario (en línea). Bogotá. CO. Consultado 27 jun. 2012. Disponible en <http://www.rotoplast.com.co/sistema-septico-domiciliario/>

Sánchez Gullén, JL. s.f. Biología y geología (en línea). ES. Consultado 27 jun. 2012.

Oviedo, ES. Disponible en

http://web.educastur.princast.es/proyectos/biogeo_ov/3ESO/01_relieve/TEST.htm.

Segura Graíño, R y Sánchez Cabezas, F. J. 2008. Situación general de las balsas y pequeños embalses en España. In II Congreso Internacional sobre proyecto, impermeabilización y construcción de balsas. Palma de Mallorca, ES, se, 7 p.

Sight, Rejendra. 2009. Community driven approach for artificial recharge TBS experience. Rajasthan, IN, Tarum Bharat Sangh 5 p.

Stephens, T. 2010. Manual on small earth dams. A guide to siting, design and construction. Roma. FAO Irrigation and Drainage Paper (64):114 p.

Sotomayor, M; Choquevilca, W. 2009. Experiencias campesinas en la protección y gestión de manates: El caso de la mancomunidad de municipalidades rurales Hermanos Ayar, Cusco, PE. In. Sepia XIII. Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco, CBC. se. 31 p.

Tredoux, G.; Merwe, Van der y Peters, I. 2009. Artificial recharge of the Windhoek aquifer, Namibia: Water quality considerations. Boletín Geológico y Minero, 120 (2): 269-278.

Villatoro, B., Melgar, M. 2010. Cosecha de agua de lluvia una fuente alternativa de aprovechamiento hídrico e los períodos de estiaje de los ríos. In. Memoria Presentación de resultados de investigación Zafra 2009-2010. GT, Cengicaña, p. 301-317.

Winter, T. et. al. 2002. Ground water and surface water a single resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. U.S. Government Printing Office. 69 p.