



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INENIERÍA

**Análisis de la normativa oficial vigente
relacionada con el agua subterránea y
propuestas para mejorar su manejo y
gestión integral; en México**

TESINA

Que para obtener el título de
Especialista en Agua subterránea

P R E S E N T A

José Emiliano Cruz Lozano

DIRECTOR DE TESINA

Ing. Gabriel Salinas Calleros



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Introducción.....	3
1. Análisis de las metodologías establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas y propuestas para su modificación.....	4
1.1 NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.....	4
1.1.1 Contenido técnico	4
1.1.2 Análisis de las metodologías descritas en la Norma.....	7
1.1.3 Calculo de la disponibilidad en el marco internacional.....	13
1.2 NOM-014-CONAGUA-2003 Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada y NOM-015-CONAGUA-2007 Infiltración artificial de agua a los acuíferos. - Características y especificaciones de las obras y del agua	18
1.2.1 Contenido técnico	19
1.2.3 Análisis de la normativa de recarga gestionada en el marco internacional	22
1.3 Análisis comparativo de las normativas	27
1.4 Propuestas para modificar y precisar las normas	30
2. Gestión actual del agua en México	34
2.1 Retos y problemas del agua subterránea en México	35
2.2 Gestión Integral de los recursos hídricos	35
2.3 Mejora del manejo y la gestión integral mediante las propuestas de modificación a las NOM-011-CONAGUA-2015, NOM-NOM-014-CONAGUA-2003 y 015-CONAGUA-2007.....	40
Conclusiones.....	41
Referencias	42

Introducción

En el mundo, el agua subterránea se presenta como una fuente de abastecimiento importante que ayuda a mitigar las problemáticas relacionadas con la disponibilidad actual de agua principalmente para consumo humano. En el caso de México, a lo largo de los años una deficiente gestión y administración de este recurso ha generado problemas de escasez, contaminación y agotamiento de acuíferos (Cruz-Ayala y Megdal, 2020; Jiménez Cisneros et al., 2010). Aunado a esto, el impacto del cambio climático agrava las problemáticas existentes, por ejemplo, la intrusión marina en los acuíferos costeros, la cual ocurre principalmente por la excesiva extracción de agua dulce, que rompe el equilibrio agua dulce-agua salada, se ve aumentada debido al aumento del nivel del mar (Escolero Fuentes et al., 2017). La complejidad en la problemática del agua se debe a que esta es multisectorial, multinacional y a la diversidad de valores que tiene (social, económico, cultural y ambiental) (Academia de Ingeniería de México, 2010).

Un factor clave para solucionar estos desafíos es contar con un marco legal robusto, lo que implica modificar el marco regulatorio actual del agua mexicano (Cruz-Ayala y Megdal, 2020; Jiménez Cisneros et al., 2010). Para ello, es vital reconocer en la legislación que la información técnica y científica, debe ser aplicada en conjunto con la participación activa de la sociedad en la gestión del agua (Jiménez Cisneros et al., 2010).

Dentro de la legislación del agua mexicana, existen las normas oficiales mexicanas (NOM) las cuales son regulaciones técnicas de observancia obligatoria que establecen reglas, especificaciones, atributos, aplicables a un proceso, instalación, sistema o actividad, estas encuentran su fundamento en la LGEEPA y en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (Carvajal Isunza y Basurto González, 2004). La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), elabora las NOM sobre la explotación, uso, aprovechamiento y administración de las aguas nacionales y de los bienes nacionales enunciados en el artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2016). El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, faculta al ejecutivo federal para reglamentar la extracción y la utilización de las aguas nacionales, así como para establecer las zonas de veda y el aprovechamiento de las aguas nacionales a la obtención de una concesión por parte del ejecutivo federal (Carvajal Isunza y Basurto González, 2004).

En el presente trabajo se realizó una amplia revisión de las NOM-011-CONAGUA-2015, NOM-014-CONAGUA-2003 y NOM-015-CONAGUA-2007, que regulan el uso, caracterización, aprovechamiento y explotación del agua subterránea, así como de la normativa internacional similar a esta, con el objetivo de comparar las diferencias en los marcos regulatorios y con base en estas y en las experiencias

recopiladas, elaborar propuestas para su modificación considerando las regulaciones que se establecen en la LAN sobre el aprovechamiento de las aguas nacionales.

Objetivo

El objetivo principal es analizar las metodologías y disposiciones de las normas oficiales mexicanas 011-CONAGUA-2015, 014-CONAGUA-2003 y 015-CONAGUA-2007, de aplicación al agua subterránea, así como realizar propuestas para mejorar su comprensión y aplicación, a fin de intentar mejorar el manejo y gestión integral del agua en México.

1. Análisis de las metodologías establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas y propuestas para su modificación

De las 11 normas oficiales por parte de la CONAGUA, 5 son las que están relacionadas al estudio, uso y aprovechamiento del agua subterránea (CONAGUA, 2016). En este capítulo se analiza el contenido técnico de las normas 011, 014 y 015, mediante su comparación con métodos y procedimientos encontrados en la literatura o utilizados en otros países para los mismos fines. Al final del capítulo se plantean propuestas para precisar o modificar los procedimientos técnicos, especificaciones o el contenido en general de las normas.

1.1 NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Esta Norma, publicada el 27 de marzo de 2015, en el Diario Oficial de la Federación (DOF), tiene por objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual del agua nacional tanto superficial como subterránea. La importancia de calcular la disponibilidad de los acuíferos radica en que con base en ella se otorgan concesiones para la extracción, uso y aprovechamiento del agua subterránea y se toman decisiones sobre el manejo de los acuíferos (Chávez et al., 2006; SEMARNAT, 2015).

1.1.1 Contenido técnico

Para determinar la disponibilidad media anual de agua de un acuífero, se realiza un balance, cuyos componentes se indican en el punto 4.3 de la Norma (figura 1). El

balance de agua se basa en el principio de conservación de la materia, donde se considera al acuífero como la unidad de volumen de almacenamiento (Custodio, 2001), sus componentes se deben calcular con la mayor precisión posible para evitar obtener resultados demasiado sesgados. Los métodos para calcular cada componente se indican en la Norma, mismos que serán analizados a continuación.



Figura 1. Ecuación de balance para calcular la disponibilidad media anual de agua del subsuelo

A) Recarga total media anual

El cálculo de este factor se realiza con base en un balance de agua del subsuelo, que en su forma más simple se describe como (1) $\Delta S = Entradas - Salidas$, de esta ecuación se despejan las entradas representadas por la *Recarga Total (RT)* y resulta la ecuación de la figura 2, donde se suman las salidas (*Descarga total*) al cambio de almacenamiento (ΔS). En la Norma se sugiere que el intervalo para calcular la *RT* sea de varios años, que incluya períodos secos y lluviosos para obtener un valor más representativo, aunque, el intervalo mínimo permitido es de un año. También se menciona que debido a que las expresiones y conceptos utilizados son descritos de manera simple es necesario revisar la bibliografía para conocerlos a detalle, sin embargo, no se mencionan las referencias exactas donde encontrar estos conceptos y algunas son de difícil acceso. El cálculo de la Recarga Total Media Anual es el que requiere un mayor desarrollo, por lo que la norma dedica el apéndice normativo "B" para detallarlo.

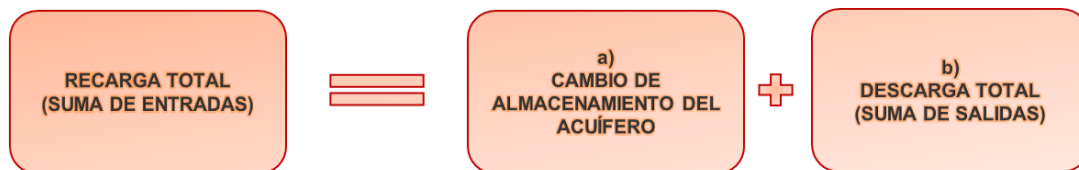


Figura 2. Ecuación de balance para calcular la Recarga Total Media Anual

a) Cambio de almacenamiento

La estimación de este componente se hace a partir de la evolución de los niveles de agua subterránea correspondientes al mismo intervalo y de valores representativos del coeficiente de almacenamiento, el cual puede estimarse a partir de una prueba de bombeo o mediante las características del material del acuífero.

b) Descarga total (DT)

Se calcula tomando en cuenta todos los volúmenes de agua que salen del acuífero ya sea natural o artificialmente, durante el mismo intervalo. Las

descargas naturales comprometidas se consideran dependiendo si aplica o no a cada acuífero.

La ecuación para calcular la DT escrita de manera extendida se plantea como (2)

$$DT = Q_b + Q_m + Et + Q_s + B.$$

- El *caudal base* (Q_b) se determina a partir del análisis de hidrogramas para diferenciar el caudal base, las mediciones también se deben realizar durante el período de estiaje.
- La descarga a través de un *manantial* (Q_m) se estima integrando el área bajo el hidrograma, esto es, multiplicando el intervalo de balance por el gasto medio correspondiente.
- La descarga de agua subterránea por *evaporación* (Et) directa se estima multiplicando el área por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial medida en las estaciones meteorológicas. A pesar de lo anterior, se indica que debido a la dificultad que representa su cálculo a escala de acuífero, su valor no se estimará por separado y este quedará implícito en el resultado del balance. Cabe aclarar que este parámetro se calcula en casos específicos, por ejemplo, cuando los niveles estáticos son menores a 10 m.
- La *descarga subterránea* (Q_s) se calcula aplicando la Ley de Darcy en las secciones de salida definidas en la configuración de niveles del agua subterránea, considerando las variaciones de esta a lo largo del tiempo usado en el balance.
- La *extracción* se determina a partir de las lecturas registradas en los medidores instalados en las descargas de los pozos o con base en métodos indirectos: caudal y tiempo de bombeo, consumo de energía eléctrica, población servida y dotación, índices de consumo, superficies y láminas de riego.

B) DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA

Se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por un acuífero, más las descargas que se deben de conservar para no afectar a acuíferos adyacentes, para sostener el uso ambiental y prevenir la inmigración de agua de mala calidad al acuífero considerado.

C) EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se obtiene sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes que se encuentren en proceso de registro y titulación, y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, determinados para el acuífero de que se trate, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en

zonas de libre alumbramiento, la extracción de agua subterránea será equivalente a la suma de los volúmenes de agua extraídos estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Los volúmenes de agua inscritos en el Registro Nacional Permanente no serán contabilizados en la extracción para fines de la determinación de la disponibilidad de agua, a menos que las verificaciones de campo demuestren que son extraídos físicamente.

1.1.2 Análisis de las metodologías descritas en la Norma

La ecuación de balance subterráneo es la metodología más comúnmente utilizada por las autoridades del agua para calcular el volumen de extracción sustentable o tomar decisiones sobre el manejo de los acuíferos, aunque estos cálculos muchas veces no proveen información confiable y es necesario combinarlo con un monitoreo continuo (Viaroli et al., 2018). A pesar del extenso uso del balance para calcular la disponibilidad, existen varios autores que consideran que este método no incluye todos los factores que están involucrados en la dinámica del agua subterránea (Bredehoeft, 2002; Demiroglu, 2019; Zhou, 2009). Una de las premisas principales que se asumen y bajo la cual generalmente se realiza la gestión del agua subterránea es que la tasa de extracción no debe exceder la tasa de recarga natural, lo cual se ha comenzado a considerarse obsoleto desde los años 80's (Demiroglu, 2019). No obstante, en México y en otros lugares como India, la unión europea y California, aún se calcula la disponibilidad de agua realizando balances de agua.

La metodología planteada en la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, resulta en una ecuación que carece de elementos para obtener un resultado certero de la disponibilidad al pasar por alto elementos importantes sobre la dinámica del agua subterránea, por ejemplo, Carrillo Rivera et al., (2016) realiza una crítica a la misma al señalar la simpleza con la que se maneja el cálculo de la disponibilidad en ella, entre otros argumentos menciona que, es un error considerar que una parte del agua de lluvia de un año ingresa al acuífero sin considerar el tiempo de traslado, profundidad al nivel estático y el tipo de acuífero, esto coincide con lo dicho por autores como Bredehoeft (2002), Demiroglu (2019) y Zhou (2009). El primer factor que se analiza de la ecuación de disponibilidad es la recarga total media anual.

1.1.2.1 Recarga Total Media Anual

La importancia de estimar correctamente la recarga de los acuíferos reside en que esta es una parte fundamental del cálculo de la disponibilidad (Chávez et al., 2006). Calcular la recarga que ingresa a un acuífero es un proceso donde se deben tomar en cuenta una serie de parámetros que intervienen en ella. Existen una serie de métodos documentados para medir la tasa de recarga, se pueden clasificar con base en la procedencia de los datos (zona superficial, zona no saturada y zona saturada) y posteriormente en el tipo de técnica (métodos físicos, de trazadores químicos, balance de agua y modelado) (Healy y Scanlon, 2010; Scanlon y Healy, 2002); otra manera más sencilla de clasificarlos es la utilizada por Vélez y Vásquez, (2004) estas son: Medidas directas, balance de agua, técnicas de Darcy, Técnicas de trazadores y métodos empíricos, en la tabla 1 se resumen algunas ventajas y desventajas en el uso de cada uno de ellos.

Método	Ventajas	Desventajas
Medidas directas	Se basan en la aplicación de un balance de masa implícito. Pueden ofrecer resultados inmediatos, estacionales o anuales	Son costosos y ofrecen medidas puntuales.
Balance hídrico	Son "sencillos" de aplicar, rápidos y de bajo costo de inversión, consideran un amplio número de variables, facilidad de procesamiento de datos.	Si se realizan muchas simplificaciones se corre el riesgo de tener una gran incertidumbre. Su exactitud depende de la certeza con la que fueron medidos sus componentes
Técnicas de Darcy	Puede aplicarse para regiones de hasta 10,000 km ² . Posibilidad de usar modelos para obtener resultados	Dependen de la exactitud con la que se miden las propiedades hidráulicas y a su variabilidad espacial.
Técnicas de trazadores	Es posible estimar flujos más pequeños que con otros métodos.	Solo ofrecen una medida indirecta de la recarga, lo que ocasiona sobreestimación o subestimación
Empíricos	Es el método más sencillo de aplicar. Utiliza variables hidrogeológicas que se pueden medir directamente (precipitación, temperatura, elevación del nivel estático, flujo en canales, etc.)	Pueden llegar a utilizarse como "cajas negras". Rango de validez limitado. No se ha demostrado que se pueden aplicar a grandes áreas.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos para calcular la recarga (Vélez y Vásquez, 2004)

En la normativa mexicana se utiliza un balance hídrico simplificado (figura 2), sin embargo, este método comprende varias metodologías que se basan en: la humedad del suelo, balance de ríos y canales, el aumento del nivel freático y la descarga por cuenca (Vélez y Vásquez, 2004), en la tabla 2 se resumen los fundamentos de cada uno.

Tipo de balance	Fundamento	Ecuación
-----------------	------------	----------

Balance de ríos y canales	Existen 2 métodos, por medidas del caudal (ec. 1) y por encharcamiento (ec. 2) donde se mide el cambio del nivel del agua de una sección.	$1. R = Q_{A.Arriba} - Q_{A.Abajo} + \sum Q_{Entra} - \sum Q_{Sale} - E - \frac{\Delta S}{\Delta t}$ $R = \text{Recarga}, Q_{A.Arriba} = \text{Flujo aguas arriba}, Q_{A.Abajo} = \text{Flujo aguas abajo}, Q_{Entra} = \text{Flujo de entrada},$ $2. q = (d_1 - d_2) \frac{(W_1 + W_2)}{(2t)}$ $W_1 = \text{Ancho promedio inicial}, W_2 = \text{Ancho promedio después de un tiempo } t, d_1 = \text{Profundidad media inicial}, d_2 = \text{Profundidad media después de un tiempo } t.$
Aumento de nivel freático	La recarga es igual al volumen almacenado en el acuífero como producto de un aumento de nivel freático.	$R = S_Y \frac{dh}{dt} = S_Y \frac{\Delta h}{\Delta t}$
Descarga de la cuenca	La descarga por flujo base promedio de la cuenca se iguala a la recarga neta promedio más la tasa de extracción.	Descarga promedio = Recarga neta promedio + tasa de extracción

Tabla 2. Métodos de balance para calcular la recarga (Vélez y Vásquez, 2004)

Cabe mencionar que una parte de la *Recarga Total Media Anual*, lo forman las entradas de flujo horizontal, el retorno por el riego y las fugas; las primeras se calculan como tubos de entra aplicando la Ley de Darcy, para lo cual se utilizan datos de transmisividad obtenidos de pruebas de bombeo, que muchas veces tienen más de 10 años, y se deja de lado que el espesor saturado ha cambiado por efectos del abatimiento de los niveles.

A continuación, se analiza y compara los procedimientos para estimar los componentes *Cambio de Almacenamiento del acuífero* y *Descarga total* de la ecuación para el cálculo de la *Recarga Total Media Anual*.

a) Cambio de Almacenamiento

La metodología descrita en la Norma para calcular este parámetro se basa en medir las fluctuaciones del nivel del agua subterránea de un periodo a otro y multiplicar este valor por el coeficiente de almacenamiento. En los documentos de actualización de la disponibilidad de los acuíferos mexicanos se pueden encontrar ejemplos de su aplicación, uno de ellos el documento de actualización del acuífero Tijuana, se utiliza la ecuación (4) $\Delta V = S_y * A * h$, donde S_y es el coeficiente de almacenamiento, A el área entre curvas de igual evolución del nivel del agua subterránea y h el valor de la variación de estos niveles (CONAGUA, 2020). Al final, el resultado es un promedio de la fluctuación del agua subterránea en toda el área.

La principal ventaja de usar la ecuación 4, es la sencillez de su aplicación, puesto que solo se consideran 2 variables hidrogeológicas (h y S_y). Lo anterior debido a que se asume que el proceso de recarga y descarga dentro del sistema se puede cuantificar mediante la fluctuación de niveles del agua subterránea a través del tiempo y adicionalmente, no se toma en cuenta el mecanismo de movimiento del

agua a través de la zona no saturada y por tanto la existencia de flujos preferenciales no afectan su uso (Koïta et al., 2018). En consecuencia, calcular el coeficiente de almacenamiento y tomar correctamente las lecturas de los niveles del agua subterránea es de vital importancia.

La ecuación 4 es muy similar a la utilizada en el método de fluctuación de niveles del agua subterránea, (5) $R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$, donde, R es la recarga, t es el tiempo, h es la altura del nivel de agua subterránea, y S_y es el rendimiento específico; de acuerdo con Healy y Cook, (2002), este método se utiliza principalmente para calcular la recarga en períodos cortos (horas a días), sin embargo también es posible aplicarla para calcular el cambio en el almacenamiento (ΔV) en intervalos anuales o estacionales.

La aplicación de la ecuación 4, presenta limitaciones que no se mencionan en la Norma 011, por ejemplo:

- Funciona mejor para acuíferos libres poco profundos porque los cambios de nivel del agua subterránea se notan con mayor facilidad en eventos de precipitación (Healy y Cook, 2002).
- La precisión de la estimación dependerá en gran medida de calcular correctamente el coeficiente de almacenamiento y de identificar las causas de las fluctuaciones del nivel (Healy y Cook, 2002).
- Las mediciones deben ser tomadas preferentemente lejos de la influencia de pozos de extracción (Koïta et al., 2018).
- Algunas de las causas que ocasionan los cambios de niveles del agua subterránea son: cambios de la presión atmosférica, aire atrapado u otros mecanismos más complejos (Healy y Cook, 2002). Rahi y Halihan (2012) (En: Koïta et al., 2018) menciona que otra de las causas de la fluctuación son los cambios de presión atmosférica, que afectan instantáneamente el nivel del agua dentro del pozo, mientras que en el acuífero estos efectos presentan un retraso.

- Métodos alternativos

Debido a la falta de datos de monitoreo y en general a las limitantes abordadas anteriormente, existe un mayor interés en monitorear los cambios de almacenamiento mediante técnicas de percepción remota, en especial los satélites Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) (Scanlon et al., 2012). Existen, además, otras técnicas que combinan diferentes métodos, como el de fluctuación de niveles con métodos geofísicos (Koïta et al., 2018) o utilizan datos de GRACE en conjunto con datos de Sentinel-1 (Vasco et al., 2022) para obtener mejores resultados.

El uso de los datos de la misión GRACE para estimar el cambio de almacenamiento de agua subterránea, ha sido uno de los métodos más estudiados desde su lanzamiento en 2002 (Chen et al., 2016; Leroux y Pellarin, 2017). La misión satelital GRACE tiene como objetivo principal mapear las variaciones del campo gravitacional de la Tierra (Tapley et al., 2004). Fue lanzada por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y el *German Aerospace Center* (DLR) en el año 2002 y consta de 2 satélites gemelos que orbitan la Tierra, separados 220 km entre sí y a 450 km sobre la superficie terrestre (Rodell et al., 2007; Scanlon et al., 2012).

Los satélites miden la perturbación en su órbita debida a anomalías cercanas a la superficie del campo gravitacional terrestre, con una resolución de 2 a 3 milímetros y cuentan con un área de cobertura de 200,000 km² (Leroux & Pellarin, 2017; Tapley et al., 2004). Las mediciones obtenidas permiten producir un mapa global de los cambios en el campo gravitacional de la Tierra con una resolución espacial de hasta 300 km y con una periodicidad de 10 días hasta mensualmente (Leroux y Pellarin, 2017; Scanlon et al., 2012). Estos cambios son provocados por la redistribución de la masa en la superficie terrestre (Rodell et al., 2007). Una vez que se remueven las contribuciones de las corrientes oceánicas, presión atmosférica y de los casquetes polares, queda el cambio en el almacenamiento de agua continental, lo que aumenta en un factor de 1000 la resolución de los mapas gravitacionales de la Tierra (Leroux y Pellarin, 2017).

De esta manera, GRACE puede observar el cambio del almacenamiento total de agua (TWS por sus siglas en inglés) dentro de una columna vertical, incluida la humedad de la atmósfera, el agua superficial, el agua subterránea y la humedad del suelo; sin embargo, para separar la componente de agua subterránea es necesario procesar la información del TWS, para lo cual se hace uso de modelos especializados (Chen et al., 2016; Scanlon et al., 2012).

Algunas metodologías utilizadas para obtener estimaciones del cambio de almacenamiento subterráneo mediante el procesamiento de datos de GRACE se pueden consultar en Rodell et al. (2007), Scanlon et al. (2012) y Vasco et al. (2022).

Esta técnica ha sido utilizada para estimar el cambio de almacenamiento subterráneo a largo plazo en varias regiones del mundo, algunos ejemplos citados en Chen et al. (2016) son: Noroeste de India, el acuífero de High Plains, el Valle Central en Estados Unidos, la Llanura del norte de China y el Medio Este, y sur de la Cuenca de Murray–Darling en Australia. Además de estos lugares, otros sitios donde se ha usado esta metodología son: en la Cuenca de Tulare, California (Vasco

et al., 2022), en el Valle Central de California (Scanlon et al., 2012) y en la cuenca del río Mississippi (Rodell et al., 2007).

El uso y procesamiento de datos de GRACE tiene ventajas sobre otras metodologías, como la utilizada en la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, las cuales facilitan su aplicación, no obstante, presenta algunas desventajas que restringe su aplicación para todo tipo de acuíferos, las cuales están enlistadas a continuación:

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> -No se requiere realizar mediciones de los niveles del agua del acuífero. -No es necesario obtener el coeficiente de almacenamiento del material del cual se compone el acuífero. -Se puede estimar el cambio de almacenamiento para acuíferos de gran extensión. -Requiere una menor inversión en infraestructura de monitoreo para tomar mediciones. 	<ul style="list-style-type: none"> -La resolución espacial (200-500 km) limita la estimación del TWS en áreas subregionales (Chen et al., 2016). -La estimación depende en gran medida de la correcta separación del componente de agua subterránea del TWS. -Existe una mayor incertidumbre para regiones húmedas, debido a los grandes cambios estacionales en el almacenamiento subterráneo. -Usar series de tiempo de pocos años aumenta la incertidumbre de los resultados (Chen et al., 2016). -Funciona mejor para calcular el cambio de almacenamiento a largo plazo. - Son requeridos registros de algunos años de niveles de agua subterránea para evaluar si GRACE captura correctamente las variaciones de almacenamiento.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del uso de datos satelitales Grace.

Con base en las ventajas enlistadas, Rodell et al. (2007) señala que utilizar este método podría ser la mejor solución en países con poca infraestructura para el monitoreo del agua subterránea.

Otro método para la estimación del cambio de almacenamiento, se presenta en Koïta et al. (2018), donde se combina el método WTF con sondeos de resonancia magnética (SRM) con el objetivo de aumentar la precisión de los resultados, se utilizaron los datos de los SRM para calcular el coeficiente de almacenamiento S_y a través de la ecuación empírica (6) $S_y = 0.53 * W_{MRS} + 0.007$, la cual fue deducida por Vouillamoz et al. (2007), y posteriormente se calculó el cambio de almacenamiento subterráneo mediante la ecuación (5) del método de fluctuación del nivel estático. Se concluyó que el acoplamiento de estos métodos es una herramienta económica, rápida y eficiente, si se compara con las pruebas de bombeo, y permitió calcular adecuadamente el cambio de almacenamiento.

b) Descarga total

La descarga total se calcula como la ecuación (2), sin embargo, tomando en cuenta las consideraciones que incluye la norma, el cálculo de la descarga total se puede realizar, dependiendo del tipo de acuífero y que tenga niveles estáticos mayores a 10 m, tomando en cuenta solamente la descarga subterránea Q_s y la extracción B , por lo que la ecuación queda como (7) $DT = Q_s + B$.

El volumen de extracción se obtiene a partir de datos que no son adquiridos con total certeza y por lo tanto generan incertidumbre en el cálculo de la descarga total (Carrillo Rivera et al., 2016). A pesar que la Norma menciona que se deberían tomar en cuenta las lecturas de los medidores o utilizar métodos indirectos para su cálculo, muchas veces se suman los volúmenes registrados en el REPDA, los cuales no necesariamente representan el volumen que se extrae del acuífero debido a diversos factores, los principales son la presencia de pozos clandestinos, la falta o falla de medidores volumétricos, lo cual no permite verificar que los volúmenes que se mencionan en el REPDA representen fielmente la extracción.

1.1.3 Cálculo de la disponibilidad en el marco internacional

En este apartado se sintetizan las normativas que señalan el método para calcular la disponibilidad de agua subterránea de 3 sitios: California, la Unión Europea e India. Lo anterior con el objetivo de señalar las similitudes y diferencias con la normativa mexicana y con base en ellas, elaborar propuestas para su revisión y posible modificación, las cuales son presentadas en el apartado 1.4. Estos lugares se eligieron debido a que realizan un uso intensivo del agua subterránea al igual que México; en el caso de California e India a la diferencia de valor que le asignan al agua a diferencia de México; además que la información disponible acerca de su normativa resultó ser de fácil acceso.

California

En el estado de California no se tiene un documento oficial similar a la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales donde se indiquen las especificaciones para el cálculo de la disponibilidad, sino que las agencias locales encargadas de la gestión del agua subterránea llamadas "*Groundwater Sustainability Agencies*" (GSA) elaboran un Plan para la Sustentabilidad del agua subterránea (GSP por sus siglas en inglés) donde, entre otras cosas, establecen el método para calcular la disponibilidad a utilizar dentro de su cuenca (SGMA, 2014). No obstante, el contenido de los planes

es revisado y autorizado por la autoridad estatal del agua. Los componentes que las agencias locales deben incluir en sus planes de gestión, así como el criterio y los métodos que utilizará el departamento del agua para evaluar dichos planes, se mencionan en el “*Groundwater Sustainability Plan Regulations*”, el cual es el subcapítulo 2 del título 23 llamado “*Waters*” del “*California Code of Regulations*”.

El subartículo 2 “*Basin Setting*” del artículo 5 “*Plan Contents*” del documento antes mencionado, contiene un apartado llamado “*Water Budget*” donde se especifican las características del balance de agua que los planes deben de incluir. Este apartado es lo más semejante que existe a la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, en el que se detalla las características con las que se deben de realizar los balances de agua subterránea y superficial. Los puntos más destacados son los siguientes:

1) Los balances de las cuencas deben incluir el volumen tanto de agua superficial como subterránea.

2) Cada Plan debe elaborar 3 tipos de balance, condiciones históricas, actuales y proyectadas a futuro, bajo los siguientes lineamientos.

- Actual: Se cuantifican las salidas y entradas, así como el cambio de almacenamiento, utilizando la información más reciente.
- Histórico: Se utiliza para evaluar la confiabilidad de las fuentes de agua superficial y del acuífero, en respuesta a la demanda y suministro de agua de acuerdo con el tipo de año hidrológico.
- Proyectado: Se hace con el fin de estimar las condiciones de referencia futuras de la hidrología, la demanda y la respuesta del acuífero.

3) Los balances deben cuantificar lo siguiente, ya sea mediante mediciones directas o estimarlo mediante datos confiables:

a) Entradas y salidas de agua subterránea y superficial, clasificadas por tipo de fuente para las entradas y por sectores que la utilizan para las salidas. El cambio en el volumen anual de almacenamiento de agua subterránea.

b) En caso de sobreexplotación, incluir una cuantificación de ella durante un período de años durante el cual el año hidrológico y las condiciones del suministro de agua se aproximen a condiciones promedio.

c) El tipo de año hidrológico asociado con el suministro anual, demanda y cambio de almacenamiento subterráneo (El año hidrológico se refiere al periodo entre el 1 de octubre y el 31 de septiembre. Existen 5 tipos de años hidrológicos: húmedo, sobre lo normal, debajo de lo normal, seco y críticamente seco).

d) Un estimado del rendimiento sostenible de la cuenca.

4) Para el desarrollo de cada balance se debe utilizar la siguiente información (otorgada por el departamento), u otros datos de calidad comparable.

- ❖ Balance histórico: Información de la temperatura media anual, la precipitación media anual, el tipo de año hidrológico y el uso de la tierra.
- ❖ Balance actual: Información de temperatura, tipo de año hídrico, evapotranspiración y uso del suelo.
- ❖ Balance proyectado: Información del crecimiento poblacional, tipo de año hídrico, cambio climático y aumento del nivel del mar.

5) Los balances se deben elaborar con la información más actuable y confiable disponible. El departamento brindará dos modelos numéricos de agua subterránea y superficial para estimar el balance, de lo contrario cada Agencia podrá optar por usar un modelo diferente o emplear y describir una herramienta igualmente eficaz para evaluar las condiciones proyectadas.

Aunado a los puntos anteriores, la autoridad estatal del agua con el fin de apoyar a las agencias a elaborar los balances hídricos publicó el libro *“Handbook for Water Budget Development”* (California Water Resources, 2020), en el cual se explican ampliamente una serie de metodologías para desarrollar un balance hídrico.

Unión Europea

En la Unión Europea se implementó la Directiva Marco del Agua (DMA), con el propósito de establecer un marco de trabajo para la protección del agua superficial, agua transicional, agua costera y agua subterránea. Dentro de esta directiva se señala que los países miembros deben de presentar un plan de gestión de cuencas fluviales, donde deben incluir: la descripción de las características del agua superficial y subterránea de la cuenca, y un resumen de la presión que la actividad humana ejerce sobre el estado del agua subterránea (European Parliament Council of the European Union, 2000).

De manera similar a California, en la comunidad europea no existe una legislación donde se establezca una metodología para realizar el balance de aguas, a pesar de ello, la Comisión Europea publicó en 2015 el *“Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD”*. El principal objetivo de la guía es ayudar a los administradores del agua y cuencas fluviales a establecer y aplicar balances hídricos como herramientas esenciales para la gestión eficaz de los recursos hídricos (European Commission, 2016). Esta guía consta de 7 capítulos, donde además de describir la metodología para la elaboración de un balance hídrico, se presentan ejemplos prácticos de su aplicación, las limitantes y

dificultades, y como pueden ser usados para apoyar la gestión del agua con el objetivo de implementar la DMA.

La metodología para la implementación del balance de la cuenca se basa en la ecuación de balance, pero hace hincapié en que en el ciclo hidrológico influyen tanto parámetros físicos como antropogénicos, por lo que describe dos ecuaciones de balance, la siguiente describe solamente un sistema natural abierto:

$$(8) P + ExIn = R_s + R_{Sub} + R_{gw} + Es + E_i + E_t \pm \Delta S$$

Donde P es precipitación, $ExIn$ Flujos externos (superficial y subterránea) que ingresan al sistema, R_s , R_{Sub} y R_{gw} escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea respectivamente, Es , E_i y E_t evaporación superficial, interceptación y por transpiración respectivamente. La ecuación que incluye los aspectos antropogénicos se describe a continuación.

$$(9) P + ExIn + RET = Eta + Outflow + ABS \pm \Delta S$$

Entradas = $(P + ExIn + RET)$; Salidas = $(Eta + Outflow + ABS)$

Donde $ExIn$ es el volumen total del flujo de los ríos y el agua subterránea que ingresa a la unidad hidrológica de análisis de otras unidades, RET es el volumen de agua producida por unidades económicas, que se descarga en la unidad hidrológica como agua tratada o no. Eta es la evapotranspiración total, $Outflow$ el volumen total de agua superficial y subterránea que sale de la cuenca naturalmente y ABS el volumen total de agua subterránea y superficial que se extrae del sistema para cualquier clase de aprovechamiento.

India

La india extrae aproximadamente 230 km³ de agua subterránea al año, siendo el país que más agua extrae (Rangan, 2016). Por tal motivo, es muy importante tener una buena evaluación del almacenamiento de agua subterránea, para ello el gobierno indio creó en 1984 el “*Ground Water Estimation Committee*” (GEC) con el objetivo de elaborar una guía para la implementación de la metodología de la estimación del recurso hídrico subterráneo (Ministry of Water Resources, 2017). En 1997 el GEC actualizó la metodología, basándose en la ecuación de balance. Tal documento se ha actualizado a través de los años, la última versión es de 2015. El documento se titula “*Detailed Guidelines for Implementing the Ground Water Resource Estimation Methodology*”, consta de más de 500 páginas, donde detalla la metodología para llevar a cabo la evaluación del recurso hídrico subterráneo por parte de los estados. A continuación, se sintetiza el contenido de esta guía, y se presentan los aspectos fundamentales de la metodología utilizada.

La guía consta de 36 capítulos, los primeros dos son dedicados a la descripción de las unidades de evaluación, después se dedica exclusivamente un capítulo para

abordar la metodología de cálculo de cada variable involucrada en el cálculo del almacenamiento. En cada capítulo se describen las generalidades de la variable, las suposiciones para su cálculo, el procedimiento y las ecuaciones que se utilizan, Se señala la manera de calcular la variable dependiendo del caso y se presenta el formato sugerido para manejar los datos necesarios para su cálculo.

Los aspectos fundamentales de la metodología son:

- La unidad básica para la evaluación del recurso hídrico subterráneo es el acuífero. Se asume que existen dos tipos de recursos hídricos subterráneos: los “renovables o dinámicos” y los “estáticos o almacenados”. La planificación del desarrollo debe basarse principalmente en los recursos dinámicos ya que se reponen anualmente, mientras que los cambios en los recursos estáticos normalmente reflejan impactos a largo plazo ya que es posible que dichos recursos no se repongan anualmente (CGWB, 2020b).
- Dado que en este país la mayoría de la precipitación se debe al monzón, se utiliza una evaluación estacional del agua subterránea. El cálculo de la recarga se debe realizar por separado, para la estación monzónica y para la estación no monzónica. La suma de la recarga durante ambas estaciones es la recarga anual total (Ministry of Water Resources, 2017).
- Se utiliza una metodología diferente dependiendo del tipo de acuífero (confinado, libre y semiconfinado). La disponibilidad total del recurso hídrico subterráneo de una unidad de evaluación es la suma del agua subterránea almacenada en los acuíferos que la componen. El total del agua disponible en un acuífero es la suma de sus recursos hídricos “renovables o dinámicos” y los “estáticos o almacenados”.
- La metodología para la estimación del agua subterránea en un acuífero libre se basa en la ecuación de balance, cuyo planteamiento es el siguiente:

$$(10) \Delta S = R_{RF} + R_{STR} + R_C + R_{SWI} + R_{GWI} + R_{TP} + R_{WCS} \pm VF \pm LF - GE - T - E - B.$$

- Las variables que se toman en cuenta para la evaluación son: recarga debida a lluvia (R_{RF}), canales (C), irrigación (R_{GWI} y R_{SWI}), tanques y estanques (R_{TP}) y a estructuras de conservación (R_{WCS}); flujo base (B), flujo vertical (VF) y lateral (LF), evapotranspiración (E), extracción (GE), y transpiración (T); la recarga por lluvia se calcula utilizando los métodos WTF e infiltración (Ministry of Water Resources, 2017). Debido a la falta de datos para calcular todos los componentes de las ecuaciones, se propone que el cálculo se realice solo con los componentes mayores (CGWB, 2020b).

- El comité elaboró una base de datos con “valores guía” o “normas” de algunas variables hidrogeológicas, estas son: el rendimiento específico, factor de infiltración por lluvia, factor de filtración de canales y recarga por irrigación. Sin embargo, recomienda que se realicen estudios de campo y utilizar esos valores en la evaluación. Para los estudios de campo, se recomienda seguir los procedimientos comprobados. Sugiere también dar valores máximos y mínimos para todas las normas utilizadas en la estimación. (CGWB, 2020b).
- Finalmente, se indica que la evaluación debe actualizarse al menos cada tres años.

En la tabla 4 se presenta un resumen de las diferencias y similitudes entre las metodologías para calcular la disponibilidad en California, la Unión Europea, India con México.

	California	Unión Europea	India
Similitudes	-Utiliza la ecuación de balance	-Utiliza la ecuación de balance	-Utiliza la ecuación de balance. -Se cuantifica solo el agua subterránea. -El acuífero es la unidad básica de evaluación.
Aspectos diferenciadores	-Documento guía para la aplicación de balances de agua. -Se elaboran 3 balances: histórico, actual y pronosticado. - El balance de la cuenca debe incluir agua superficial y subterránea. -Cuantificar el grado de sobreexplotación. -Uso de modelos numéricos para elaborar el balance.	- Documento guía para la aplicación de balances de agua. - El balance de la cuenca incluye agua superficial y subterránea en la misma ecuación. -Se sugiere el uso de modelos numéricos para robustecer los balances. -El planteamiento de la ecuación de balance distingue entre parámetros antropogénicos y naturales	-Documento guía para la aplicación de balances de agua. -Base de datos con valores guía de variables hidrogeológicas. -Se aplica una metodología diferente para cada tipo de acuífero. -El cálculo de la recarga es estacional. -Se diferencia entre recurso hídrico “renovable” y “en almacenamiento”.

Tabla 4. Similitudes y diferencias entre las normativas para la evaluación del almacenamiento de agua.

1.2 NOM-014-CONAGUA-2003 Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada y NOM-015-CONAGUA-2007 Infiltración artificial de agua a los acuíferos. - Características y especificaciones de las obras y del agua

Las siguientes Normas regulan la recarga gestionada de acuíferos con la diferencia de que la NOM-014-CONAGUA-2003 aborda la recarga con agua residual tratada y la NOM-015-CONAGUA-2007 la recarga con agua de lluvia y de escurrimiento superficial.

1.2.1 Contenido técnico

Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

Esta Norma Oficial Mexicana, publicada en el DOF el 18 de agosto de 2009, establece los requisitos que debe cumplir la calidad del agua, la operación y el monitoreo en los sistemas de recarga con agua residual tratada. Es aplicable a obras planeadas de recarga artificial tanto nuevas como existentes, que descarguen agua residual tratada y **cuya función sea almacenar e incrementar el volumen de agua en los acuíferos**, para su posterior recuperación y reúso (SEMARNAT, 2009a).

En el apartado 5, se mencionan la clasificación de los 3 tipos de recarga que se consideran:

1. Superficial: Recarga desde la superficie por infiltración en obras como: Estanques o piletas de infiltración, inundación del terreno, cauces acondicionados, zanjas, sobre riego o una combinación de ellas.
2. Subsuperficial: introducción del agua en la zona no saturada mediante pozos secos, zanjas o estanques profundos.
3. Directo: inyección directa del agua al acuífero por medio de pozos cuya sección abierta lo penetran parcial o totalmente.

Los requisitos para la evaluación de un sitio se detallan en el apartado 6 de la norma, en el presente texto se presenta una síntesis de su contenido, estos requisitos son:

1. Estudios básicos.
Se describen los estudios necesarios para la evaluación de un sitio, estos deben incluir: localización del sitio de la obra de recarga, así como de las captaciones de agua subterránea y de sus fuentes de contaminación. Ubicación y características de la fuente de agua residual, la hidrogeología de la zona del proyecto (mapas de configuración de niveles del agua subterránea, características hidráulicas del acuífero que se pretende recargar, características fisicoquímicas y microbiológicas del agua subterránea nativa, etc.).
2. No se permite la construcción de SRA en los casos siguientes:
 - a) En donde las características fisicoquímicas del suelo o del agua subterránea, hayan sido degradadas por contaminación, aun cuando se hayan aplicado medidas de saneamiento.
 - b) En terrenos que carezcan de cobertura edáfica y en el subsuelo predominen rocas cársticas, fracturadas, o clásticos de grano grueso. Esto aplica solo a SRA de tipo superficial y subsuperficial.

3. Calidad del agua de recarga.

La calidad del agua residual tratada dependiendo del tipo de sistema de recarga (SRA), deberá cumplir con los requisitos que se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de contaminante	Tipos de Sistemas de Recarga	
	Superficial/Subsuperficial	Directo
Microorganismos patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos patógenos	Remoción o inactivación total de microorganismos enteropatógenos
Contaminantes regulados por norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994
Contaminantes no regulados por norma	DBO5 ≤ 30 mg/l, COT = 16 mg/l	COT ≤ 1 mg/l

Tabla 5. Calidad del agua residual tratada para recarga artificial, tomada de (SEMARNAT, 2009a).

a) Cuando a distancias menores de 1.0 km del límite exterior del SRA existan captaciones que suministran agua para usos público-urbano o doméstico, se debe:

- i. Realizar un proyecto “piloto” de recarga, un análisis hidrogeoquímico, aplicar un modelo numérico de flujo y transporte de solutos, cumplir con los límites máximos permisibles y respetar las distancias y el tiempo de residencia que se especifican en la tabla 6:

Variable	Tipos de Recarga	
	Superficial/Subsuperficial	Directo
Distancia horizontal mínima entre el límite exterior y las captaciones para uso doméstico	150 m	600 m
Tiempo de residencia del agua de recarga antes de su extracción	6 meses	12 meses

Tabla 6. Distancia mínima a las captaciones y al tiempo de residencia tomada de (SEMARNAT, 2009a)

b) Se podrá aplicar agua de recarga con una calidad menor a la establecida en la Tabla 1, solo cuando: se construyan SRA de tipo superficial/subsuperficial, que se compruebe, que el suelo y el subsuelo tienen capacidad para reducir la concentración de los elementos por encima de la Norma.

4. Monitoreo

a) Se debe incluir un programa de monitoreo que registre: la calidad del agua utilizada en la recarga, del agua de mezcla, del agua de recarga y el agua subterránea nativa, así como las variaciones de los niveles del agua subterránea.

- b) El uso de sondas de multiparamétricas son fundamentales para evaluar la variación de la composición físico-química a profundidad
- c) En el caso de los SRA de tipo directo, se deben construir pozos de monitoreo a distancias establecidas.
- d) Para los SRA de tipo superficial/subsuperficial, se debe monitorear el agua residual en las obras de recarga, y construir una red de pozos de monitoreo. En la Norma se especifican las características para su construcción.

Para consultar su detalle se puede referir a la Norma.

Es importante destacar que se mencionan las siguientes NOM como referencia para algunos parámetros a cumplir:

NOM-127-SSA1-1994	NOM-003-CONAGUA-1996	NOM-004-CONAGUA-1996
Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.	Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.

Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.

El objetivo de la Norma es proteger la calidad del agua de los acuíferos y aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial de agua pluvial y de escurrimientos superficiales. Su contenido se divide en las especificaciones, el monitoreo y la operación del sistema de recarga.

Es aplicable en todo el territorio nacional a las personas que ejecuten obras o actividades para la infiltración mediante disposición de agua pluvial y escurrimientos superficiales al suelo y subsuelo en obras o conjunto de obras que tengan una capacidad mayor a 60 litros por segundo (l/s).

Especificaciones

La Norma divide en dos tipos las obras de recarga, las que disponen para su infiltración sobre el suelo y las que lo hacen en la zona no saturada. Las especificaciones más importantes para el primer tipo son: realizar una caracterización del suelo conforme a lo dispuesto en la Norma ISO 15175:2004, si el área es propensa a deslaves, o con pendientes abruptas e inestables, esta debe ser estabilizada, si en el terreno ocurrió algún evento de contaminación se debe

asegurar que el lugar ha sido remediado con lo establecido en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y su Reglamento y las normas oficiales mexicanas correspondientes. Para las obras de infiltración en la zona no saturada, además de las primeras reglas, se debe asegurar mediante muestreo (conforme a la Norma ISO/CD 5667-11-2006) que el agua infiltrada no afectará la calidad del agua nativa, el agua de infiltración se debe encontrar dentro de los límites de la tabla 7.

Contaminante	Unidad de medida	Límite
Grasas y aceites	Mg/l	15
Materia flotante	Unidad	0
Sólidos sedimentables	Mg/l	2
Sólidos suspendidos totales	Mg/l	150
Nitrógeno total	Mg/l	40
Fosforo total	Mg/l	20
Coliformes fecales	NMP/100 ml	No detectable

Tabla 7. Límites de contaminantes en las aguas de infiltración para recarga artificial (SEMARNAT, 2009b)

Monitoreo

Llevar una bitácora de los resultados del muestreo, en cuanto a la periodicidad de los muestreos, se menciona que se revisará antes y después de cada temporada de lluvias.

Operación del sistema

Los pozos de infiltración deben contar un sistema de cierre en la entrada. El área de captación de agua debe mantenerse libre de residuos sólidos o líquidos y, por último, se debe incluir un programa de mantenimiento y de señalización, así como de abandono del sitio y verificación.

1.2.3 Análisis de la normativa de recarga gestionada en el marco internacional

El análisis del marco regulatorio sobre recarga gestionada permite mejorar sus políticas, lo cual implica que se identifican sus debilidades y fortalezas, y se elaboran sugerencias para su mejora. En la revisión se deben incluir y analizar una gran variedad de aspectos, como son los económicos, técnicos y científicos. En el panorama internacional son pocas las naciones que han implementado un marco

legal para regular la aplicación de proyectos de recarga gestionada (Fernández Escalante et al., 2022). A partir de la lista de lugares que poseen regulaciones sobre recarga gestionada, elaborada en el trabajo comparativo realizado por Fernández Escalante et al. (2020), se eligieron las regulaciones de España, California e India; para elaborar un análisis crítico de su contenido y compararlo con la normativa mexicana con base en, la similitud que existe con la estructura de la normatividad en el caso de California, la diferencia entre la normativa de India y España, y la disponibilidad de información y facilidad de acceso que existe sobre sus documentos.

California

En California existe la normativa “*Groundwater Replenishment Using Recycled Water*” (California Department of Public Health, 2014), la cual forma parte del Código de Regulaciones de California y dicta los requerimientos para la recarga de agua subterránea exclusivamente con agua residual tratada. Se divide en dos secciones, la primera señala los requisitos para los proyectos de aplicación superficial y la segunda para los de aplicación directa, salvo pequeñas excepciones, la mayoría de los requerimientos son los mismos en ambos casos. Un resumen del contenido de esta normativa se encuentra en la tabla 8, donde cada categoría se divide con respecto a las variables de (1) Requisitos generales de aprobación (2) Calidad química y física del agua, y (3) Requisitos operativos del sistema.

Requisitos para aprobación	Presentar un plan de desarrollo del proyecto, elaborar un mapa de la ubicación del proyecto con base en el flujo subterráneo, coleccionar y analizar 4 muestras de agua de los acuíferos involucrados, se llevará a cabo una audiencia pública para su aprobación.
Calidad del agua de recarga	Existen artículos para regular los microorganismos patógenos, compuestos nitrogenados y los siguientes contaminantes: (1) productos químicos inorgánicos, (2) radionúclidos químicos, (3) compuestos orgánicos, (4) subproductos de desinfección, (5) plomo y cobre; los componentes de cada grupo y sus límites correspondientes se encuentran en las tablas 64431-A, 64442 y 64443, 64444-A y 64533-A respectivamente, del “ <i>California Code of Regulations</i> ”.
Operación del sistema	Se debe elaborar un plan de operación que será aprobado por el departamento y el Regional Board. Entre los requerimientos de operación, se mencionan los siguientes: la construcción de al menos dos pozos de monitoreo a una distancia específica al sistema, tener control del volumen de agua residual tratada a utilizar en la recarga y el monitoreo del Carbono Inorgánico Total (TOC) en la fase del tratamiento suelo-acuífero.

Tabla 8. Resumen del contenido de la normativa “*Groundwater Replenishment Using Recycled Water*”

Las principales diferencias en los requisitos para los proyectos de aplicación superficial y directa son que para la aplicación directa no se mide el TOC, y se requiere usar un tratamiento de osmosis inversa y oxidación para el tratamiento del agua residual oxidada.

A pesar de la normativa descrita anteriormente, California no cuenta con otra similar que regule la recarga con fuentes de agua distintas al agua tratada, por lo tanto, el desarrollo de proyectos de recarga que involucren una fuente de agua distinta, están sujetos a regulaciones federales. Esto provoca que exista una falta de unificación

en el proceso para obtener permisos legales ya que agencias a nivel local, estatal y federal solicitan diferentes tipos de permisos para el uso de suelo y de agua para los proyectos de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) (Ulibarri et al., 2021). Sin embargo, si se promueve la aplicación de proyectos “Flood-MAR” los cuales se caracterizan por utilizar como fuente de agua la proveniente de la escorrentía por precipitación o por el deshielo. Para solventar la falta de normatividad para la aplicación de proyectos “Flood-MAR”, el California Department of Water Resources, convocó a un grupo de agencias e instituciones involucradas con permisos ambientales en un proyecto de tres años para desarrollar recomendaciones para aclarar cómo se deberían abordar los permisos ambientales y apoyar a los proyectos en la obtención de estos.

India

La India cuenta con el mayor volumen de recarga gestionada (4 km³/año). Esto ha ayudado al desarrollo de la agricultura en muchas regiones que dependen completamente del agua subterránea (Dillon et al., 2014). La recarga gestionada forma parte de una estrategia en el país para combatir la escasez y el abatimiento de niveles debido al uso excesivo de agua subterránea.

En los últimos 20 años la mayoría de los estados han dictado su propia política sobre el agua, estas legislaciones han incorporado normas que promueven el uso sustentable y la conservación del recurso hídrico, sin embargo, la mayoría regula la recarga gestionada de manera diferente, lo que provoca una falta de unificación en su regulación (Sakthivel et al., 2014). En la tabla 9 se resume la forma en que las legislaciones estatales abordan y regulan el tema de recarga gestionada y agua subterránea.

Estado	Legislación
ANDHRA PRADESH	WATER, LAND AND TREES ACT, 2002. Para aumentar el volumen de agua subterránea la autoridad emite guías para la construcción de estructuras para la recolecta de agua de lluvia con el propósito de utilizarla para recarga.
TAMIL NADU	GROUND WATER (DEVELOPMENT AND MANAGEMENT) ACT, 2003. Se especifica el uso de la recarga gestionada para combatir la intrusión marina. La autoridad podrá ordenar la disposición del agua extraída de manera que pueda ser utilizada directamente por los agricultores para que de ser posible aumente el almacenamiento mediante recarga incidental.
KERALA	GROUND WATER (CONTROL AND REGULATION) ACT, 2002. No especifica regulaciones sobre la recarga de agua subterránea, pero si sobre su protección y el otorgamiento de permisos.
HIMACHAL PRADESH	WATER (REGULATION AND CONTROL OF DEVELOPMENT AND MANAGEMENT) ACT, 2005. La Ley faculta a la Autoridad para identificar las áreas de recarga y emitir directrices para la recolección de agua de lluvia para la recarga en dichas áreas.
WEST BENGAL	GROUND WATER RESOURCES (MANAGEMENT, CONTROL AND REGULATION) ACT, 2005. Confiere autoridad al estado para emitir certificados para la recarga de agua subterránea.

CHHATTISGARH	GROUND WATER (REGULATION AND CONTROL OF DEVELOPMENT AND MANAGEMENT) ACT, 2012.
	La Ley contiene explícitamente una disposición en virtud de la cual la Autoridad puede identificar las áreas de recarga en el Estado y emitir las pautas para la recolección de agua de lluvia para la recarga de agua subterránea en estas áreas.

Tabla 9. Resumen de la manera en que las legislaciones estatales abordan y regulan el tema de recarga gestionada y el agua subterránea (Sakthivel., 2014).

Por otro lado, el gobierno central de la India ha emitido una serie de documentos guía que, si bien no son vinculantes, si establecen una guía de trabajo para el desarrollo de proyectos de recarga todo el territorio. Estos documentos son: el “*Plan maestro para la recarga artificial de agua subterránea en India*” (CGWB, 2020) creado en el año 2002 y actualizado en 2020, la “*Guía de la calidad del agua para la recarga gestionada de acuíferos*” (Dillon et al., 2014) y el “*Manual para la recarga artificial de agua subterránea*” (CGWB, 2007).

El “*Plan maestro para la recarga gestionada de agua subterránea en India*” está diseñado para estudiar la factibilidad de implementar proyectos de recarga artificial por todo el país a nivel de distrito. Proporciona una guía para el desarrollo de un proyecto lo que implica la selección del sitio, el diseño y planificación, el monitoreo y la evaluación del costo. Además, se identificó el volumen de escorrentía no comprometida proveniente del monzón que puede ser aprovechada como volumen para la recarga artificial (CGWB, 2020). El contenido presentado en ese documento brinda un marco político para los esquemas de recarga gestionada en el país. (Das, 2022).

El objetivo de la “*Guía de la calidad del agua para recarga gestionada de acuíferos*” es proveer una guía de fácil acceso y comprensión para proteger la calidad del agua de recarga que ingresa a los acuíferos está dirigida a personas que no son especialistas. Esta elaborada como una lista de preguntas que se aplican a cualquier proyecto de recarga para identificar y prevenir la contaminación de acuíferos. Considera solamente la recarga con fuentes de agua naturales de cuencas rurales, debido a que se considera que no contienen tantos contaminantes como otras (residual, de cuencas urbanas, industriales). A pesar de contar con rigor técnico, si hace referencia a una serie de documentos guía a nivel internacional y nacional sobre la calidad del agua para recarga y consumo, como: “*Guidelines for the quality of irrigation water*”, “*Water quality monitoring protocols*”, “*Australian Guidelines for Managed Aquifer Recharge*” y “*World Health Organization Guidelines for drinking water*”. Con lo anterior, esta guía busca evolucionar los proyectos de recarga artificial hacia una recarga gestionada de acuíferos que es un proceso que más integral y cuyos objetivos van más allá de aumentar el almacenamiento de los acuíferos, ya que incluye la evaluación del impacto del proyecto de recarga en la disponibilidad y calidad del agua, la resiliencia social y en los ecosistemas locales (Dillon et al., 2014).

El “Manual para la recarga artificial de agua subterránea” es un documento guía que explica con detalle cada paso del proceso de desarrollo de un proyecto de recarga artificial. Entre su contenido se explica la metodología para la evaluación de la fuente de agua, la evaluación del sitio donde se realizará el proyecto de recarga, el funcionamiento de una serie de estructuras y técnicas (como la cosecha de agua de lluvia), la evaluación del impacto en la calidad, nivel de agua y socioeconómico, y finalmente los requerimientos de la operación y mantenimiento del sistema (CGWB, 2007). La principal diferencia con el documento *Plan maestro para la recarga artificial de agua subterránea en India*, consiste en que este Manual funciona como una guía para el desarrollo de proyectos, mientras que el Plan maestro presenta una evaluación de los mejores sitios para llevar a cabo la recarga artificial en el país.

España

No existe un solo documento legal donde se integren y especifiquen todas las regulaciones necesarias para llevar a cabo un proyecto de recarga gestionada, en cambio hay una serie de documentos que aplican a diferentes niveles, de manera nacional, estatal y a nivel de cuenca, donde el contenido de cada uno regula diferentes aspectos de la recarga gestionada. Además de esto, debido a la pertenencia de España a la Unión Europea, están obligados a cumplir con las normativas sobre la protección de las aguas para la comunidad europea. Lo anterior solo aumenta y hace más compleja la situación regulatoria de la recarga gestionada en España (Rojas Calderón, 2019; Vélez y Vásquez, 2004). En la tabla 10, se mencionan y sintetiza el contenido de los documentos aplicables en España.

Normas de la Comunidad Europea		Normas nacionales	
Directiva 80/68/CE , de la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por ciertas sustancias.	La recarga artificial se someterá a una autorización particular, que se concederá solo si no existe riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Los estados controlarán las autorizaciones.	Artículo 53 del Reglamento de Planificación Hidrológica,	Se identificarán en los planes hidrológicos de cuenca los diferentes tipos de recarga artificial y las implicaciones que tengan en las aguas subterráneas.
Directiva del Consejo 2006/118/CE , de la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro	Establece medidas para prevenir la entrada de contaminantes a los acuíferos, pero dice que los estados pueden eximir estas medidas en caso de que se deba a recarga artificial.	Ley de impacto ambiental, Real Decreto Legislativo N° 1/2008	Los proyectos de recarga artificial con un caudal superior a 10 millones de m ³ se someterán a evaluación de impacto ambiental y en caso de que el volumen sea menor a 10 pero mayor a 1 hm ³ se someterá a una manifestación de impacto ambiental si la autoridad ambiental lo decide.
Directiva del Consejo 85/337/CEE , la evaluación de las repercusiones de proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente	Se someterá a evaluación ambiental los proyectos de recarga artificial que superen los 10 millones de m ³ anuales.	Planes hidrológicos de cuenca	Se establecen normas particulares y específicas en cada caso.
Artículo 11 de la DMA , medidas de control de la recarga artificial	Medidas básicas: El agua que se utilice podrá obtenerse de cualquier fuente, superficial o subterránea, siempre su uso no	Real Decreto N° 1.620/2007 , establece el régimen jurídico de	Permite el uso de agua tratada para la recarga de acuíferos por percolación localizada y por inyección directa.

	comprometa los objetivos medioambientales establecidos para la fuente o la masa de agua recargada.	<i>la reutilización de las aguas depuradas.</i>	
Directiva 2011/92/UE de la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente	Entre los proyectos sometidos a evaluación ambiental la recarga artificial de acuíferos, siempre que el volumen anual de agua aportada sea igual o superior a 10 millones de metros cúbicos.	Legislación de aguas estatal Real Decreto Legislativo Nº 1/2001,	Especifica las regulaciones sobre títulos habilitantes para la aplicación de recarga artificial, la planificación hidrológica que deben incluirse en los planes hidrológicos de cuenca y la clasificación de las obras de recarga artificial.

Tabla 10. Resumen de las regulaciones actuales para la recarga gestionada en España, (Escalante et al., 2020; Rojas Calderón, 2019; Sastre Beceiro, 2009).

El número de estatutos legales mencionados en la tabla 10, son evidencia de la falta de una regulación unitaria en este país (Sastre Beceiro, 2009). Un ejemplo de lo anterior, es el *Real Decreto Nº 1.620/2007* el cual es de gran importancia, ya que especifica los criterios de calidad que debe poseer el agua tratada para su uso en proyectos de recarga gestionada, ya sean por inyección directa o percolación, por otro lado, otros aspectos igual de importantes referentes a la clasificación de las obras (titularidad pública o privada), los permisos necesarios (títulos habilitantes) y el contenido que están obligados a incluir los planes hidrológicos de cuenca en cuanto a recarga gestionada se mencionan en el *Real Decreto Legislativo Nº 1/200*. Aún con el contexto explicado anteriormente, en España existen proyectos de recarga gestionada que se han desarrollado satisfactoriamente (Rojas Calderón, 2019).

1.3 Análisis comparativo de las normativas

Las normativas descritas anteriormente son ampliamente heterogéneas en su contenido, esto hace más complejo señalar las similitudes entre ellas. Con el objetivo de hacer una comparación más práctica, se elaboró una clasificación de los parámetros más importantes que un marco regulatorio de recarga gestionada debería abordar. La clasificación que se muestra en la tabla 11 se realizó a partir de lo mencionado por Escalante et al. (2020), Fernández Escalante et al. (2022) y del análisis del contenido presentado en la sección anterior.

Aspecto	Contenido
Calidad del agua	En general incluye los aspectos analíticos para vigilar la calidad del agua, esto es: especificaciones de estudios de calidad requeridos, límites permisibles de sustancias contaminantes, número de sustancias reguladas.
Aspectos operacionales y de construcción	Se abordan las especificaciones para el desarrollo de un proyecto de recarga, que comprende las etapas de planeación, construcción y monitoreo. También se incluyen los diferentes dispositivos de recarga gestionada.

Aspectos ambientales e hidrogeológicos	En los aspectos ambientales se toma en cuenta: La fuente de agua, precipitación, tipo y condiciones del suelo, etc. Para los aspectos hidrogeológicos: geología, litología, diferenciar la zona saturada y no saturada, interacción entre el agua de recarga y el agua nativa
Enfoque de Gestión Integral	Se refiere al grado en que se aborda la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, por ejemplo, mediante la participación de diferentes actores en la toma de decisiones, especificar el uso final del agua y la asignación de estímulos para la recarga.
Generales	Este aspecto implica principalmente tres subtemas: La cantidad de componentes del marco legal (estructura), ausencia o presencia de normatividad vinculante, inclusión y evaluación del impacto ambiental y social, los riesgos de la recarga, y posible impacto del cambio climático.

Tabla 11. Clasificación de los aspectos más importantes a revisar en un marco normativo de recarga gestionada.

- **Calidad del agua:** En cuanto a la regulación de parámetros, la India no cuenta con una lista de valores límites oficial. Por otro lado, México, España y California regulan dependiendo del tipo de recarga que se lleve a cabo (infiltración, inyección directa, o percolación) (Fernández Escalante et al., 2022) y en el caso de México también de la fuente de agua que se utilice (residual o escorrentía), mientras que, en California y España, solo se regulan los parámetros en caso de utilizar agua residual tratada. Con los 5 grupos de sustancias mencionadas en la tabla 8, California regula el mayor número de sustancias, a diferencia de España donde solo se mencionan 6, en cambio, México, en el caso del agua residual tratada, regula 34 parámetros de acuerdo con los límites establecidos en la NOM 127 SSA y 68 establecidos en la NOM 014 CONAGUA, en cambio para el agua de escorrentía regula solo 6 (tabla 7). La mayoría de los parámetros que coinciden en las regulaciones de California y México tienen límites similares, por ejemplo, el cromo, arsénico y la mayoría de los químicos orgánicos. Es importante destacar la diferencia en el número de parámetros regulados en España con California y México, tomando en cuenta que se trata de agua residual tratada. En México y California también se indican las especificaciones con que deben contar los estudios para la medición de parámetros, en especial en México existen las Normas Mexicanas (NMX) que no son vinculantes, pero establecen los métodos de muestreo en el caso del agua de escorrentía.

Por otro lado, la “*Guía de la calidad del agua para recarga gestionada de acuíferos*”, además de ser un documento único, abarca solamente la recarga con agua escorrentía y no toma en cuenta recarga con agua residual tratada.

- **Aspectos operacionales y de construcción:** La India se distingue por contar con la guía “*Manual para la recarga artificial de agua subterránea*”, cuyo contenido cubre todas las etapas que involucran el desarrollo de un proyecto de recarga, y se mencionan los tipos de instrumentos de recarga gestionada que se pueden utilizar dependiendo del ambiente. A diferencia de México, donde se indican brevemente los requisitos de aprobación, así como la operación, monitoreo, y mantenimiento en las NOM 014 y 015. Un aspecto diferenciador de México es el uso de las normas

ISO como parámetro para llevar a cabo los estudios de calidad. De igual manera, California aborda los requisitos necesarios para la aprobación de un proyecto y los estándares que se deben de cumplir durante su operación. Un requisito para el monitoreo, similar entre México, California y la India es el establecimiento de pozos de observación a diferentes distancias del dispositivo de recarga. España a pesar del amplio número de normativas, no cuenta con una que establezca los requisitos de aprobación, construcción u operación de los sistemas. Con base en lo anterior se observa que las normativas de México y California son las que cuentan con más similitudes en sus normativas.

- Aspectos ambientales e hidrogeológicos:

En este aspecto, los 4 marcos normativos incluyen tanto aspectos ambientales como hidrogeológicos. El *“Plan Maestro”* elaborado en la India, explica a detalle como evaluar la fuente de agua (precipitación y escorrentía), dejando de lado el agua tratada, también incluye métodos para evaluar las características del suelo, la interacción entre agua de recarga y nativa, y un resumen de las características hidrogeológicas de todo el país por tipo de formación geológica. Por otro lado, tanto México como California tratan estos aspectos de manera breve pero concisa, ambos en la sección de estudios necesarios para la aprobación de un proyecto, debido a la naturaleza normativa de sus documentos. A pesar de que California considera al agua superficial como fuente para proyectos MAR, no existe una normativa estatal que regule el uso de la misma.

- Enfoque de gestión integral:

En este tema, los documentos de la India hablan de la importancia de la gestión integral de los recursos, que involucra la participación de diferentes actores, prueba de ello es la *“Guía de la calidad del agua”* que está elaborada de manera que sea comprendida y accesible para todos los involucrados en un proyecto de recarga. Por otro lado, Cruz-Ayala y Megdal, (2020) opinan que en México se tiene una visión central de la gestión del agua y de la recarga gestionada. En específico en las NOM 014 y 015 no se menciona el concepto de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR), el cual integra elementos técnicos, sociales y ambientales que interactúan en un proyecto de recarga, además de ser más actual. Por lo que se propone modificar el nombre de la norma de recarga artificial a recarga gestionada. España y California tampoco abordan explícitamente un enfoque de gestión integral en sus normativas.

- Generales:

Una problemática grave para la India y España es la cantidad y diversidad de normativas para la recarga gestionada, la cual ha sido señalada por varios autores

(Rojas Calderón, 2019; Sakthivel, P Amirthalingam & Starkl, 2014; Sastre Beceiro, 2009), ejemplos de esto son las normativas estatales, y en España, la normativa comunitaria; como consecuencia el proceso para el establecimiento de un proyecto se hace más complejo.

A diferencia de California, España y México, la India no cuenta con normatividad nacional vinculante para la recarga gestionada, sino regional, no obstante, sus documentos guía abordan una gran cantidad de información necesaria para el correcto desarrollo de un proyecto de recarga.

En cuanto a la evaluación del impacto social, ambiental y posibles riesgos, en España solo se menciona que se realizará una evaluación ambiental del proyecto en caso de exceder un volumen establecido, mientras que México y California da más importancia al impacto a la calidad del agua subterránea nativa y los riesgos a la salud que esto implica, ya que se regula una amplia gama de contaminantes. En el caso de México en particular, lo anterior resulta sumamente costoso y en ocasiones inviable para quien solicite realizar un proyecto de recarga gestionada. Otra similitud es que se toma en cuenta la evaluación del cambio que tendrán los niveles de agua subterránea con el aumento de la recarga. Por otra parte, la India menciona la evaluación socioeconómica y la aceptación de la recarga artificial por parte de la sociedad como necesaria, también en específico en la legislación estatal de Tamil Nadu (Sakthivel, P Amirthalingam & Starkl, 2014), se especifica el uso de la recarga artificial para combatir el impacto de la intrusión marina. Las consecuencias del cambio climático es un tema que está ausente en la mayoría de las legislaciones consultadas, en cambio la recarga gestionada es abordada como una solución.

1.4 Propuestas para modificar y precisar las normas

A continuación, se presenta una lista de propuestas para la modificación de las actuales NOM-011-CONAGUA-2015, NOM-014-CONAGUA-2003 y NOM-015-CONAGUA-2007.

1) En primer lugar se propone modificar el enfoque de las normas para que sea compatible con la gestión integral de los recursos hídricos que se plantea en la LAN. Es decir que sus regulaciones además de elaborarse con base en aspectos técnicos deberían incluir factores ambientales, sociales, económicos y culturales. En la actualidad, la gestión integral de los recursos hídricos es considerado globalmente como el enfoque más viable para solventar los problemas asociados a la crisis hídrica (contaminación y escasez).

2) Modificar la concepción del agua subterránea y superficial como almacenes independientes, ya que se pasa por alto su interrelación y como resultado se descartan los efectos en el agua subterránea a consecuencia de la dinámica superficial y viceversa. Lo anterior puede trasladarse al marco normativo de tal forma que el contenido de las normas que regulan el agua subterránea esté relacionado con las normativas que regulen el agua superficial.

3) En la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, la metodología para el cálculo de la recarga debería tomar en cuenta los factores de variabilidad espacial y temporal de la recarga dada la influencia de estos en el resultado. Para esto, se sugiere aumentar el período mínimo para el cálculo de la recarga, ya que como menciona (Vélez & Vásquez, 2004), de esta manera se incluyen años con diferentes condiciones de precipitación y se disminuye la incertidumbre del resultado. En cuanto a la variabilidad espacial, debe hacerse hincapié en la correcta identificación de las zonas de recarga y descarga de un sistema acuífero, así como en la elaboración del modelo conceptual y las simplificaciones asumidas, Rushton (1988) y Simmers (1997) (En: Vélez y Vásquez, 2004). Por último, en la medida de lo posible, solicitar el uso de 2 o más técnicas para comprobar los resultados.

4) El apartado para calcular el componente de cambio de almacenamiento de la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, se podría mejorar remarcando la importancia de utilizar un coeficiente de almacenamiento que sea lo más representativo posible del material que compone al acuífero, de igual manera se deberían considerar las limitantes de ese método, las cuales se mencionan en el punto 1.1.2.1. Además, con objetivo de precisar los resultados, podría solicitarse la aplicación de métodos complementarios como los descritos en el apartado “*métodos alternativos*” del punto 1.1.2.1.

5) La ecuación para el cálculo de la disponibilidad media anual (figura 1) podría actualizarse con relación a las propuestas 1 y 2, de tal manera que sus componentes se relacionen con las normativas mexicanas encargadas de regular esos componentes, e incluir de manera más explícita la relación con el agua superficial, de manera similar al caso de California.

Con base en la regulación de India, se plantean dos propuestas para precisar el cálculo de la disponibilidad. La primera es aplicar un método de balance diferente dependiendo del tipo de acuífero. La segunda es adoptar la clasificación del recurso hídrico subterráneo en renovable y estático, para ello se identificarían los recursos estáticos como el volumen calculado cuando se miden los niveles de agua en la

época donde el aporte de recarga sea mínimo, para lo cual se deberá identificar la fuente de recarga principal y su periodo de menor aporte.

6) Los documentos guía son una de las principales diferencias entre México y los marcos regulatorios documentados. La autoridad del agua debe contar y difundir con manuales para abordar con mayor profundidad las metodologías, reglas y requisitos contenidos en las tres normas oficiales. En el caso de la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, donde se explique el cálculo de la recarga, se describan diferentes tipos de metodologías, así como una metodología para realizar estudios hidrogeológicos, en los cuales se incluyan nuevas herramientas como percepción remota, monitoreo automatizado y transmisión telemétrica, uso de drones, determinación de superficies de riego, estimación de evapotranspiración de cultivos y vegetación natural, interferometría, geofísica, software especializado, entre otros. En el caso de las NOM 014 y NOM 015 para detallar el proceso de elaboración de un proyecto de recarga gestionada, como realizar los estudios químicos solicitados, como llevar a cabo el monitoreo, etc.

7) Se sugiere contar con un REPGA actualizado, que represente la realidad del volumen de agua que se extrae de un acuífero, contar con el mismo nivel y actualización de conocimiento en todos los acuíferos y una base de datos oficial y actualizada de valores guía de variables hidrogeológicas de los diferentes ambientes hidrogeológicos de México y facilitar la consulta de estos documentos para garantizar el acceso universal a la información.

8) En cuanto a la normativa de recarga, en primer lugar, se propone modificar el término “recarga artificial” de la Norma Oficial Mexicana a “recarga gestionada”, para integrar los elementos técnicos, sociales y ambientales que interactúan en un proyecto de recarga. También se propone que la calidad del agua no cumpla necesariamente con los límites permisibles especificados en la NOM-127-SSA1-2021, ya que trata de agua para uso y consumo humano, y en México no toda el agua que se encuentra en los acuíferos cumple con estas características, por lo que se propone que debe tomarse en cuenta antes de la recarga, la calidad del agua del acuífero en cuestión. Por otro lado, se proponen las siguientes modificaciones de carácter técnico:

-El programa de monitoreo antes y después de la operación de las obras de recarga, debe incluir las fuentes de contaminación más cercanas al sistema de recarga.

-Para la ubicación de los pozos de monitoreo, no solo debe especificarse la distancia entre el pozo de inyección y el punto de extracción más cercano, debe tomarse en cuenta la dirección de flujo subterráneo.

-Contar con registros históricos de la calidad de agua más cercana al sistema de recarga, para tomar en cuenta la posible influencia de otras fuentes de contaminación.

-Determinar el tiempo en el que se debe llevar a cabo el muestreo del agua de recarga.

9) Para precisar las normas sobre recarga gestionada se sugiere trabajar sobre el esclarecimiento de tres temas: el vacío legislativo sobre el manejo del volumen de agua recargada, la falta de incentivos para invertir en la recarga gestionada y la falta de inclusión de la sociedad en el impacto que generan los proyectos de recarga.

Para resolver tales cuestiones algunos autores han planteado las siguientes propuestas: para determinar de manera clara cómo será gestionado el volumen de agua recargada, Pyne, (2005) propone que los usuarios que lleven a cabo un proyecto de recarga gestionada recuperen el volumen de agua que recargan; en cuanto a la falta de incentivos para la implementación de proyectos de recarga gestionada, Cruz-Ayala y Megdal (2020), proponen que bajo el marco legal actual, se permita que aquellos usuarios de agua, es decir, titulares de asignaciones y que están recargando agua, extraigan un volumen específico adicional a su asignación. Sin embargo, antes de ser implementadas, estas propuestas deberían ser desarrolladas para adaptarse al marco legal del agua mexicano, pues existen aspectos clave a tomar en cuenta, por ejemplo, se debería verificar y medir el volumen de agua que ingresa al acuífero y el tiempo que toma a esta llegar a él, una manera de hacerlo, sería comprobando la recuperación de los niveles del agua cercanos a la zona de recarga; si no se toman en cuenta cuestiones de esta clase, se estaría ejerciendo presión extra al acuífero sin tener evidencia clara de que la recarga gestionada presente un beneficio tangible.

En cuanto a la falta de un marco integral de la recarga gestionada se propone incluir los impactos sociales, además de los ya considerados impactos a la salud y a la calidad del agua del acuífero. La importancia de poseer un marco legal integral, proporciona la base necesaria para una implementación efectiva (Ulibarri et al., 2021).

10) Por último, para mejorar y facilitar la implementación de proyectos de recarga, se podría incorporar en la legislación la elaboración de proyectos piloto y utilizar los ya elaborados con mejores resultados, para identificar las mejores zonas donde desarrollar proyectos de recarga a lo largo de todo el territorio nacional. Este tipo de política pública se ha llevado a cabo en los Estados Unidos donde se realizaron estudios en 17 estados para identificar sitios apropiados para la aplicación de estos proyectos (Cruz-Ayala & Megdal, 2020).

2. Gestión actual del agua en México

La gestión del agua en México ha cambiado a lo largo del tiempo, pasando de ser una gestión totalmente centralizada a tratar de implementar una gestión más integral. En el primer modelo de gestión, el gobierno federal a través de la CONAGUA se encarga totalmente de la administración del agua. Por otro lado, la gestión integral, ha sido impulsada por la Ley de Aguas Nacionales, donde se señala que los principios fundamentales para la administración del agua son: la gestión integrada, la planeación y programación hidráulica, mayor participación de los usuarios y la seguridad jurídica de los derechos de uso o aprovechamiento (Dourojeanni et al., 2002).

Las instituciones que intervienen en la gestión y administración del agua en México se presentan en la figura 3, los organismos de lado izquierdo son las instituciones gubernamentales, mientras que, del lado derecho son las organizaciones sociales, en la parte superior las que tienen injerencia a nivel nacional y en la parte inferior a nivel regional y estado.

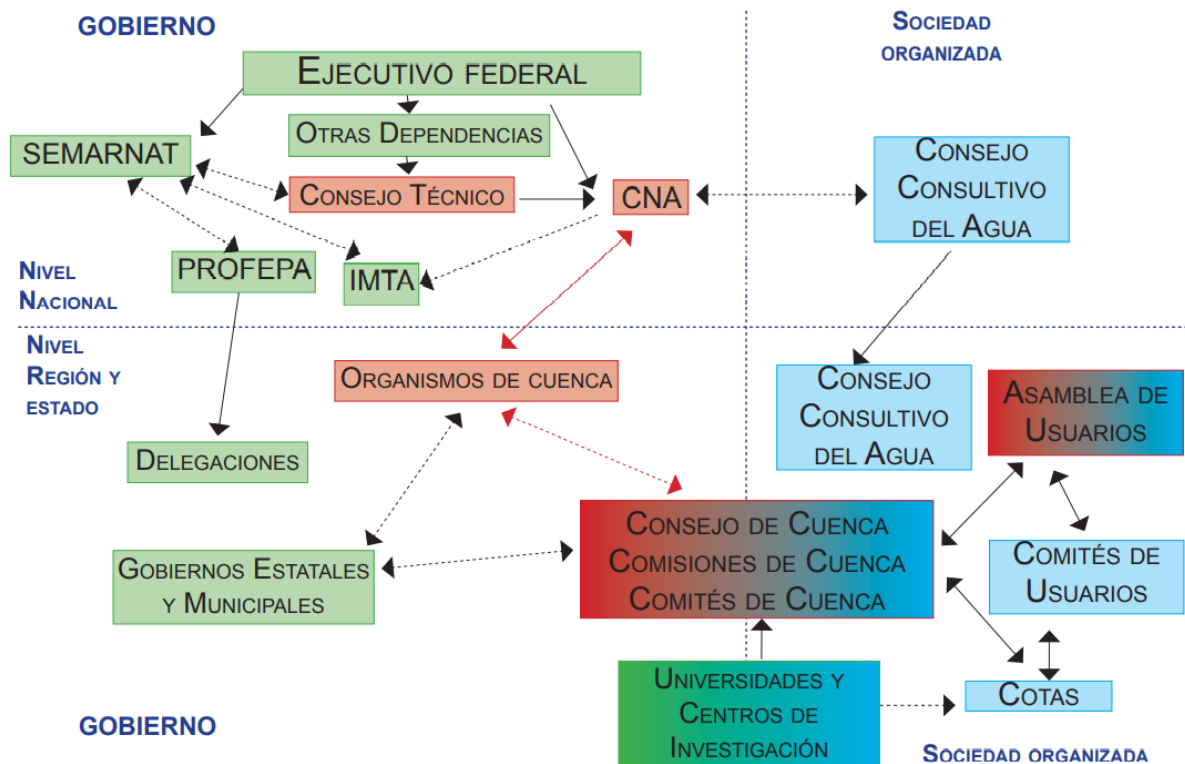


Figura 3. Esquema de los organismos que están involucrados en la gestión del agua en México, tomada de Jiménez Cisneros et al. (2010)

2.1 Retos y problemas del agua subterránea en México

El agua subterránea tiene un papel de gran importancia para México, pues suministra el 39.4% del volumen que se utiliza para uso consuntivo, sin embargo, uno de los principales problemas que se afrontan es la explotación intensiva de este recurso, ya que para el 2020 de los 653 acuíferos que existen en México, 111 se encontraban en condición de “sobreexplotación” (CONAGUA, 2021), el cual es un término utilizado por la CONAGUA para definir que en un acuífero el volumen concesionado supera la recarga natural, la consecuencia más evidente de este proceso se refleja en la disminución de los niveles del agua subterránea. Al problema anterior se suman otros como la contaminación de los acuíferos, la intrusión marina y la falta de consideración del impacto en el ciclo hidrológico debido a la crisis climática, y, por consiguiente, en el agua subterránea.

Esto no es solo consecuencia de una condición hidrológica natural desfavorable sino a la falta de gobernabilidad del recurso (Healy & Scanlon, 2010) y la gestión del agua deficiente (Carrillo Rivera et al., 2016; Gonzalo, 2017; Jiménez Cisneros et al., 2010) que provoca el uso desmedido por parte de los usuarios (pozos clandestinos, uso de un caudal superior al concesionado). Por lo tanto, es claro que los modelos de gestión del agua en México no han sido capaces de afrontar con éxito estos retos, pues han estado presentes desde hace varias décadas y se han acentuado en los últimos años.

Aunado a lo anterior, las ausencias legales y las imprecisiones abonan a que exista una mala gestión del agua subterránea que desemboca en tensiones y conflicto (Gonzalo, 2017), por lo que es necesaria una legislación integrada del agua subterránea, para que mediante ella se gestione su uso, para no comprometer la disponibilidad y calidad, además de resolver los conflictos que se crean alrededor de este recurso (Taylor et al., 2010).

2.2 Gestión Integral de los recursos hídricos

El concepto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se empezó a desarrollar desde los años 80 como respuesta a las diferentes presiones sobre los recursos hídricos como contaminación y problemas de escasez (Cobo et al., 2018). La GIRH es un enfoque que promueve el desarrollo y gestión coordinada del agua, suelo y los recursos asociados con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas. Se define como “el proceso sistemático para el desarrollo sostenible, la asignación y el monitoreo del

uso de los recursos hídricos en un contexto de objetivos sociales, económicos y ambientales” (Taylor et al., 2010).

La GIRH se basa en 5 principios definidos en la Conferencia Internacional sobre Agua y Ambiente realizada en Dublín en 1992 (figura 4) y en los 3 pilares que conducen a la sostenibilidad: eficiencia económica, sostenibilidad ambiental y equidad social (Cobo et al., 2018).

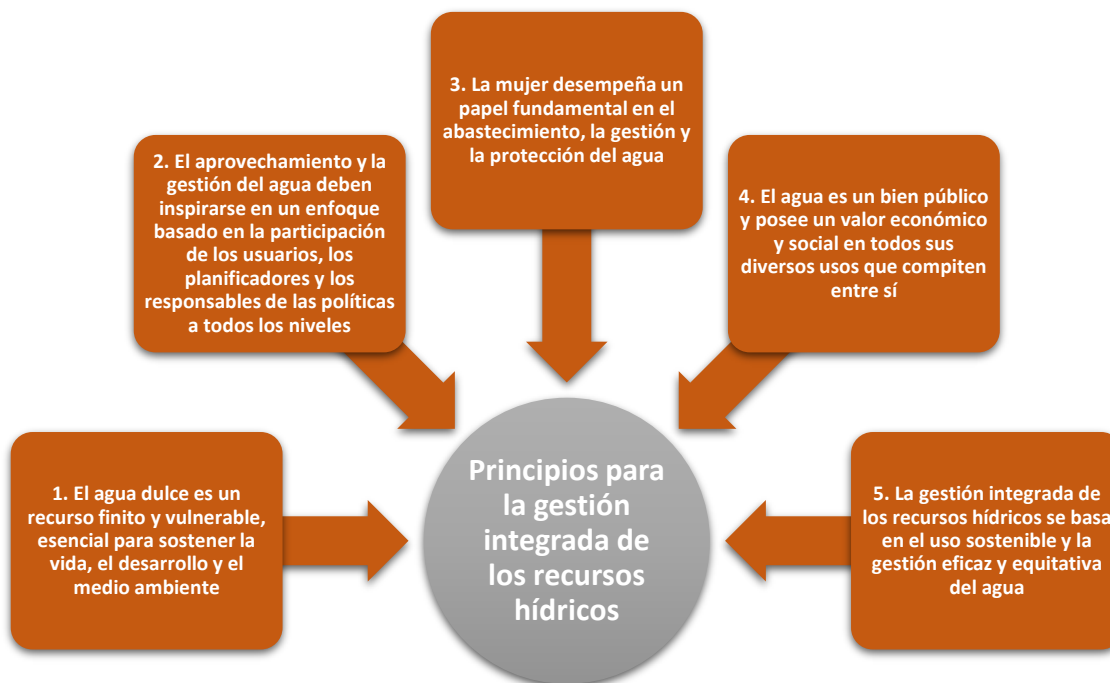


Figura 4. Principios para la gestión integrada de los recursos hídricos (Taylor et al., 2010).

Para implementar una gestión integral del agua, Cobo et al. (2018) menciona las 3 áreas de acción que se deben abordar, estas se describen en la tabla 12. Cada una contiene áreas clave que se deberían atender para llevar a cabo una gestión integral, dentro de ellas se incluye el marco legal y la evaluación de los recursos hídricos.

Ambiente propicio	Se refiere a las políticas, la legislación y los sistemas de financiación e incentivos.
Roles institucionales	Se refiere al marco institucional que se ve involucrado en la administración del agua y el rol que deben llevar a cabo: Instituciones gubernamentales, los organismos públicos, las autoridades locales, el sector privado, las organizaciones y asociaciones de la sociedad civil.
Instrumentos de gestión	Son los instrumentos que se utilizan para implementar una gestión integral, algunos de ellos son: evaluación de recursos, herramientas de regulación (asignación y límites) y gestión e intercambio de información.

Tabla 12. Áreas de acción en la implementación de la GIRH.

La implementación de una gestión basada en los principios de la GIRH requiere cambios en múltiples áreas y niveles, así como un alto nivel de coordinación

interinstitucional entre los entes públicos administradores, por lo que hoy en día, no existe un plan de acción simple para lograrlo (Taylor et al., 2010). Estudiar a detalle todas las consideraciones necesarias para la implementación de la GIRH no se encuentra dentro de los objetivos del presente trabajo, por lo tanto, a continuación, se presenta una integración de soluciones, mencionadas por textos especializados en la GIRH, que se deberían abordar para solucionar los problemas mencionados, las cuales son consistentes con las áreas de acción citadas anteriormente.

- **Gestión desconcentrada y descentralizada (participación de la ciudadana):** La participación de los usuarios del agua es uno de los puntos más importantes para lograr una buena gestión. Para ello se propone la creación de consejos ciudadanos y de órganos de participación que involucren a los usuarios en la toma de decisiones sobre el manejo del agua en su acuífero a través de un proceso de interacción social que reconozca la heterogeneidad de actores (Academia de Ingeniería de México, 2010; Jiménez Cisneros et al., 2010; Llamas y Custodio, 2002; UNAM y SACMEX, 2013). Se requiere incentivar la participación del gobierno, usuarios y autoridad, pues como menciona Nagendra y Ostrom (2012) (En: Cruz-Ayala y Megdal, 2020) las interacciones entre los actores de varias agencias, como las federales, estatales y municipales, podrían ser más importantes que los cambios en la estructura legal formal.
- **La unidad básica de gestión es la cuenca:** Las razones por las que es reconocida a la cuenca como territorio base para la gestión integrada es porque funcionan como unidades de captación y concentración del agua derivada de las lluvias, además que dentro de la cuenca se generan interrelaciones e interdependencias entre los usos y usuarios del agua. (Dourojeanni et al., 2002).
- **Organizaciones de gestión a nivel de cuenca:** Estas deberán de poseer características específicas como que sean desconcentradas y autónomas y que cuenten con una representatividad adecuada, como órganos de participación y equipos técnicos de apoyo (Academia de Ingeniería de México, 2010; Llamas y Custodio, 2002; UNAM y SACMEX, 2013).
- **Mejorar la información disponible:** La mejora en la calidad y cantidad de información disponible sobre los recursos hídricos es un asunto de vital importancia para la correcta toma de decisiones, además este tipo de información debería estar libre para su consulta por cualquier persona, con el objetivo de que los usuarios estén informados sobre el estado actual del recurso. Un ejemplo de información esencial es contar con un inventario de licencias y derechos de agua completo y actualizado (Jiménez Cisneros et al., 2010; Llamas y Custodio, 2002).
- **Considerar el cambio climático** y sus efectos en los eventos extremos.

- **La eficiencia, el reúso y la recirculación** del agua deben incentivarse económica y fiscalmente (Jiménez Cisneros et al., 2010).
- **Legislación y normas adecuadas:** La elaboración de políticas, programas y planes de acción es importante por la complejidad multifactorial del agua (es parte de procesos sociales, económicos y políticos amplios), por lo que una legislación de aguas completa ofrece considerables ventajas, debido a que proporciona una base legal para la gestión efectiva y sustentable del agua subterránea (Nanni et al., 2002), por medio de:
 - lineamientos y limitaciones para el ejercicio de los poderes públicos
 - disposiciones para la cuantificación, la planificación, la asignación y la conservación de recursos de agua subterránea, incluyendo, entre otros, los derechos de extracción y uso de agua
 - un sistema de permisos para descarga de agua residual que ayude a proteger el agua subterránea contra la contaminación
 - definición de derechos y obligaciones de los usuarios de agua subterránea protección de derechos de uso, de derechos de terceras personas y del ambiente requisitos para el registro y calificación de perforistas de pozos
 - posible intervención administrativa en situaciones críticas (agotamiento o contaminación de acuíferos)
 - disposiciones para la cooperación interactiva entre administradores y usuarios del agua.
- **Cambios en los usos del agua y protección de las zonas de recarga**
 Algunas propuestas para fomentar un cambio en el uso del agua son:
 - 1) tarifas que desincentiven el consumo excesivo, es decir que el costo por el suministro de agua tiene que ser proporcional al consumo, estas tarifas deben desvincularse de aspectos políticos y definirse con criterios económicos, los subsidios no pueden ser generalizados, los apoyos deben asignarse a los usuarios cuya condición económica no les permita cubrir una tarifa normal;
 - 2) Cambios en los reglamentos de construcción y urbanización donde se tomen en cuenta el aprovechamiento y uso del agua, por ejemplo, proyectos que permitan separar el drenaje pluvial del residual, la utilización de depósitos ahorradores de agua de manera obligatoria, la cosecha de agua de lluvia en aquellos casos que sean técnica y económicamente viable;
 - 3) Invertir en el tratamiento del agua e impulsar su reúso (UNAM y SACMEX, 2013).
 Además del cambio en el uso actual del agua, para lograr un manejo sustentable de los acuíferos, es necesario revisar aspectos ambientales como la conservación de las zonas de recarga, por lo que es importante la

protección, reforestación y conservación de suelos en estas zonas (UNAM y SACMEX, 2013).

- **Gestión unificada del recurso hídrico superficial y subterráneos:** La Gestión Integral de los Recursos Hídricos especifica que se debería realizar una gestión unificada del agua superficial y subterránea de manera que se maneje como un único recurso debido a la interacción constante que existe entre ambas (Nanni et al., 2002), Es importante mencionar, que esta interacción solo aplica en algunos casos, por lo que se debe especificar.
- **Monitoreo:** Aumentar el monitoreo de niveles del agua subterránea y parámetros químicos de los acuíferos para contar con una base de información actualizada y con base en ella tomar decisiones que impactan de gran manera en la condición de los acuíferos. Sin embargo, en algunas regiones de países desarrollados (como EE. UU. y Australia) las redes de pozos de monitoreo a pesar de ser densas, la cuantificación de los cambios regionales de almacenamiento de agua subterránea aún es complicada, específicamente por las incertidumbres en los coeficientes de almacenamiento de acuíferos para convertir los cambios de nivel de agua en volúmenes de almacenamiento (Chen et al., 2016).

Algunas de estas soluciones se aplican en la gestión del agua en México, un ejemplo de lo anterior se presenta en (Jiménez Cisneros et al., 2010), donde se resume como ha sido el proceso por el cual el estado de Guanajuato, ha tratado de implementar una gestión integral del agua subterránea para resolver el problema de la explotación intensiva de sus acuíferos. Destaca que se han incluido la mayoría de las soluciones anteriores, como la inclusión de la sociedad en el manejo del recurso subterráneo, la creación de organizaciones de gestión locales, representadas por los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) y las Unidades Básicas de Gestión.

Existe evidencia de la mejora en la administración del agua subterránea por parte de los COTAS a diferencia de una administración centralizada, un ejemplo concreto es el caso del registro de pozos, ya que el REPDA registra 656 pozos mientras el COTAS tiene un total de 1126. Esto representa un rezago en la contabilización del volumen total de extracción por parte de CONAGUA.

Aunque el trabajo de estas organizaciones ha dado resultados positivos en cuanto a la administración y actualización de la información sobre el estado de los acuíferos, sigue habiendo carencias en la gestión integrada, pues no se han dado cambios en la reglamentación de los acuíferos y, en consecuencia, no se ha logrado detener o mitigar la explotación intensiva del acuífero. Esto podría resolverse con los puntos que se han planteado en el apartado anterior.

2.3 Mejora del manejo y la gestión integral mediante las propuestas de modificación a las NOM-011-CONAGUA-2015, NOM-NOM-014-CONAGUA-2003 y 015-CONAGUA-2007.

En este subcapítulo se presentan las razones por las que las propuestas para modificar las NOM-011-CONAGUA-2015, NOM-NOM-014-CONAGUA-2003 y 015-CONAGUA-2007, presentadas en el subcapítulo 1.4, pueden ayudar a la mejora del manejo y la gestión integral del agua que se pretende aplicar en México.

La NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, se puede clasificar como un “instrumento para la evaluación del recurso hídrico” que es una de las trece áreas clave de cambio para un gestión integral de recursos hídricos (Taylor et al., 2010), por tal motivo es de suma importancia contar con una norma que permita determinar el almacenamiento de un acuífero lo más real posible. La propuesta 2, que sugiere modificar la concepción del agua subterránea como almacenamiento independiente del agua superficial y tratar de integrar la influencia del agua superficial en el balance del agua subterránea según sea requerido, esto se maneja como necesario en un enfoque de gestión integral. Por otro lado, las propuestas 3 y 4, aunque son de carácter técnico, son igual de importantes para mejorar la gestión integral, pues su objetivo es obtener un valor más representativo de recarga media anual lo que permitiría tener una mejor estimación de la disponibilidad y a su vez, una mejora en la calidad de información sobre la disponibilidad de los acuíferos. La propuesta 5 menciona que deberían existir al menos dos métodos para calcular la disponibilidad, esto debido a los diferentes ambientes geológicos que existen en México, que en consecuencia generan una gran variedad de acuíferos (confinados, kársticos, en rocas fracturadas, etc.).

En el caso de la propuesta 6, la implementación de los documentos guía facilitaría el acceso a la información técnica a un mayor número de actores que participan en la gestión del agua. Lo anterior es congruente con el principio de mejora de la información disponible, además de que se podrían aplicar métodos más adecuados dependiendo del tipo de acuífero, ya sea para el cálculo de la disponibilidad o para el desarrollo de un proyecto de recarga gestionada.

La propuesta 7, de igual manera se realizó con el objetivo de mejorar la calidad y veracidad de la información sobre la extracción. Esta propuesta ayudaría a que los tomadores de decisiones y usuarios del agua subterránea posean información oficial y actualizada sobre el procedimiento establecido para calcular la

disponibilidad de sus acuíferos, el cómo se implementa y de qué manera impacta un proyecto de recarga gestionada. Esto brinda herramientas para que los usuarios participen de manera más informada en la gobernanza del agua subterránea lo cual contribuye a la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

La propuesta 8, trata no solo de la modificación de aspectos técnicos de las normas de recarga, sino también aspectos que se pueden modificar en la legislación del agua sobre la recarga gestionada de acuíferos. Aquí se indica explícitamente la intención de enfocar la recarga hacia una gestión integral, al sugerir cambiar el término “recarga artificial” por “recarga gestionada”. En esta misma propuesta, se hacen recomendaciones de carácter técnico, con el objetivo de identificar mejor los impactos que tendrá la recarga gestionada en el sistema acuífero y por lo tanto se podrá verificar que no afecte a los usuarios que dependen de este.

La propuesta 9, por otro lado, plantea soluciones que se basan en gestión integral, debido a que se integran las cuestiones sociales (como afecta y se involucra a la sociedad), naturales (funcionamiento del sistema acuífero) y legales, para el esclarecimiento de los vacíos en la legislación, que tienen que ver con el volumen de agua que se recarga y la falta de incentivos para desarrollar proyectos de recarga. La propuesta 10 propone identificar las zonas y los acuíferos donde es más viable llevar a cabo proyectos de recarga, con lo que se facilitaría esta tarea a los encargados de la gestión del agua, promoviendo así una gestión integral, al brindar una herramienta para facilitar la práctica de recarga gestionada.

Las propuestas del capítulo 1.4, se realizaron con el objetivo de optimizar aspectos técnicos, para otorgar a las normas y, por consiguiente, al cálculo de la disponibilidad de agua subterránea en México y a la recarga gestionada, un enfoque más integral.

Conclusiones

El análisis de las metodologías y disposiciones de las normas oficiales mexicanas 011, 014 y 015, planteado como objetivo principal y su comparación con normativas internacionales, permitió elaborar propuestas para mejorar su comprensión y facilitar su aplicación.

La comparación entre el contenido técnico y de gestión de las normativas internacionales (California, España e India), permitió identificar las áreas donde las normas y la legislación mexicana pueden modificarse para mejorar el cálculo de la disponibilidad, así como el marco legal de recarga gestionada.

Con base en la recopilación y análisis de información sobre la gestión del agua en México y la gestión integral de los recursos hídricos, se identificaron puntos clave

necesarios en la elaboración de las propuestas para modificar las normas oficiales, con un enfoque de gestión integral.

Se llegó a la conclusión que las NOM analizadas omiten aspectos técnicos, que podrían modificarse para mejorar los resultados de su aplicación, por ejemplo, la NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, no incluye métodos diferenciados para el cálculo de la disponibilidad según el tipo de acuífero, por otro lado, las normas de recarga podrían señalar como obligatorio la identificación de la dirección del flujo subterráneo o las fuentes de contaminación más importantes cercanas a los sitios de recarga. Con estos ejemplos, se demostraron algunas de las ausencias que existen en las normas oficiales mexicanas ya mencionadas.

El objetivo de elaborar propuestas para la modificación de las NOM en materia de agua subterránea para una gestión más integral se alcanzó satisfactoriamente, ya que estas se hicieron con base en los principios de la GIRH.

Referencias

- Academia de Ingeniería de México. (2010). *El Sector Agua En México: Situación Actual Y Estrategias Para Su Desarrollo Sustentable* (p. 106).
- Arreguín Cortés, F. I., Martínez Austria, P. F., y Trueba López, V. (2004). El agua en México, Una visión institucional. En *El Agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias.
- Bredehoeft, J. D. (2002). The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model. *Groundwater*, 40(4), 340–345.
- California Department of Public Health. (2014). *DPH-14-003E Groundwater Replenishment Using Recycled Water*.
- California Water Resources. (2020). *Handbook for Water Budget Development*.
- Carrillo Rivera, J., Peñuela Arévalo, L. A., Huizar Alvarez, R., Cardona Benavídes, A., Ortega Guerrero, M., Vallejo Barba, J., y Hatch Kuri, G. (2016). Conflictos por el agua subterránea. En *Geografía de México Una reflexión espacial contemporánea*. (pp. 151–166). Instituto de Geografía-UNAM.
- Carvajal Isunza, G., y Basurto González, D. (2004). El marco jurídico del agua en México. En *El Agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias.
- CGWB. (2007). *Manual on artificial recharge of ground water*. Central Ground Water Board.
- CGWB. (2020a). *Master Plan for Artificial Recharge to Groundwater in India*. Central Ground Water Board.
- CGWB. (2020b). *National Compilation on Dynamic Ground Water Resources of India*. Central Ground Water Board.

- Chávez, R., Lara, F., y Sención, R. (2006). El Agua subterránea en México: condición actual y retos para un manejo sostenible. *Boletín Geológico y Minero*, 117, 115–126.
http://www.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro39/pdf/lib39/in_03a.pdf
- Chen, J., Famiglietti, J. S., Scanlon, B. R., y Rodell, M. (2016). Groundwater Storage Changes: Present Status from GRACE Observations. *Surveys in Geophysics*, 37(2), 397–417. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9332-4>
- CONAGUA. (2016). *Normas Oficiales Mexicanas (NOM) Vigentes del Sector Hídrico*. www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-nom-83264
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tijuana (0201), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA* (p. 28).
- Cobo, E., Robert, Y., Piñeiros, M. L., Calisto, M., y Gay de Montella, R. (2018). *Aguas compartidas, enfoques y herramientas para una mejor gestión del agua*. UICN.
- CONAGUA. (2021). Estadísticas del Agua en México 2021. *Comisión Nacional Del Agua*, 66–85.
- Cruz-Ayala, M. B., y Megdal, S. B. (2020). An Overview of Managed Aquifer Recharge in Mexico and Its Legal Framework. *Water*, 12(4).
<https://doi.org/10.3390/W12041072>
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., y Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. In *Serie Recursos Naturales e Infraestructura* (Vol. 47). <https://doi.org/10.1680-9025>
- Custodio, E. (2001). *Hidrología Subterránea Tomo II* (p. 1157).
- Das, S. (2022). Groundwater Management in India: Some Recent Breakthroughs. *Journal of the Geological Society of India*, 98(2), 151–154.
<https://doi.org/10.1007/s12594-022-1950-0>
- Demiroglu, M. (2019). Groundwater budget rationale, time, and regional flow: a case study in Istanbul, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 78(24).
<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8713-2>
- Dillon, P., Vanderzalm, J., Sidhu, J., Page, D., y Chadha, D. (2014). A Water Quality Guide to Managed Aquifer Recharge in India. *CSIRO Land and Water and UNESCO Report of AusAID PSLP Project ROU 14476, December*, 67.
- Escolero Fuentes, O., Gutiérrez Ojeda, C., y Mendoza Cázares, E. Y. (2017). *Manejo de la Recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (O. Escolero Fuentes, C. Gutiérrez Ojeda, y E. Y. Mendoza Cázares (eds.)). IMTA.
- European Commission. (2016). *Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD*.
<https://doi.org/10.2779/352735>
- European Parliament Council of the European Union. (2000). Water Framework Directive. En *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* (Issue 7).
- Fernández Escalante, E., Henao Casas, J. D., San Sebastián Sauto, J., y Calero Gil, R. (2022). Monitored and Intentional Recharge (MIR): A Model for Managed Aquifer Recharge (MAR) Guideline and Regulation Formulation. *Water*, 14(21), 3405. <https://doi.org/10.3390/w14213405>
- Fernández Escalante, E., Henao Casas, J. D., Vidal Medeiros, A. M., y San

- Sebastián Sauto, J. (2020). Regulations and guidelines on water quality requirements for Managed Aquifer Recharge. International comparison. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 9(2), 7–22. <https://doi.org/10.7343/as-2020-462>
- Gonzalo, H. K. (2017). Agua subterránea en México : retos y pendientes. In *El agua en México Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 149–170). Fundación Friedrich-Ebert Stiftung.
- Healy, R. W., y Scanlon, B. R. (2010). *Estimating Groundwater Recharge* (Vol. 1). Cambridge University Press.
- Healy, R. W., y Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Jiménez Cisneros, B., Torregrosa, M. L., y Aboites, L. (2010). *El agua en México: cauces y encauces*. B. Jiménez Cisneros, M. L. Torregrosa y Armentia, & L. Aboites Aguilar (eds.); Primera edición. Academia Mexicana de Ciencias.
- Koïta, M., Yonli, H. F., Soro, D. D., Dara, A. E., y Vouillamoz, J. M. (2018). Groundwater storage change estimation using combination of hydrogeophysical and groundwater table fluctuation methods in hard rock aquifers. *Resources*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/resources7010005>
- Leroux, D., y Pellarin, T. (2017). Remote sensing data assimilation: Applications to catchment hydrology. In *Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology* (pp. 363–399). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-104-8.50011-5>
- Llamas, R., y Custodio, E. (2002). *Acuíferos explotados intensivamente*. 18. Ministry of Water Resources. (2017). *Report of the GroundWater Resource Estimation Committee*. Ministry of Water Resources. <https://doi.org/10.1037/h0054879>
- Nagendra, H., y Ostrom, E. (2012). Polycentric governance of multifunctional forested landscapes. *International Journal of the Commons*, 6(2), 104–133. <https://doi.org/10.18352/ijc.321>
- Nanni, M., Foster, S., Dumars, C., Garduño, H., Kemper, K., y Tuinhof, A. (2002). *Gestión Sustentable del Agua Conceptos y Herramientas Legislación y Disposiciones Reglamentarias Sobre Agua Subterránea desde reglas consuetudinarias hasta la planificación integrada en cuencas*.
- Pyne, R. D. G. (2005). *Aquifer storage recovery: a guide to groundwater recharge through wells*. ASR Systems.
- Rahi, K. A., y Halihan, T. (2012). Identifying aquifer type in fractured rock aquifers using harmonic analysis. *GroundWater*, 51(1), 76–82. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00925.x>
- Rangan, A. K. (2016). Participatory Groundwater Management: Lessons from Programmes Across India. *IIM Kozhikode Society & Management Review*, 5(1), 8–15. <https://doi.org/10.1177/2277975215617861>
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J. S., Nigro, J., y Wilson, C. R. (2007). Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 15(1), 159–166. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0103-7>
- Rojas Calderón, C. (2019). Aspectos jurídicos sobre la Recarga Artificial de

- Acuíferos (RAA). Revisión desde el derecho de aguas chileno, con referencia a España y Australia. *Ius et Praxis*, 25(2), 151–188.
<https://doi.org/10.4067/s0718-00122019000200151>
- Rushton, K. R. (1988). Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. In I. Simmers (Ed.), *Estimation of Natural Groundwater Recharge* (pp. 223–238). Springer.
- Sakthivel, P Amirthalingam, S., & Starkl, M. (2014). *A study on law relating to groundwater recharge in India*. Rostrum's Law Review.
- Sastre Beceiro, M. (2009). Aspectos jurídicos de la recarga artificial de acuíferos: Regulación actual y retos. *Boletín Geológico y Minero*, 120(2), 279–288.
- Scanlon, B. R., y Healy, R. W. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18–39.
- Scanlon, B. R., Longuevergne, L., y Long, D. (2012). Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*, 48(4), 1–9.
<https://doi.org/10.1029/2011WR011312>
- SEMARNAT. (2009a). *NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. Diario Oficial.
- SEMARNAT. (2009b). *NORMA Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. -Características y especificaciones de las obras y del agua*. Diario Oficial.
- SEMARNAT. (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales* (p. 16). Diario Oficial.
- SGMA. (2014). *Sustainable Groundwater Management Act and Related Provisions*.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., y Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683), 503–505. <https://doi.org/10.1126/science.1099192>
- Taylor, P., Owen, R., y Tuinhof, A. (2010). *Gestión de aguas subterráneas en la GIRH Manual de capacitación* (p. 123). Cap-Net.
- UNAM, y SACMEX. (2013). *La crisis del agua en la Ciudad de México Retos y soluciones*.
- Ulibarri, N., Escobedo García, N., Nelson, R. L., Cravens, A. E., y McCarty, R. J. (2021). Assessing the Feasibility of Managed Aquifer Recharge in California. *Water Resources Research*, 57(3). <https://doi.org/10.1029/2020WR02929>
- Vasco, D. W., Kim, K. H., Farr, T. G., Reager, J. T., Bekaert, D., Sangha, S. S., Rutqvist, J., y Beaudoin, H. K. (2022). Using Sentinel-1 and GRACE satellite data to monitor the hydrological variations within the Tulare Basin, California. *Scientific Reports*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07650-1>
- Velez, M. V., y Vásquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología*, 20.
- Viaroli, S., Mastrorillo, L., Lotti, F., Paolucci, V., & Mazza, R. (2018). The groundwater budget: a tool for preliminary estimation of the hydraulic connection between neighboring aquifers. *Journal of Hydrology*, 556, 72–86.

Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*, 370(1–4), 207–213.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.009>