

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**SOBREEXPLOTACIÓN Y GESTIÓN  
DE SISTEMAS ACUÍFEROS**

POR:

**ING. ANA CAROLINA QUIROZ**

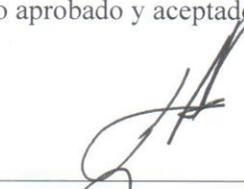
**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

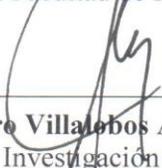
**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

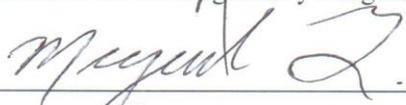
**SEPTIEMBRE DE 2020**



Nombre completo de la investigación. Tesis, Tesina o Estudio de Caso presentado por Nombre del alumno como requisito parcial para obtener el grado de nombre del grado, ha sido aprobado y aceptado por:

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Miguel Ángel González Núñez**  
Coordinador Académico

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Gerónimo Llerar Meza**  
Director de Tesis

**Septiembre 2020**  
\_\_\_\_\_

Fecha

Comité:

**Dr. Gerónimo Llerar Meza**  
**Dra. Lizbeth Salas Lechuga**  
**Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar**  
**M.I. Miguel Ángel Méndez Alvarado**

© Derechos Reservados  
**Ana Carolina Quiroz**  
Circuito No. I, Campus  
Universitario II  
Chihuahua, Chih. México

Septiembre 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

**ING. ANA CAROLINA QUIROZ**

**Presente**

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director Dr. Gerónimo Llerar Meza para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“SOBREEXPLOTACIÓN Y GESTIÓN DE SISTEMAS ACUÍFEROS”**.

#### Índice de Contenido

Agradecimientos  
Resumen  
Abstract  
Índice de Contenido  
Índice de Tablas  
Índice de Figuras  
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN  
Capítulo 2: AGUA SUBTERRÁNEA  
Capítulo 3: DISPONIBILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA  
Capítulo 4: EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL AGUA SUBTERRÁNEA  
Capítulo 5: GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA  
Capítulo 6: TAREAS DEL ESTADO DE GUANAJUATO EN LA GESTIÓN DEL AGUA  
Capítulo 7: CONCLUSIONES  
Referencias  
Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
**“Naturam subiecit aliis”**

**EL DIRECTOR**

**M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ**

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
U.A.CH.



DIRECCIÓN

**EL SECRETARIO DE  
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)

---

## Dedicatoria

*A cada una de las personas que estuvieron a mi lado,  
motivándome y haciendo esto posible.*

---

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi familia, que desde que tengo memoria siempre me ha motivado a seguir mis sueños y cumplir las metas que me propongo, acompañándome en cada paso que doy.

A Emmanuel, por ser parte de los buenos y malos momentos, con apoyo incondicional.

A mis amigos, por tenerme tanta paciencia y siempre brindarme un poco humor para seguir adelante.

A mi director de tesis el Dr. Gerónimo Llerar y la Dra. Lizbeth Salas, por siempre estar a mi lado, ayudándome a ser una mejor persona y crecer profesionalmente, ya que sin sus consejos y enseñanzas mi vida no sería la misma.

---

Olvidamos que el ciclo del agua  
y el de la vida son uno.

*- Jacques Cousteau-*

---

## Resumen

*En México la explotación del agua subterránea se ha vuelto una práctica común para atender a los problemas de abastecimiento que se presentan cada vez con más frecuencia, tales como la poca disponibilidad de aguas superficiales en las zonas áridas del país, la disponibilidad de aguas de buena calidad, la eficiencia en las líneas de conducción y distribución de agua potable y el incremento de las demandas para uso agrícola y público urbano. La sobreexplotación de los acuíferos, se produce cuando el volumen de agua extraído del subsuelo supera el volumen de la recarga natural, lo que provocara la disminución constante en el almacenamiento del acuífero, ya que la explotación intensiva no permite la recuperación del nivel piezométrico. Esta alteración puede llegar a causar diversos efectos negativos en los sistemas acuíferos dependiendo de la caracterización de los mismos. Algunos de los efectos observados comúnmente son el continuo descenso del nivel freático aunado a problemas de desertización, incremento en el costo energético para la extracción de agua subterránea, subsidencia o incluso modificaciones del ciclo hidrológico. Actualmente hay 105 acuíferos en condición de sobreexplotación en el país, por lo que es necesario partir del conocimiento hidrogeológico de los acuíferos y de los ordenamientos legales, para involucrar a las partes interesadas y llevar a cabo un plan integral de gestión de este recurso, que permita su uso sostenible o al menos responsable.*

**Palabras clave:** Agua subterránea, acuíferos, sobreexplotación, disponibilidad, gestión del agua.

---

## **Abstract**

*In Mexico, groundwater exploitation has become a common practice to address increasingly common supply problems, such as poor surface water availability in the country's arid areas, the availability of good quality water, efficiency in drinking water supply and distribution lines, and increased demands for agricultural and urban public use. Overexploitation of aquifers occurs when the volume of water extracted from the subsoil exceeds the volume of the natural recharge, resulting in a steady decrease in aquifer storage, as intensive exploitation does not allow the recovery of the piezometric level. This alteration can cause various negative effects on aquifer systems depending on their characterization. Some of the commonly observed effects are the continuous decline in the groundwater level coupled with desertification problems, increased energy cost for groundwater extraction, subsidence or even modifications of the hydrological cycle. There are currently 105 aquifers in overexploitation in the country, so it is necessary to take advantage of hydrogeological knowledge of aquifers and legal systems, to involve stakeholders and carry out a comprehensive management plan for this resource, which allows its sustainable or at least responsible use.*

**Keywords:** *Groundwater, aquifers, overexploitation, water availability, water management.*

---

## Índice de Contenido

Agradecimientos .....	v
Resumen .....	vii
Abstract.....	viii
Índice de Contenido.....	ix
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Figuras.....	xii
Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN .....	3
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 METODOLOGÍA .....	4
1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS .....	5
Capítulo 2: Agua Subterránea.....	6
2.1 ORIGEN DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	7
Capítulo 3: Disponibilidad del agua subterránea.....	12
3.1 DISPONIBILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	13
3.2 BALANCE HÍDRICO.....	14
3.3 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA NORMATIVA MEXICANA .....	15
3.4 METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN OTROS PAÍSES.....	21
Capítulo 4: Explotación intensiva del agua subterránea.....	28
4.1 PERSPECTIVA DE LA EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	29
4.2 CAUSAS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS.....	31
4.3 EFECTOS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS .....	39
4.4 SOBREEXPLOTACIÓN EN MÉXICO .....	45

---

Capítulo 5: Gestión del agua subterránea .....	69
5.1 GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	70
5.2 LA GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO .....	77
5.3 LA GESTIÓN DEL AGUA EN GUANAJUATO .....	84
5.4 PROGRAMA NACIONAL HÍDRICO 2019-2024 .....	90
Capítulo 6: Tareas del Estado Guanajuato en la Gestión del Agua .....	98
6.1 SITUACIÓN DE LOS NIVELES DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS EN EL ESTADO DE GUANAJUATO .....	99
6.2 PROGRAMA DE MANEJO DEL ACUÍFERO .....	100
6.3 REGLAMENTACIÓN DE ACUÍFEROS .....	101
5.4 PROGRAMA ESTATAL HIDRÁULICO DE GUANAJUATO: HORIZONTE DE PLANEACIÓN AL AÑO 2030 .....	103
Capítulo 7: Conclusiones .....	105
7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	106
Referencias .....	111
Curriculum Vitae .....	123

---

## Índice de Tablas

Tabla 1. Registro histórico de acuíferos sobreexplotados en México, Fuente: CONAGUA 1999, 2001a, 2002, 2005, 2006, 2008, 2010a, 2010b, 2011, 2012, 2013a, 2014, 2015b, 2016, 2017, 2018ah. ....	46
Tabla 2. Volumen concesionado para actividades primarias (Mm <sup>3</sup> /año) y el grado de presión generado sobre el recurso hídrico (2012), Fuente: La agricultura y la gestión sostenible del agua en México, 2015 .....	52
Tabla 3. Relación extracción/recarga de los acuíferos sin disponibilidad del Estado de Chihuahua, Elaboración propia con datos obtenidos de: CONAGUA (2015a, 2018a-2018ab, 2018ad, 2018af).. .....	59
Tabla 4. Volúmenes concesionados de los municipios más vulnerables a la sobreexplotación en el Estado de Chihuahua, Elaboración propia con datos obtenidos de: REPDA (2020a, 2020b).....	62
Tabla 5. Niveles de herramientas, instrumentos e intervenciones de gestión de agua subterránea necesarios para una etapa específica del desarrollo del recurso. Fuente: Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica, 2006a. ....	72
Tabla 6. Funciones clave para gestión de agua subterránea y roles institucionales. Fuente: Legislación y Disposiciones Reglamentarias Sobre Agua Subterránea desde reglas consuetudinarias hasta la planificación integrada en cuencas, 2006c..	75
Tabla 7. Funciones de gestión del agua subterránea. Fuente: México- Los Cotas: Avances en la Gestión Participativa del Agua Subterránea en Guanajuato, 2006f. ....	86
Tabla 8. Relación de indicadores sobre las metas para el bienestar y los parámetros, por objetivo prioritario del PNH 2020-2024. Fuente: Programa Nacional Hídrico 2020-2024, 2020. ....	93
Tabla 9. Parámetros para evaluar el cumplimiento de los objetivos en las estrategias del PNH 2020-2024. Fuente: Programa Nacional Hídrico 2020-2024, 2020. ....	94

---

## Índice de Figuras

Figura 1. Procesos del ciclo hidrológico. Fuente USGS, dominio público. ....	8
Figura 2. Disponibilidad de los acuíferos en México. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua, Disponibilidad de acuíferos 2018. ....	18
Figura 3. Personas afectadas anualmente por sequías 1996-2015, Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019. ....	34
Figura 4. Demanda global de agua por sector para el 2040, Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019. ....	37
Figura 5. Población del mundo: estimaciones (1950-2015) y proyección de variante media con intervalos de predicción del 95% (2015-2100), Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019. ....	38
Figura 6. Población por región: estimaciones (1950-2015) y proyección de variante media (2015-2100), Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019. ....	38
Figura 7. Acuíferos sobreexplotados 2017, Basado en: CONAGUA, Estadísticas del agua en México 2018. ....	47
Figura 8. Distribución de la precipitación pluvial normal 1981-2010, Fuente: CONAGUA, Atlas del Agua en México 2018. ....	48
Figura 9. Fuentes predominantes para usos consuntivos por municipio 2017, Fuente: CONAGUA, Estadísticas del agua 2018. ....	49
Figura 10. Gráfica de la población en México de 1910-2018. Elaboración propia con datos obtenidos de la serie histórica censal e intercensal del INEGI 1910, 1921, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2018. ....	51
Figura 11. Gráfica de la evolución del volumen concesionado de uso agrícola por tipo de fuente (2008-2017) (Miles de Hm <sup>3</sup> ), Fuente: Estadísticas del agua en México, 2018. ....	53
Figura 12. Mapa de impactos ambientales relacionados al uso intensivo del agua subterránea, Fuente: Domínguez, J. & Carrillo-Rivera, J.J en “El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México”, 2007. ....	55
Figura 13. Condición y disponibilidad de los acuíferos del estado de Chihuahua. Basado en los datos de los estudios de disponibilidad de los acuíferos del estado de Chihuahua de CONAGUA en 2018. ....	58
Figura 14. Gráfica de la población en el Estado de Chihuahua de 1910-2015. Elaboración propia con datos obtenidos de la serie histórica censal e intercensal del INEGI 1910, 1921, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015. ....	64
Figura 15. Evolución de la producción agrícola en el Estado de Chihuahua 2009-2018. Fuente: Infografía Agroalimentaria Chihuahua, 2019. ....	65
Figura 16. Etapas de desarrollo y necesidades de gestión en un acuífero importante. Fuente: Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica, 2006a. ....	71
Figura 17. Sistema de gestión del agua. Fuente: Felipe Arreguín, Comisión Nacional del Agua, 2010. ....	78



---

# Capítulo 1: Introducción



---

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La explotación del agua subterránea, se ha vuelto una práctica común por la facilidad con la que se proporciona agua de buena calidad para atender a los problemas de abastecimiento que se presentan cada vez con más frecuencia, tales como la poca disponibilidad de aguas superficiales en zonas áridas, la poca disponibilidad de aguas superficiales de buena calidad, la eficiencia en las líneas de conducción y distribución, y el acelerado crecimiento demográfico que se ha presentado desde mediados del siglo XX.

La explotación intensiva e incontrolada de las aguas subterráneas se produce cuando el volumen extraído del manto acuífero supera el volumen de la recarga natural (principalmente infiltración y flujo subterráneo), lo que provocará la disminución constante en el almacenamiento del acuífero, ya que la rápida explotación no permite la recuperación del nivel piezométrico.

Esta alteración puede llegar a causar diversos efectos negativos en los sistemas acuíferos dependiendo de la caracterización de los mismos. Algunos de los efectos observados comúnmente son el continuo descenso del nivel freático aunado a problemas de desecación, erosión e incrementos del costo energético para la extracción de agua, degradación de la calidad de agua subterránea, intrusión marina en acuíferos costeros, subsidencia o incluso modificaciones al ciclo hidrológico.

Las aguas subterráneas son un recurso de gran importancia para el abastecimiento de agua potable, el riego de la agricultura, abastecimiento del sector industrial y otros usos productivos, por lo que no se puede prescindir de ella. Sin embargo, todos los usos del agua tienen un valor económico, social y ecológico, por lo que la utilización del agua subterránea también debe asumir los impactos negativos que genera su explotación y no solo obtener los beneficios que proporciona.



Por ende, la disponibilidad del agua es un indicador para determinar la eficiencia con la que se está gestionando este recurso, ya que se asume que las aguas subterráneas son una fuente segura y económica del agua, mientras sean administradas de forma responsable y sostenible (Custodio et al., 2008). No obstante, la gestión de los acuíferos que están sometidos a un régimen intenso de explotación, puede llegar a ser un problema sumamente complejo debido a los intereses sociales y económicos que representa, donde la administración del agua subterránea se convierte en un juego de prioridades.

## **1.2 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN**

El conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos, proporciona una visión más amplia sobre el manejo de las aguas subterráneas en cuanto a su explotación, control y monitoreo.

## **1.3 OBJETIVOS**

Determinar y explicar las causas y los efectos de la sobreexplotación en el contexto de la gestión de los recursos hídricos.

Por su parte los objetivos específicos de la presente tesis son:

- Revisar las metodologías existentes en la literatura para determinar la disponibilidad de las aguas subterráneas;
- Identificar las causas que llevan a la sobreexplotación;
- Determinar los efectos que pueden llegar a presentarse en los sistemas acuíferos en condiciones de sobreexplotación;
- Analizar las acciones que son utilizadas en la actualidad para la gestión de los recursos hídricos en los acuíferos sobreexplotados;

- Proponer medidas de prevención, que faciliten la toma de decisiones para la gestión hídrica de los acuíferos

#### **1.4 METODOLOGÍA**

El agua subterránea que yace en los acuíferos, es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable a nivel mundial. Sin embargo, la gestión de los recursos hídricos es insuficiente ante la sobreexplotación de los acuíferos generada por algunos factores, tales como la concentración demográfica, la distribución de los recursos hídricos, las contribuciones de producción del sector agrícola y la extensa superficie de zonas áridas. Este ritmo de explotación trae consigo problemas ambientales, sociales y económicos.

Esta investigación permitirá conocer el comportamiento de los sistemas acuíferos ante la sobreexplotación del agua subterránea, con el propósito de determinar las causas y los efectos que esta actividad provoca, para la prevención de riesgos y administración de este recurso, antes de que sus efectos puedan llegar a ser irreversibles.

En este contexto, en la presente tesis se abordará la conceptualización de la disponibilidad de agua subterránea para determinar la existencia de una posible sobreexplotación en los mantos acuíferos, mediante el análisis de los marcos normativos y metodologías sobre el manejo del agua subterránea.

Los resultados que se deriven de esta tesis, serán evaluados de tal manera que permitan orientar a los analistas en la toma de decisiones en busca del desarrollo sostenible, tratando de conservar o recuperar el equilibrio de los acuíferos mediante la gestión del agua y el constante monitoreo, con la intención de prevenir y/o mitigar los efectos que produce la sobreexplotación.



---

## 1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el Capítulo 2 se presenta una descripción de los procesos hidrológicos que dan origen a las aguas subterráneas; se aborda lo que es el ciclo hidrológico y el papel del agua subterránea, además se manifiesta la importancia del agua subterránea en cuanto a su uso, cantidad y tiempo de resiliencia. A continuación, en el Capítulo 3 se aborda los marcos normativos y las metodologías para determinar la disponibilidad del agua subterráneas, desde el punto de vista del balance hídrico de una cuenca, que es una manera de aplicar la ecuación fundamental de la hidrología para conocer el funcionamiento de la misma, mientras que el Capítulo 4 se presenta el concepto de sobreexplotación, así como sus causas y sus efectos, además de la situación actual del país y del estado de Chihuahua. El Capítulo 5 trata de los fundamentos de la gestión del agua subterránea, en vista de mejorar la administración de este recurso. Por su parte en el Capítulo 6, se muestran las tareas realizadas por el estado de Guanajuato, para examinar el proceso de planeación y administración del recurso hídrico en esta zona. En el Capítulo 7, se presentan las conclusiones de las tareas realizadas y recomendaciones generales para el manejo sostenible del agua subterránea. Finalmente, a continuación del Capítulo 8 se encuentran las referencias bibliográficas citadas en este documento.



---

## Capítulo 2: Agua Subterránea



---

## 2.1 ORIGEN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El origen del agua subterránea se rige por el ciclo del agua, o también conocido como ciclo hidrológico, es un modelo conceptual que describe el almacenamiento y el movimiento de las masas de agua. Este proceso de la naturaleza conlleva el movimiento permanente del agua y con ello, implica cambios en su estado (sólido, líquido o gaseoso).

Para que se pueda generar esta circulación, es necesaria la acción de la radiación solar y de la gravedad, ya que gracias a estas dos fuerzas motrices es posible que el agua cambie de estado y pueda desplazarse desde los puntos más altos hacia los más bajos en toda la superficie terrestre.

Este transporte re circulatorio permanente, consta de cinco etapas principales para su funcionamiento, las cuales son la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escurrimiento (Figura 1). En cada etapa, se observa que el agua se desplaza para almacenarse en un reservorio, hasta que llegue el momento para volver a desplazarse a un nuevo reservorio. En la naturaleza podemos encontrar diferentes tipos de reservorios, en los que el agua puede estar almacenada en sus diferentes estados físicos, algunos ejemplos de reservorios pueden ser los ríos, lagos, océanos, glaciares, humedad atmosférica o agua subterránea.

Las aguas subterráneas se encuentran debajo de la superficie terrestre, ocupando los poros y grietas del suelo, o en dado caso, las cavidades y fracturas de las rocas. El agua de estos reservorios procede principalmente de la infiltración de la precipitación y el deshielo de los glaciares (Gleick, 1996).

El horizonte formado por los materiales del subsuelo que permiten alojar y transitar el agua se le conoce como acuífero. Un acuífero puede llegar a tener espesores de uno cuantos metros hasta cientos de metros, mientras en su extensión espacial, cubre miles de metros

cuadrados. La capacidad de almacenamiento de un acuífero depende de la proporción de espacios vacíos con el volumen total de los materiales.

Las profundidades a las que se puede encontrar el agua subterránea son variables, en ocasiones brota a la superficie en forma de manantiales o descargan en ríos y lagos, no obstante, generalmente la profundidad del nivel freático es alto cerca de las zonas montañosas y va disminuyendo conforme se acerca a los valles o a cuerpos de agua que tienen conexión superficial-subterránea, de acuerdo a su comportamiento natural, sin embargo; las profundidades serán variables cuando la zona tenga extracciones de agua subterránea mediante pozos, debido a los conos de abatimiento que esta actividad genera.

El origen del agua también es un factor determinante en la profundidad a la que se puede encontrar, ya que las aguas meteóricas se consideran jóvenes debido al proceso de infiltración, ya que circulan a partir de la superficie de la corteza terrestre; por otro lado, las aguas subterráneas de otro origen presentan profundidades ligadas directamente con el proceso geológico al que están asociadas.



Figura 1. Procesos del ciclo hidrológico. Fuente USGS, dominio público.



Del total de agua en el globo terráqueo, el 97.25 % se encuentra en los océanos. Por su parte en la atmosfera se aloja el 2.75%. Las capas de hielos y los glaciales guardan el 2.05%; el agua subterránea que se puede encontrar hasta una profundidad de 4 km ocupa el 0.68%, en lagos se tiene de 0.01%; la humedad del suelo representa el 0.005% y en los ríos solo el 0.0001%. El 75% del agua en la superficie terrestre se encuentra encapsulada en glaciales o es salina.

La importancia del agua subterránea, se debe al reducido volumen de agua disponible en la superficie terrestre, puesto que el 98% se encuentra almacenada en el subsuelo (Hiscock and Bense, 2014). Investigaciones realizadas por Ambroggi (1977) y Garrels *et al.* (1975) han estimado que el volumen de agua alojados en los poros de asociados a los materiales del subsuelo, a grandes profundidades varía desde 53 Hkm<sup>3</sup> a 320 Hkm<sup>3</sup>.

De acuerdo a Kemper (2004), más de 2,000 millones de personas en todo el mundo dependen de las aguas subterráneas para su abastecimiento diario, y así como el desarrollo de la industrial y la agricultura.

La percepción de la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos a nivel mundial era, que en un determinado momento estos recursos fueron abundantes y de fácil acceso, no obstante la realidad es que son más escasos y gracias al desarrollo de las poblaciones, están siendo contaminados cada vez más, lo que repercute al crecimiento, desarrollo social y económico.

El fácil acceso a las aguas subterráneas ha permitido, en un par de décadas, la proliferación del uso de las mismas, lo que ha generado un impacto negativo enorme a los acuíferos y como consecuencia a situaciones graves de hoy en día, como es la sobreexplotación de las fuentes subterráneas; este hecho conduce ineludiblemente a la escasez de agua y a afectos colaterales negativos.

De acuerdo a Llamas y Custodio (2002), estos efectos negativos se refieren en su mayor parte al descenso del nivel del agua subterránea, el agotamiento del almacenamiento del agua subterránea, la interferencia con manantiales, agua superficial y ecosistemas



dependientes del agua subterránea, y a veces el deterioro de la calidad del agua y el descenso de la superficie del terreno.

En la literatura los problemas de subsidencia reportados como consecuencia a la sobreexplotación de los sistemas acuíferos, se tiene los casos en España (Molina et al., 2009), India (Sahu and Sikdar, 2011), Tailandia (Phienweij et al., 2006), México (Ortiz-Zamora and Ortega-Guerrero, 2010), USA (Holzer and Galloway, 2005), Rávena e Italia (Teatini et al., 2005); como en China (Li et al., 2006; Yang and Yu, 2006; Shi et al., 2007; Wu et al., 2010; Liu et al., 2010).

En México, según la Comisión Nacional de Agua, se tiene 757 cuencas hidrológicas, de la cuales 649 están disponibles, 105 se encuentran sobreexplotadas. Por otro lado, 8 de 13 regiones hidrológicas del país sufren de estrés hidrológico. Con respecta al uso del agua, el 76% es agrícola; 14.4% público; 4.9% industrial y 4.7% energía eléctrica.

El agua es el fundamento de la vida, es un recurso crucial para la preservación de todos los seres vivos, ya sea vegetación, fauna o la vida humana. Todos los seres vivos están constituidos con una alta proporción de agua, por lo que es un componente importante de órganos, músculos y tejidos. Por lo tanto, la vida no existiría sin el agua.

En especial el agua subterránea es una fuente de abastecimiento confiable, ya que a pesar de que el agua que se infiltra en la superficie tarda cientos de años en llegar a la superficie freática, los volúmenes de agua que almacenan son por mucho superiores a cualquier reservorio superficial. Por lo que, cabe destacar que el manejo del agua en México se enfrenta a un reto de gran envergadura, debido a que en nuestro país, el uso del agua subterránea es muy elevado, sopesando que las dos terceras partes de la república mexicana son áridas, semidesértica o desérticas.

Así, que es indispensable el trazo de planes y estrategias para controlar o mitigar los efectos nocivos de la sobreexplotación de los acuíferos, lo que demanda un control más estricto de los encargados de la gestión y administración de los recursos hídricos, sobre los usuarios del agua, en el sentido de mejorar el uso de la misma; retomado la frase de Michael



---

Dell “ *Cualquier cosa que se pueda medir, puede mejorarse*”; por lo tanto, es de suma relevancia, someter a un proceso de evaluación de la condición hidrogeológica de los acuíferos, conocer la tendencia de los niveles piezométricos, caudales de extracción, balances de masas, regímenes de precipitación pluvial y escurrimientos, uso de suelo, etc.; es claro que esta evaluación no es solo a escala local de los usuarios, sino a escala regional, que nos permita conocer con certeza la sobreexplotación y sus efectos, y por qué no, la posible disponibilidad del agua subterránea, por supuesto el desarrollo de estas tareas bajo el rigor científico que demanda.



---

## **Capítulo 3: Disponibilidad del agua subterránea**

### **3.1 DISPONIBILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

La disponibilidad de agua subterránea, es una herramienta de gestión, la cual se basa en el análisis de la oferta y la demanda de este recurso hídrico. Comúnmente es determinada de acuerdo a la metodología del balance hídrico, ya que se basa en el análisis de las masas de agua. La oferta está dada por la cantidad de agua renovable, la cual principalmente está en función de la precipitación, por ende; está directamente relacionada con las variables climatológicas, incluido el cambio climático y los eventos meteorológicos extremos. Por otra parte, las demandas representan el volumen de agua necesario para cumplir con las actividades antropogénicas y el equilibrio ecológico.

La disponibilidad es utilizada como una medida para determinar y gestionar las concesiones de este recurso, ya que su valor representa el volumen de agua que aún puede ser utilizado sin provocar una disminución del almacenamiento. Además, puede ser utilizada en los mercados del agua para asignarle un valor monetario a este recurso, basándose en la cantidad y calidad del agua, así como los costos de extracción y distribución. Incluso es de gran utilidad para el análisis de factibilidad de la importación y exportación de agua a través de productos.

Al mismo tiempo, la disponibilidad es un indicador que va más allá del otorgamiento de concesiones, ya que el volumen existente de agua disponible, es un valor que constantemente debe ser monitoreado debido a la seguridad hídrica que representa ante aspectos sociales, económicos, ambientales o políticos. Por lo que la falta de disponibilidad de agua, puede verse reflejada en escasez, pobreza, freno del desarrollo social y económico, así como la degradación del medio ambiente. Esto le da un papel de suma importancia en la planeación y administración del agua subterránea.

### 3.2 BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico es una metodología para conocer el comportamiento de una región determinada, por medio de la cuantificación de los volúmenes de agua que están en constante movimiento de acuerdo al ciclo hidrológico, el cual es continuamente alterado por la acción del hombre. A través de este balance, es posible hacer una evaluación del recurso hídrico, para administrar dichas alteraciones.

Consiste en aplicar el principio de la conservación de la masa o la ecuación de continuidad. Mediante el cual, se cuantifican los volúmenes de agua en cada proceso del ciclo hidrológico de la zona definida en un periodo de tiempo específico, por lo que es necesario obtener previamente el modelo conceptual del funcionamiento del sistema.

De acuerdo al principio de la conservación de la masa, la masa que se encuentra en un sistema cerrado se mantiene constante, por lo tanto, se establece que las entradas en un sistema, deben ser iguales a las salidas del mismo, por lo que cualquier diferencia entre las entradas y salidas representa un cambio en el almacenamiento del sistema (FCIHS, 2009). Entonces, un balance hídrico siempre responde a una ecuación de tipo:

$$I - O = \Delta S / \Delta t$$

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación del Almacenamiento} \pm \text{Error}$$

Las entradas de un sistema, se definen como cualquier volumen de agua que llega al sistema y aporta su volumen al almacenamiento. Se considera como entradas del sistema la precipitación, retornos de riego, recarga por infiltración y flujo subterráneo que llega a la zona determinada, sin embargo; se pueden presentar otro tipo de entradas, dependiendo del modelo conceptual, tal es el caso de la inyección de agua como recarga artificial.



Las salidas del sistema, son todas las acciones en las que sale un volumen del sistema, como el volumen de la evaporación, transpiración, escorrentía, extracción de agua subterránea y salidas naturales, como manantiales o aportaciones a cuerpos de agua superficial y subterránea.

Aplicar la ecuación fundamental de la hidrología, puede llegar a ser una tarea tediosa debido a la constante insuficiencia de información para llevar a cabo un balance hídrico, aunado a la incertidumbre que proporcionan los volúmenes calculados en cada proceso hidrológico del modelo conceptual (FCIHS, 2009). Por otra parte, a pesar estas dificultades, el balance hídrico puede ser una herramienta para evaluar algún componente del sistema a partir de los componentes conocidos.

### **3.3 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA NORMATIVA MEXICANA**

El acceso al recurso hídrico, siempre ha sido una cuestión de interés social y económico, por lo que la disponibilidad del agua es una pieza clave para el continuo desarrollo de una región, por lo que la Comisión Nacional del Agua por medio de la NOM-011-CONAGUA-2015 plantea la metodología para determinar la disponibilidad de agua de un acuífero, la cual es continuamente aplicada para cada acuífero del país.

La CONAGUA define como disponibilidad media anual, “al volumen medio anual de agua subterránea que, cuando es positivo, puede ser extraído de un acuífero para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas. Cuando este valor es negativo indica un déficit” (CONAGUA,2015c). Por lo tanto, la disponibilidad de agua es una medida utilizada para gestionar la aprobación de nuevas concesiones, la programación hídrica, planes de manejo y además la declaración de vedas y reservas de agua (Chávez et al, 2006), entonces;



es natural pensar que la disponibilidad también puede ser un indicador para valorar dicha gestión.

La metodología utilizada en México de acuerdo a la NOM-011-CONAGUA-2015 para determinar la disponibilidad de agua subterránea, parte del siguiente planteamiento:

$$\begin{array}{l} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA} \\ \text{ANUAL DE AGUA DEL} \\ \text{SUBSUELO EN UN ACUÍFERO} \end{array} = \begin{array}{l} \text{RECARGA TOTAL} \\ \text{MEDIA ANUAL} \end{array} - \begin{array}{l} \text{DESCARGA} \\ \text{NATURAL} \\ \text{COMPROMETIDA} \end{array} - \begin{array}{l} \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{AGUAS} \\ \text{SUBTERRÁNEAS} \end{array}$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la disponibilidad está en función de tres factores: la extracción de aguas subterráneas, que consiste en la sumatoria de los volúmenes concesionado en el REPDA o bien el volumen de extracción total obtenido de un estudio hidrológico previo; la descarga natural comprometida, que cuantifica el volumen de agua que es descargado naturalmente en manantiales o directamente a otras cuencas, así como el caudal base de los ríos; y finalmente, la recarga total media anual, que implica una mayor dificultad para ser cuantificada a pesar de los métodos (principalmente empíricos) existentes para determinarla, por lo que la metodología propuesta en la NOM-011-CONAGUA-2015 indica la aplicación del método del balance hídrico en el subsuelo para determinar la recarga total, el cual esta expresado por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{l} \text{RECARGA TOTAL} \\ \text{(SUMA DE ENTRADAS)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{CAMBIO DE ALMACENAMIENTO} \\ \text{DEL ACUÍFERO} \end{array} + \begin{array}{l} \text{DESCARGA TOTAL} \\ \text{(SUMA DE SALIDAS)} \end{array}$$

En esta ecuación el cambio de almacenamiento será determinado mediante la evolución de los niveles piezométricos en relación a un coeficiente de almacenamiento. Por otra parte, la descarga total, estará dada por la sumatoria de todas las posibles salidas, ya sean descargas naturales tales como caudales base, manantiales, flujos subterráneos y evapotranspiración, además de la extracción de agua subterránea. De acuerdo a lo anterior, la ecuación anterior podría plantearse como a continuación, mostrando todos los factores que influyen en el balance hídrico para la determinación de la recarga total.

$$\text{Recarga total} = \Delta v + (C_b + D_m + E_T + F_{sub} + Ext)$$

Donde:

$\Delta v$ = Cambio de almacenamiento

$C_b$ = Descargas naturales presentes en el caudal base

$D_m$ = Descargas naturales en manantiales

$E_T$ = Descargas naturales por medio de la evapotranspiración

$F_{sub}$ = Descargas naturales presentes por medio de un flujo subterráneo

$Ext$ = Extracción de aguas subterráneas

Como en cualquier balance hídrico, dicho análisis debe tener especificaciones en cuanto al tiempo y el espacio, dado lo anterior, los volúmenes cuantificados para aplicar la metodología estipulada en la normativa mexicana, deberán ser determinados para una zona definida y un intervalo de tiempo específico, por lo que, al obtener el resultado del volumen de la recarga total, este valor deberá ser dividido entre el número de años o el periodo de tiempo estipulado en el que se analizó el balance. Entonces, el valor final obtenido de la recarga total media anual, estará determinado de acuerdo a:

$$\text{Recarga total media anual} = \frac{\text{Recarga total (obtenida del balance)}}{\# \text{ de años del intervalo de tiempo utilizado}}$$

O bien

$$\text{Recarga total media anual} = \frac{\Delta v + (C_b + D_m + E_T + F_{sub} + Ext)}{\# \text{ de años del intervalo de tiempo utilizado}}$$

De acuerdo a la metodología citada anteriormente, la disponibilidad del agua subterránea será determinada de acuerdo al agua de recarga en el acuífero a la cual se le restará el volumen de agua concesionada y comprometida, dando lugar a la evaluación de la disponibilidad en cuanto a disponibilidad o déficit, donde al ser un valor positivo la

disponibilidad permitirá nuevos usos y/o concesiones, y en caso de presentar un déficit, presentando un valor negativo o nulo, no se permitirán nuevas concesiones.

La Ley Aguas Nacionales establece que se debe tomar en consideración la disponibilidad para el otorgamiento de concesiones. Por lo tanto, la disponibilidad media anual muestra la relación entre la oferta y la demanda del recurso hídrico (Arreguín et al, 2004).

La disponibilidad de agua, es un factor económico determinante en el desarrollo de un país, sin embargo; México suele ser considerado como un país con poca disponibilidad de agua (Sosa, 2012), ya que, ante la creciente demanda de los sectores agrícola, industrial y público, constantemente se está incrementando el déficit en los acuíferos principalmente en zona norte y centro del país, dejando de lado el desarrollo sostenible. A continuación, se muestran la disponibilidad de los acuíferos (Figura 2):

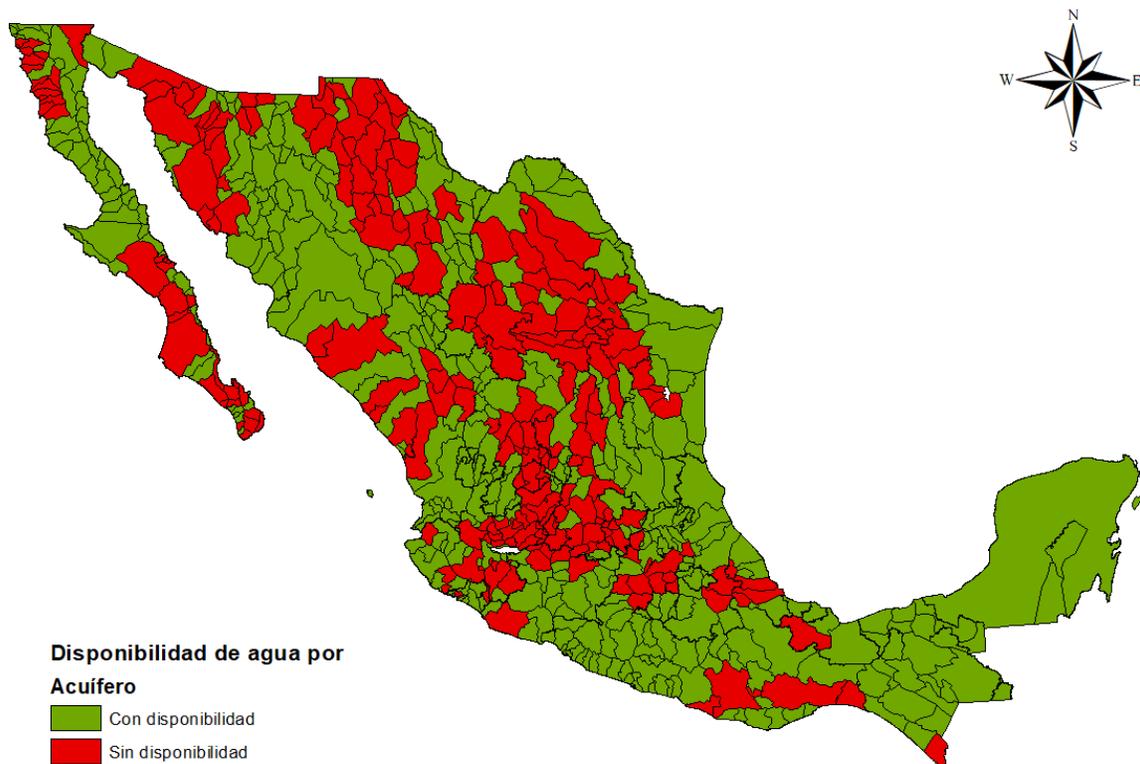


Figura 2. Disponibilidad de los acuíferos en México. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua, Disponibilidad de acuíferos 2018.

En las estadísticas más recientes del agua, muestran que, en 2017, 448 acuíferos de un total de 653, tienen disponibilidad de agua (CONAGUA, 2018ah). Sin embargo, se cree que la disponibilidad del agua en México es menor a los valores presentados en documentos oficiales (Gil et al, 2014), debido a la dificultad que puede representar hacer la cuantificación con datos reales y exactos de los volúmenes de extracción de agua subterránea y la estimación de la recarga, ya que estos elementos proporcionan un alto grado de incertidumbre.

En el país, la estimación de la recarga es el valor con más incertidumbre debido a la aplicación de los métodos teóricos para su determinación, debido a las notables diferencias que existen entre las zonas húmedas y las áridas del país, ya que estas metodologías tienden a sobrestimar o subestimar de forma considerable la recarga de los acuíferos en zona áridas o semi-áridas.

En 1997, Bredehoeft señaló que la recarga ya sea natural o artificial es muy difícil e incluso imposible de cuantificar, además indicó que generalmente la recarga no sufre ningún cambio por efecto de la explotación de agua subterránea. Partiendo de esta conceptualización demostró que el rendimiento sostenible de un acuífero no está en función de su recarga, sino los volúmenes de captura provenientes de la descarga natural (Chávez, 2006). A partir de este planteamiento, propone una metodología para estimar la disponibilidad física actual, basada en la teoría de Theis-Bredehoeft de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$DPF= DNA + \Delta VA - DNC$$

Donde:

DNA= Descarga Natural Actual, el cual es un valor promedio anual calculado a largo plazo

$\Delta VA$ = Variación en el almacenamiento, este parámetro está determinado de acuerdo a las variaciones en los niveles piezométricos, por lo que será positivo al presentar un incremento en el nivel freático, y será negativo al presentar un descenso en los niveles que representa el abatimiento del acuífero.

DNC= Descarga Natural Comprometida



Esta ecuación de disponibilidad física podría ser aplicada a la disponibilidad oficial, mediante la siguiente ecuación:

$$DPO = DPF + (VEA - VEC)$$

Donde:

DPF= Disponibilidad Física del agua subterránea

VEA= Volumen de Extracción Actual, el cual es un valor promedio anual calculado a largo plazo

VEC= Volumen de Extracción Concesionado, determinado por la sumatoria de todos los volúmenes concesionado en el REPDA.

En la ecuación anterior, se muestra como la disponibilidad oficial puede estar en función de la disponibilidad física y la variación entre los volúmenes de extracción actuales y concesionados, esta variación representa la sobreestimación o subestimación generada por el incremento en los volúmenes de extracción a largo plazo (VEA)(Chávez, 2006).

Al poner la disponibilidad física del agua en función de la descarga natural, se elimina una gran parte de la incertidumbre que era provocada por las recargas ya sean naturales o artificiales. Sin embargo, esta metodología sigue considerando descargas naturales concesionadas y extracciones concesionadas, pero le ha dado un nuevo peso a la descarga natural de los acuíferos, ya que, a diferencia de la metodología descrita en la normativa mexicana, se enfoca en la reducción de la descarga a través del tiempo y no en la relación de extracción/recarga. De acuerdo a las condiciones climatológicas e hidrogeológicas que se presentan, es evidente la necesidad de adaptación de la normativa para el análisis de la disponibilidad en las diferentes zonas del país.



---

### **3.4 METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN OTROS PAÍSES.**

En la actualidad, de forma generalizada, una de las mayores necesidades y preocupaciones de la población mundial, es la disponibilidad de agua subterránea, por lo que cada nación ha tomado las medidas necesarias de acuerdo a sus necesidades, para plantear metodologías para determinar la condición de explotación de los acuíferos.

En México la metodología es determinada por la NOM—011-CONAGUA-2015, sin embargo, existen publicaciones que plantean que el valor real de la disponibilidad tiene que estar restringido o condicionado en relación a cuatro factores: la relación costo-beneficio para comprobar su rentabilidad, la distribución espacial y temporal de la precipitación, la calidad del agua y los volúmenes y calidades del agua necesarias para mantener el equilibrio ecológico (Gil et al, 2014).

En el caso de Chile, por medio del Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas, se estipula que además de demostrar la existencia del recurso hídrico para otorgar nuevos derechos de aprovechamiento, será necesario demostrar la existencia de disponibilidad de la fuente acuífera que proporcionará dicho recurso (MOP, 2008).

Aunado a estos requisitos, en el Art 22 de la Norma de exploración y explotación de agua subterráneas (DGA, 2008), se exige como requisito la comprobación del caudal susceptible a extraer, que el nuevo aprovechamiento no interfiera con los derechos de terceros, incluyendo la relación entre el agua superficial y subterránea, y un espaciamiento mínimo de 200m entre captaciones. Debido a los esfuerzos por mantener y preservar el equilibrio del medio ambiente, los volúmenes concesionados pueden ser reducidos si interfieren entre usuarios o incluso la conexión de los acuíferos (Art 30., DGA, 2008) ya que la explotación del agua subterránea debe ser adecuada para su conservación a largo plazo (MOP, 2008).

En este país, la disponibilidad del agua subterránea es determinada utilizando la metodología del balance hídrico de forma similar a la normativa mexicana para determinar la relación de la oferta y la demanda. Sin embargo, la metodología chilena utiliza el concepto de caudal de explotación sostenible, este es un indicador por medio del cual se determina si se pueden otorgar derechos del agua. Consiste en la oferta de agua que tiene la unidad acuífera de acuerdo a sus recursos renovables (recarga) y las necesidades del entorno para seguir en equilibrio (descargas naturales/caudal ecológico).

Para mantener el equilibrio, este indicador no podrá ser mayor al valor de los recursos renovables menos las necesidades hídricas del entorno. Basado en esta conceptualización, la metodología plantea el cálculo del caudal de explotación sostenible de acuerdo al balance hídrico por medio de un modelo matemático.

La metodología explica los métodos utilizados para la obtención de los valores correspondientes a los elementos del balance hídrico con ayuda de métodos geoestadísticos, para finalmente ser ingresado a un modelo matemático robusto que está sujeto a diversas variables meteorológicas, ya que el país es muy susceptible a los cambios climáticos (MOP, 2017; Ortiz, 2014).

A partir de modelos de simulación hidrogeológicos, el gobierno determina cuando es posible otorgar nuevos derechos de agua permanentes, por medio del análisis del caudal de explotación sustentable. Este caudal es considerado como el recurso disponible que puede ser utilizado de la fuente que lo provee (MOP, 2008). Cuando se extrae volúmenes de agua mayores al recurso disponible, empieza la sobreexplotación de dicha fuente. A pesar de que la legislatura está tomando medidas para la correcta gestión de sus recursos hídricos tratando mantener en equilibrio sus acuíferos con las metodologías anteriores, existen problemas de sobre-otorgamiento y extracción ilegal del agua, lo cual ha generado la sobreexplotación de algunos acuíferos (MOP, 2012).

Por su parte en la Unión Europea, es una asociación económica y política, en busca de una interdependencia económica que permitiera el desarrollo de todos sus miembros y con ello evitar conflicto entre naciones. Los países que integran esta asociación son Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chequia, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, Rumania y Suecia (UE, 2019).

Para poder lograr este objetivo, todos los miembros de la unión europea, están sujetos a incorporar y aplicar los acuerdo y normativas, impuestos por la Comisión Europea (instituto de la Unión Europea encargado del poder ejecutivo y de la legislatura). En materia de agua, el 22 de diciembre del 2000 se implementó la DMA (2000/60/CE) (Directiva del Marco del Agua) para dar inicio a la gestión del agua en Europa a causa de la presión que tiene este recurso debido al constante incremento de la demanda. Esta normativa busca proteger el agua de forma cualitativa y cuantitativa para su sostenibilidad, mediante objetivos medioambientales para homogenizar la gestión del recurso hídrico de todos los miembros de unión europea (MITECO, 2019).

Para evaluar en buen estado una masa de agua de forma cuantitativa, ya sea superficial o subterránea, debe cumplir cuatro objetivos de acuerdo a lo estipulado por la Comisión Europea (CE) en 2009:

- 1) *“La tasa media de captación a largo plazo no excede el recurso hídrico disponible”*
- 2) *“No hay disminución significativa de las condiciones químicas y/o ecológicas de las aguas superficiales como una alteración antropogénica del nivel piezométrico o cambio de las direcciones de flujo,”*
- 3) *“No se ha producido ningún daño significativo a los ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas como resultado de una alteración antropogénica del nivel del agua, y”*

4) *“No existe intrusión salina ni otro tipo de intrusiones como resultado de cambios sostenidos de la dirección del flujo inducidos por la actividad humana”*

Para llevar a cabo la evaluación, se deben realizar cuatro test cada uno enfocado a cada objetivo medioambiental. Sin embargo, el test del balance hídrico es el método utilizado para cuantificar, ya que los otros tres proponen revisiones para determinar si se cumple el objetivo o no respectivamente, ya que la disponibilidad estará condicionada a dichos objetivos.

La metodología para llevar a cabo el balance hídrico es similar a la normativa mexicana, ya que plantea que el estado del cuerpo de agua estará en función de que la extracción anual media a largo plazo no deberá exceder la recarga media a largo plazo, tomando en cuenta que esta última, es aminorada por el volumen de agua que representan los caudales ecológicos a largo plazo (CE, 2009).

En este balance, las entradas, que están representadas por la recarga total, son la sumatoria de la recarga directa por agua de lluvia, recarga de los cuerpos de agua superficial, pérdidas en conducciones urbanas, retornos de riego y entradas subterráneas laterales, por otra parte, el caudal para mantener las condiciones ecológicas, significa una salida natural, por lo que está conformado por la descarga a ríos, manantiales o algún otro cuerpo de agua superficial, evapotranspiración y salidas subterráneas laterales (IGRAC ,2006).

La diferencia entre estos elementos es lo que se considera el recurso hídrico renovable, por lo que finalmente las salidas directas, están representadas por las extracciones del acuífero. Por todo lo anterior, la disponibilidad estará dada por la diferencia del recurso hídrico renovable respecto a las extracciones directas, sin olvidar que dicha disponibilidad está sujeta al cumplimiento de los objetivos medioambientales.

A pesar de los intentos de la Unión Europea de homogenizar las legislaturas, y con ellas las metodologías utilizadas para la gestión del agua, se torna difícil aplicar la directiva debido a las diferentes disponibilidades de información entre países, e incluso dentro de ellos

mismos. Por lo tanto, se han estado utilizando diferentes metodologías para determinar el estado cuantitativo del agua subterránea.

En Reino Unido, se utiliza la metodología del balance hídrico y el buen estado cuantitativo se basa en la relación extracción/recarga en función del rendimiento específico del acuífero (Sy). Por otra parte, en Francia el buen estado cuantitativo del agua está en función de las extracciones, ya que este buen estado solo se logrará si las extracciones medias están por debajo de los recursos disponibles a largo plazo. Incluso dentro de los países, varían las metodologías utilizadas en diferentes estados, como es el caso de España, donde en algunas zonas el estado cuantitativo está relacionado a una extracción significativa, la cual está determinada de acuerdo a las tendencias de los niveles piezométricos, sin embargo; en lugares como Cataluña, es utilizado el índice de explotación que es determinado mediante el cociente de la extracción y los recursos disponibles (Vilanova et al., 2005).

Finalmente, a partir de la caracterización inicial de los recursos hídricos en toda la Unión Europea, será posible aplicar estrictamente la nueva Directiva del Marco del Agua y con ellos, homogenizar la gestión del agua.

Australia es un país que está expuesto a climas extremos, donde en una parte del país se encuentra la zona más seca del mundo y en el otro extremo una de las zonas más húmedas, por lo que el país constantemente tiene que hacer frente a sequías prolongadas y al mismo tiempo a lluvias torrenciales que causan graves inundaciones.

Dadas estas condiciones, a partir del 2006 el gobierno modificó totalmente su marco de gobernabilidad en lo que al agua respecta. La pauta principal de este cambio, es reducir la demanda en lugar de aumentar la oferta del agua, por lo que se han llevado a cabo acciones para mejorar las redes de distribución donde la demanda sea igual al suministro, se ha promovido la reutilización del agua, así como el tratamiento de aguas residuales provenientes de las aguas urbanas y captura de agua pluvial, la incorporación de plantas desalinizadoras y tecnologías de irrigación (AWA, 2011).

A partir de este cambio en la legislatura, se eliminaron todo tipo de subsidios por lo que el suministro de agua deja de ser operado por departamentos gubernamentales, para ser operados por empresas comerciales independientes, las cuales tienen la obligación de proveer una gestión sostenible del recurso hídrico y enfocarse en el rendimiento financiero (AWA, 2011), por lo que la disponibilidad del agua ahora está relacionada con el aspecto ecológico, social y los costos-beneficios.

El Bureau of Meteorology (BOM) brinda información sobre las reservas y flujos de agua, así como de los volúmenes extraídos y gestionados en todo el país, además, define la disponibilidad de agua nacional y la metodología que debe ser aplicada para su determinación.

La metodología aplicada en Australia se basa en el balance hídrico, donde el cambio del almacenamiento está dado por la diferencia entre las entradas y las salidas menos los decrementos (BOM, 2013). Los balances hídricos comúnmente son estimados a través de modelos matemáticos, donde mediante evaluaciones a largo plazo se obtienen los rendimientos sostenibles de los acuíferos, los cuales están en función de la extracción sostenible, para brindar un promedio anual del volumen de agua disponible (SKM,2006).

Al igual que en otros países, la cantidad de agua disponible, está limitada por las necesidades del medio ambiente, ya que el volumen de agua renovable (principalmente la recarga proveniente de la precipitación) estará disminuido por dichas necesidades ecológicas, las cuales en la práctica deberán ser compradas por el gobierno en el mercado libre del agua, para garantizar la preservación del entorno (AWA, 2011; Vardon et al., 2007). Además, el uso del agua no solo dependerá de la disponibilidad física del recurso, sino que también dependerá de la disponibilidad legal, la cual está en función de las normas locales de gestión, que pueden variar entre jurisdicciones, algunas zonas son gestionadas de acuerdo a la tasa de disminución de los niveles piezométricos (BOM, 2015).



---

En Australia, la disponibilidad es una herramienta para brindar información sobre el mercado libre del agua, así como la asignación de su valor monetario, ya que a partir de los volúmenes disponibles que constantemente son calculados, se definen las tarifas dinámicas de acuerdo a la disponibilidad del recurso, creando una economía del agua.

Para lograr este objetivo, el gobierno proporciona información actualizada sobre el mercado libre del agua, pero para que esta información sea confiable, el gobierno ha promovido la generación de información meteorológica con datos diarios, para obtener cálculos con menos incertidumbre en cuanto a la cuantificación de los volúmenes almacenados y renovables, de igual modo, mediante las empresas que brindan servicios de agua, se han implementado medidas que permiten monitorear los volúmenes de agua utilizados, lo que provee datos más exactos de las extracciones de agua subterránea, además de brindar control sobre ellas.

A pesar de las medidas implementadas, siempre existe el volumen de extracción proveniente de extracciones ilegales o extracciones no contabilizadas, por lo que, para conocer el estado de explotación de las unidades acuíferas, el gobierno utiliza como indicador el estrés hídrico, el cual relaciona el volumen total de agua extraída y el total de los recursos renovables (disminuido por los requisitos ambientales) (BOM,2019).



---

## **Capítulo 4: Explotación intensiva del agua subterránea**

#### **4.1 PERSPECTIVA DE LA EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

El agua subterránea ha sido utilizada a lo largo de la historia, para proveer suministros de agua potable, sin embargo; a partir de 1970, se presentó un acelerado incremento en el número de aprovechamientos de agua subterránea, que ha sido atribuido a la invención de la bomba de turbina, además del fácil acceso a la energía eléctrica y el avance en las técnicas de perforación (Custodio, 2000a; Custodio et al., 2000b).

Actualmente, la explotación de los mantos acuíferos está siendo utilizada para abastecer las demandas de tipo público urbano, industrial y agrícola en todo el mundo, por lo que el uso intensivo del agua subterránea se está volviendo una práctica común, principalmente en zonas áridas o semi-áridas y en zonas costeras, donde el acceso al agua superficial es limitado e insuficiente (Llamas & Custodio, 2002).

De forma general, a lo largo del capítulo anterior, se ha dejado ver que la definición de sobreexplotación en diversas partes del mundo, está dada por la relación directa de la extracción y la recarga, no obstante, en algunos países la sobreexplotación también asocia los coeficientes de almacenamiento y los cambios en los niveles piezométricos a dicha relación. En México, se determina que existe una condición de sobreexplotación cuando el volumen extraído del acuífero supera el volumen de la recarga natural (principalmente infiltración y flujo subterráneo), lo que provocará la disminución constante en el almacenamiento del acuífero, ya que la rápida explotación no permite la recuperación (CONAGUA, 2015c).

A pesar de que el agua subterránea tiene un papel importante en la vida cotidiana, el concepto de sobreexplotación, es un concepto que aún no está bien definido o al menos no de forma objetiva (Llamas & Custodio, 2002; Carrillo, 2014). Comúnmente está relacionado con el indicador de estrés hídrico del agua subterránea, ya que la sobreexplotación o minado de los acuíferos, muchas veces es analizado a partir de observaciones de efectos negativos.

Si bien es cierto que la explotación intensiva trae repercusiones, también es cierto que trae consigo beneficios que permiten el desarrollo de las ciudades. Por lo tanto, la sobreexplotación se vuelve una cuestión situacional o circunstancial, ya que puede tomar diferentes significados dependiendo de los intereses y prioridades en aspectos económicos, sociales e incluso políticos (Custodio, 2000a). Sin embargo, esto no quiere decir que sea correcto llevar a cabo la extracción de toda el agua subterránea que existe físicamente, sino que la explotación intensiva puede ser utilizada de forma estratégica para lograr objetivos específicos, tales como hacer frente a una sequía, combatir la pobreza o desarrollar una comunidad, de acuerdo a las necesidades locales.

Es de suma importancia tener presente que, tomar una decisión de este tipo, implica el compromiso de evaluar los impactos generados por el régimen de explotación, ya que sólo de esta forma será posible determinar si la explotación intensiva trae beneficios mayores a las repercusiones, ya que posteriormente estas afectaciones deberán ser compensadas (Llamas & Custodio, 2002).

De alguna forma, la sobreexplotación puede llegar a ser bien vista cuando cubre determinadas necesidades, a pesar de eso, es una actividad que tiene un avance progresivo por lo que difícilmente puede ser justificada de forma permanente. Por lo tanto, es necesario el análisis constante para conseguir una transición donde se reduzca la explotación intensiva y se puedan minimizar los impactos, ya que indudablemente se verá reflejado en problemas socioeconómicos (Pulido, 2001)

Sin embargo, las respuestas de los acuíferos ante un régimen de sobreexplotación, varían de acuerdo a las características de cada acuífero, ya que en acuíferos de pequeños espesores o poco almacenamiento, además de los acuíferos costeros, la respuesta es evidente en un periodo de tiempo corto, por otro lado, en acuíferos de grandes espesores y/o grandes almacenamientos, el tiempo de respuesta puede llegar a ser grande debido a las características hidráulicas y el movimiento del agua, e incluso se puede llegar a un nuevo equilibrio, lo que dificulta el correcto análisis de los límites de sobreexplotación (Pulido, 2001). El tiempo de

monitoreo necesario para el análisis de las respuestas hidrológicas, es equivalente al tiempo requerido para reducir el efecto de variabilidad en los impactos negativos de la explotación (Custodio, 2002).

Por todo lo anterior, se puede decir que no hay una forma del todo fiable para determinar la sobreexplotación de un acuífero, ya que comúnmente varía de acuerdo a diferentes conceptualizaciones e intereses, desde la incertidumbre que se tiene sobre la recarga e incluso sobre la extracción, hasta la perspectiva política, social o económica que pueda tomar, además; los efectos observados deberán ser representativos de todo el acuífero, los cuales es posible que tarden décadas en aparecer.

Dada esta idealización es difícil afirmar con certeza que la tasa de explotación de un acuífero es mayor a la tasa de recarga (Custodio, 2002). Pese a esto, para poder tomar decisiones en cuanto a la explotación de agua subterránea, es necesario tener el respaldo de un modelo conceptual del acuífero que se base en el monitoreo del mismo, el cual deberá ser alimentado por cálculos de flujo y transporte, además del modelado matemático. Solo así, será posible tener una buena comprensión y cuantificación del comportamiento del acuífero, y por ende, analizar las implicaciones que pueden tener diferentes alternativas de explotación con este método (Custodio, 2002; Carrillo, 2014).

## **4.2 CAUSAS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS**

La explotación del agua subterránea se ha vuelto una práctica común por la facilidad con la que se proporciona agua de buena calidad para atender a los problemas de abastecimiento que se presentan cada vez con más frecuencia, tales como la poca disponibilidad de aguas superficiales en zonas áridas, la poca disponibilidad de aguas superficiales de buena calidad, la eficiencia en las líneas de conducción y distribución, y el acelerado crecimiento demográfico que se ha presentado desde mediados del siglo XX.

El acelerado incremento de la demanda de agua subterránea, ha sido el motivo por el que hoy en día se hace una explotación intensiva de este recurso. Las causas de este incremento son variadas, ya que están sujetas a las necesidades locales de acuerdo a sus condiciones climáticas, hidrogeológicas, ambientales, sociales, económicas y políticas (Llamas & Custodio, 2002).

Alrededor del mundo, se habla sobre la relación que tiene la explotación intensiva con zonas áridas, semiáridas y costeras, siendo éstas las más vulnerables ante las condiciones climáticas (Pulido, 2000,2001; Llamas & Custodio, 2002; Martínez et al, 2002). Esto se debe, a que la distribución espacial y temporal del recurso hídrico difícilmente es homogénea, incluso a pequeñas escalas, por lo que en todo el mundo los acuíferos que se encuentran en estas zonas, presentan bajas disponibilidades de agua en comparación a la disponibilidad que presentan las zonas húmedas.

Además de las condiciones que impone la aridez, el cambio climático ha empezado a tener efectos en la disponibilidad del agua, ya sea superficial o subterránea. Estos efectos, se han ido presentando a causa del aumento de la temperatura a nivel global, provocando cambios en la precipitación y en su distribución espacio-temporal, afectando el comportamiento del ciclo hidrológico.

Sahuquillo A. (2009) menciona que los efectos del cambio climático pueden ser variaciones importantes en la precipitación, escorrentía, recarga y evapotranspiración, además de aumentar la severidad de sequías y avenidas.

La respuesta hidrológica de los acuíferos, ante las variaciones en la recarga que puede generar el cambio climático, está en función de la relación que tienen con los otros componentes del ciclo hidrológico, por lo que los acuíferos someros, costeros y kársticos, son los más vulnerables, los cuales pueden reaccionar en cuestión de semanas, meses o años, por otra parte; los acuíferos profundos con aguas fósiles o los considerados como acuíferos no renovables, al tener una baja o nula condición de recarga, la respuesta puede llegar a tomar siglos o miles de años (UNESCO, 2015). Sin importar el momento de impacto del cambio

climático, éste generará una mayor presión al recurso hídrico subterráneo, el cual de no ser gestionado correctamente podría llevar a la sobreexplotación de los mantos acuíferos.

La sequía, es otro fenómeno climático al cual comúnmente hace frente el agua subterránea. Puede ser definida como “una desviación temporal dentro de la variabilidad normal” (Zakhem & Kattaa, 2017) o como un evento de ausencia o disminución de lluvia en periodos húmedo de acuerdo a su comportamiento histórico (Velasco et al, 2005). Este fenómeno se ve reflejado como la insuficiencia temporal de agua, ya que la modificación de la precipitación, tiene serias repercusiones en la disponibilidad de agua, debido a la disminución de la recuperación de los recursos hídricos.

De acuerdo a las variaciones que puede presentar en cuanto a intensidad, duración y efectos, la sequía se puede clasificar en cuatro tipos: la primera es la sequía meteorológica, la cual consiste en la disminución de la precipitación, esta sequía puede ser de corta duración y se lleva el control en registros históricos de precipitación; la segunda, es la sequía hidrológica, esta sequía tiene condiciones más complejas a la meteorológica, ya que presenta una disminución de flujo en ríos, lagos y zonas de descarga naturales, por lo que es monitoreada mediante el flujo de las corrientes durante un largo plazo.

La tercera, es la sequía agrícola, la cual afecta directamente a la agricultura debido a las insuficientes condiciones naturales de humedad en la zona no saturada, provocando el bajo rendimiento de los cultivos principalmente en las zonas agrícolas de temporal, esta sequía puede tener una duración media y provoca impactos socioeconómicos relacionados a la producción,

Por su parte la cuarta, es la sequía de aguas subterráneas, donde la relación de los procesos hidrogeológicos ante los cambios en las variaciones hidrometeorológicas, provocan alteraciones en la cobertura de suelo, además de una disminución representativa en los niveles y en las descargas de los acuíferos, a causa de la sobreexplotación (Zakhem & Kattaa, 2017; Velasco et al, 2005). El grado de severidad de todas ellas, está en función del volumen de agua que no es abastecido debido a este fenómeno (Velasco et al, 2005). De acuerdo a

todo lo anterior, la sequía puede ser causa y consecuencia de la sobreexplotación de los acuíferos.

La sequía es un evento poco predecible que genera grandes impactos, por lo que ha sido considerada como el desastre natural más significativo en cuanto a impactos socioeconómicos en relación al producto bruto interno (PIB) (WWAP, 2018). La UNESCO reportó 22,000 muertes, la afectación de 1,100 millones de personas y daños que ascienden a 100,000 millones de dólares, a causa de las sequías durante 1995-2015 (WWAP, 2019). En 2018, se estima que la población afectada por este fenómeno es de 1,800 millones de personas (WWAP, 2018).

En la Figura 3 se muestra el número de personas afectadas anualmente por la sequía, donde China, India y Etiopía son los principales países afectados, por otra parte, México no tiene una cifra de la misma magnitud, pero se puede apreciar el impacto de la sequía en el centro del país, donde hay zonas áridas y semiáridas.

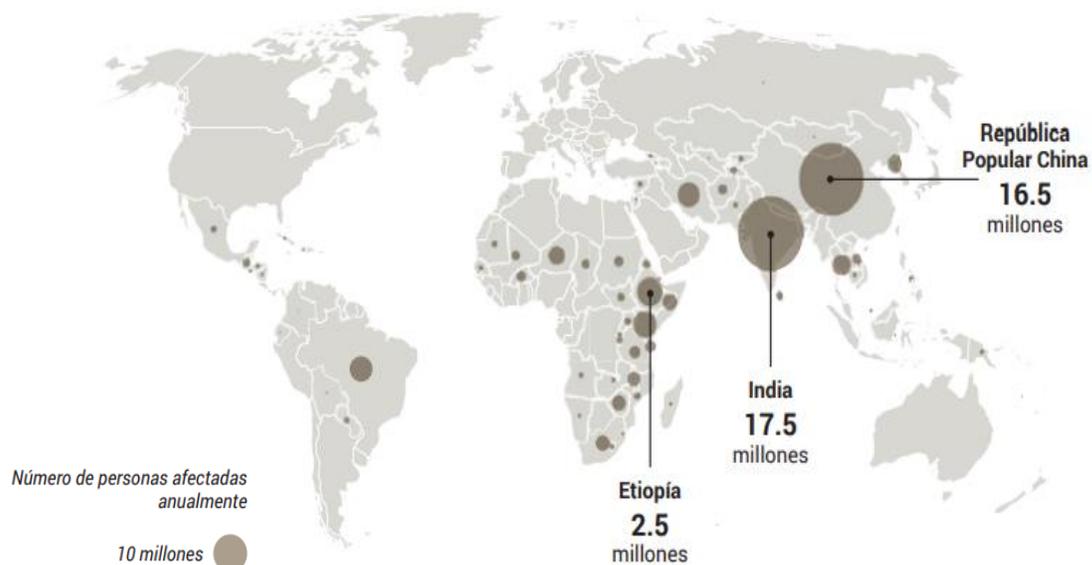


Figura 3. Personas afectadas anualmente por sequías 1996-2015, Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019.

En base a la gravedad de los impactos, comúnmente se utiliza el agua subterránea como un medio confiable para tratar de amortiguar los efectos de la sequía, sin embargo; cuando las sequías se vuelven duraderas, pueden provocar la explotación intensiva de este recurso o incluso el minado de los acuíferos. Este se puede volver un problema cada vez más común, ya que se espera que la frecuencia y magnitud de eventos meteorológicos extremos aumente a causa del cambio climático (WWAP, 2019).

Dejando de lado las posibles causas ambientales de la sobreexplotación, está la agricultura. Históricamente, la agricultura ha ido evolucionando y creciendo, sin embargo; el agua siempre ha sido un factor indispensable para el desarrollo de cultivos, por lo que, en la últimas cuatro décadas se llevó a cabo lo que Llamas (2004) nombró la revolución silenciosa. Esta revolución hace referencia a un fenómeno social y económico, donde los agricultores humildes de zonas áridas y semi áridas, como lo es México, el sureste de Asia y China, han perforado millones de pozos por iniciativa y financiación propia (Llamas, 2004; Sahuquillo, 2009). El gran consumo de agua subterránea para abastecer el sector agrícola, se debe en gran medida a dicha revolución, a pesar de que las aguas superficiales representan un menor costo para los agricultores, debido a los subsidios del gobierno (Llamas, 2004).

Entonces, la agricultura es una actividad que está muy relacionada con la economía y la erradicación de la pobreza, ya que, por una parte, la seguridad alimentaria depende de esta actividad, ya que provee una gran cantidad de alimentos. Por otra parte, tiene una gran aportación socioeconómica para los países y para el sustento propio de los agricultores. De acuerdo al Banco Mundial, el sector agrícola tuvo una participación del 33 % del producto interno bruto (PIB) mundial en 2014, además, es uno de los sectores más eficaces para aumentar los ingresos de las personas más pobres, ya que en 2016 se estimó que alrededor del 65% de los adultos pobres se dedican a esta actividad (Banco Mundial, 2019).

A principios del siglo XX, se estimó que 50 millones de hectáreas estaban destinadas a áreas de cultivo, para el año 2002, la cifra incremento hasta 250 millones de hectáreas y actualmente, esta cifra asciende a 300 millones de hectáreas, no obstante; se espera que las áreas de cultivos se sigan incrementando en el futuro para lograr las metas de producción de alimentos básicos (Martínez et al., 2002; WWAP, 2018, 2019). Sin embargo, ésta es una actividad que provee seguridad alimentaria a un alto costo hídrico, ya que, a nivel mundial, la agricultura representa el 69% de las extracciones anuales, por lo que este sector es el principal consumidor (WWAP, 2019). En regiones secas como España, México y California representa cerca del 80% (Sahuquillo, 2009; CONAGUA, 2018ah). En todo el mundo, el 43% del agua para riego proviene de aguas subterráneas (Siebert et al., 2010), y se espera que para el 2050, tenga un incremento del 39% de las extracciones anuales de agua subterránea para riego, por lo que se prevé que la demanda de agua subterránea ascienda de  $800\text{Km}^3/\text{año}$  a  $1,100\text{Km}^3/\text{año}$  en el 2050 (WWAP, 2019).

En la Figura 4 se muestran los volúmenes de demanda de agua y sus correspondientes predicciones para el 2025 y 2040, donde se puede observar la poca variación en el sector agrícola, y por otra parte, el incremento de demanda del sector municipal que corresponde al abastecimiento de agua potable para la población (WWAP, 2019). Aun así, el sector agrícola seguirá siendo el principal usuario. Por otra parte, desde el 2015, se estima que las tasas de crecimiento de la demanda agrícola de recursos hídricos, es simplemente insostenible (WWAP, 2015). La UNESCO prevé que la producción agrícola, tendrá que aumentar un 60% en el 2050 para proveer alimentos para la población futura, lo que tendrá grandes repercusiones en los recursos hídricos (WWAP, 2015, 2018). Por lo que, de acuerdo al panorama futuro de la agricultura y el uso de agua subterránea, es momento de crear planes de manejo y de modernización, antes de provocar serios daños a las reservas acuíferas.

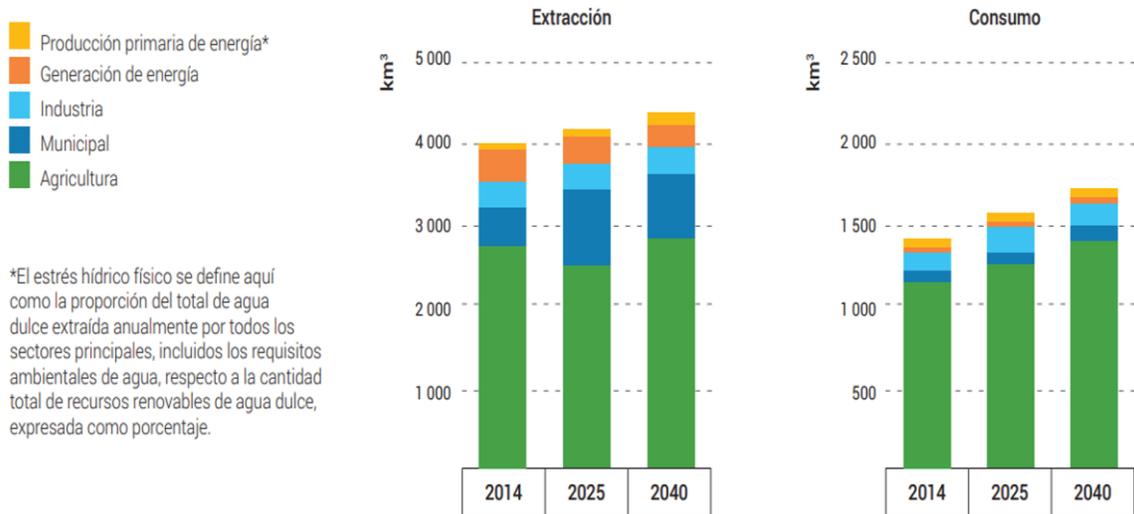


Figura 4. Demanda global de agua por sector para el 2040, Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019.

Como se puede observar en la Figura 4, el crecimiento de la población mundial también es un problema en relación al agua, ya que el incremento de esta, se ve reflejado en el aumento de la demanda para el abastecimiento de agua potable público, además del incremento de la demanda de alimentos, donde este último se ve representado por el incremento de la demanda agrícola. Por lo tanto, conforme aumenta la población del país, la disponibilidad de agua ira disminuyendo.

Desde 1950, se han observados cambios demográficos y el constante crecimiento poblacional, y se espera que siga incrementando (Figura 5) (WWAP, 2018). En 2017, la población mundial alcanzo una cifra de 7600 millones de personas, se proyecta un incremento de la población de alrededor de 8600 millones de personas para el año 2030 y de 9800 millones de personas para el 2050, así mismo, se espera que la población mundial para el año 2100 alcance valores entre los 10000 y 13000 millones de personas de acuerdo al análisis estadístico con un 95% de intervalo de predicción (Figura 5) (WWAP, 2019).

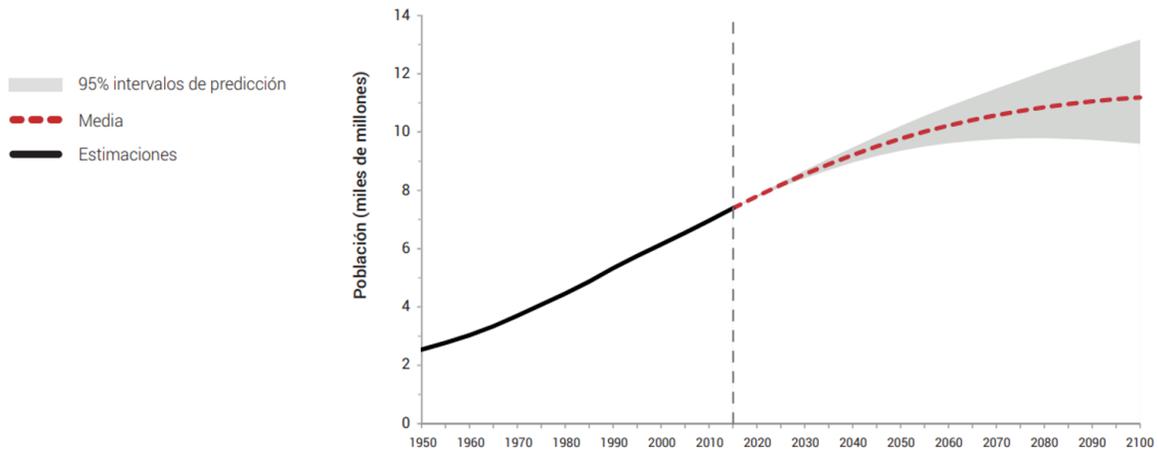


Figura 5. Población del mundo: estimaciones (1950-2015) y proyección de variante media con intervalos de predicción del 95% (2015-2100), Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019.

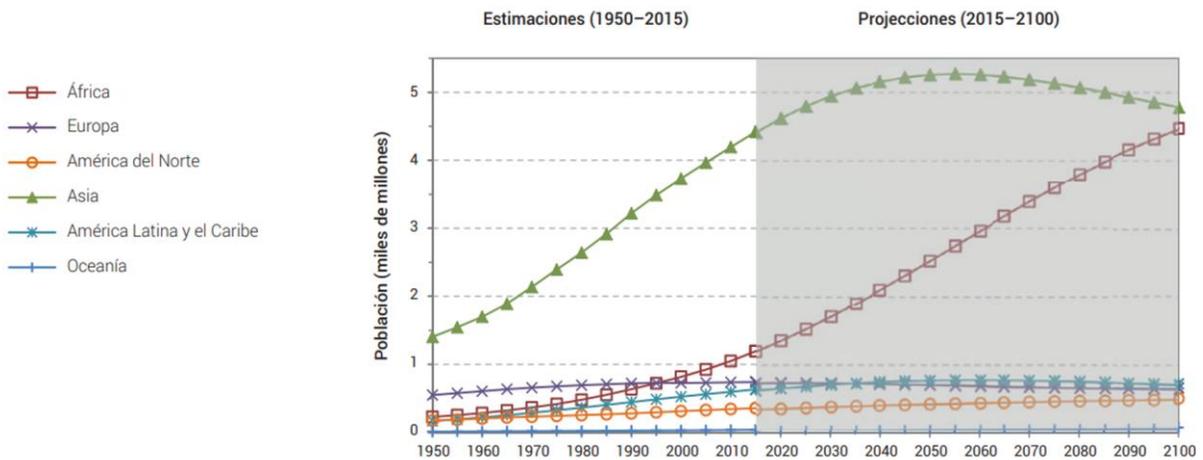


Figura 6. Población por región: estimaciones (1950-2015) y proyección de variante media (2015-2100), Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2019.

En la Figura 6 se muestra el incremento de la población por región y su correspondiente proyección al año 2100, donde se puede observar el acelerado incremento de la población en Asia y África, con una proyección de 4.8 y 4.5 de millones de personas para el 2100, respectivamente. Por otra parte, las regiones de Europa, América del Norte y América Latina y Caribe, presentan menores incrementos, proyectando una población mundial de 0.66, 0.5 y 0.75 millones de personas, respectivamente, dejando a Oceanía como la región con menos variación de su población, con una proyección de 0.1 millones de

personas para el 2100 (Figura 6). Debido a estos incrementos en la población mundial, se espera que la demanda de agua para uso doméstico tenga un aumento significativo, durante este periodo de tiempo, en todas las regiones (WWAP, 2018).

A pesar de las posibles causas más comunes que se mencionaron anteriormente, existen otras causas menos apreciables a simple vista, ya sea por su falta de observación o de seguimiento, tal es el caso de las extracciones clandestinas, así como la falta de supervisión de las extracciones. Las razones por las que estas condiciones aparecen pueden ser muy diversas, sin embargo; el uso deliberado de las aguas subterráneas por el limitado conocimiento que la población tiene de ellas, la falta de supervisión por parte de las autoridades correspondientes y el incumplimiento de la legislación, son las principales causas de estas.

### **4.3 EFECTOS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS**

La explotación intensiva del agua subterránea, supone una serie de impactos ambientales negativos que ocurren conforme se desarrolla dicha actividad. Estos impactos o efectos negativos, pueden clasificarse como directos e indirectos, los cuales llegan a tener repercusiones ambientales, sociales, económicas, técnicas, administrativas e incluso legales (Pulido, 2000).

#### ***4.3.1 Efectos directos de la sobreexplotación de acuíferos***

El primer efecto que es observado cuando hay sobreexplotación, es el descenso del nivel piezométrico, la medida en la que se presenta este descenso depende de las características hidráulicas del medio geológico, el volumen extraído y la recuperación del acuífero (Pulido, 2001). Este efecto, en realidad es una consecuencia de la explotación del agua subterránea, ya que genera conos de abatimiento además de los descensos causados por

la disminución del almacenamiento, por lo que comúnmente la percepción del descenso del nivel o el deterioro de la calidad del agua en sitios puntuales comúnmente son tomados como sobreexplotación, sin considerar el análisis de la evolución en régimen transitorio del acuífero que puede llegar a conseguir un nuevo estado de equilibrio (Martínez et al., 2002). Por esta razón, las evidencias del descenso del nivel del agua deben ser representativas de toda el área del acuífero en cuestión, y no sólo hacer una conceptualización a partir de algunos datos puntuales, ya que la superficie piezométrica del acuífero es diferente en zonas donde hay una densa explotación de agua subterránea y en zonas donde posiblemente ni siquiera se extrae agua subterránea. Lo que se trata de demostrar con esto, es que no es lo mismo abatir una zona del acuífero a abatir el acuífero en su totalidad que, de ser así, sería evidente incluso en zonas de baja o nula explotación. Para llegar a la condición de minado de un acuífero, Custodio et al (2017) sugieren que una forma arbitraria de identificar esta condición, es determinando el tiempo de recuperación del acuífero hasta su estado natural después de detener el bombeo, si el tiempo es de al menos dos generaciones humanas, lo equivalente a alrededor de 50 años, se puede considerar que el acuífero está siendo minado, de lo contrario esta simplemente en estado de explotación intensiva. En la práctica, esta evaluación sólo podría ser llevada a cabo mediante las simulaciones de modelos matemáticos, ya que resulta imposible detener toda extracción de agua subterránea de un acuífero durante el periodo necesario de recuperación total.

Aunado al problema del descenso del nivel del agua subterránea, está el aumento de los costos de explotación, que está directamente relacionado a la profundidad a la cual se extrae el agua, ya que la altura de elevación aumenta. En algunos casos, el aumento del costo no sólo es energético, sino que también puede presentarse un costo relacionado al equipo de bombeo, ya que es posible que se necesite un equipo más costoso que permita bombear a la nueva altura de elevación (Pulido, 2001).

El deterioro de la calidad del agua por causa de la sobreexplotación, es un tema muy delicado y de suma importancia, y esta radica en el movimiento del agua, ya que el agua



subterránea por naturaleza tiene velocidades de flujo muy bajas, por lo que cualquier tipo de contaminación se irá dispersando de igual forma a una velocidad baja, pero cuando el acuífero está siendo explotado la velocidad del agua aumenta por dicho efecto, lo cual puede provocar la movilización de aguas no deseadas, las cuales pueden tener una calidad química baja por cuestiones hidrogeológicas o provenientes de un proceso de contaminación antrópica. El caso más conocido de esta afectación, es la intrusión marina en acuíferos costeros, donde por efecto de la explotación, el agua de mar avanza hacia el interior del subsuelo, y además, propicia la mezcla de agua dulce con agua salada de mar, provocando un cambio desfavorable en la calidad del agua (CONAGUA, 2006). No obstante, el control de la explotación de agua subterránea puede llegar a controlar en cierta medida el deterioro de la calidad del agua extraída.

Generalmente, los tres efectos anteriores, que son el descenso del nivel piezométrico, el aumento de los costos de explotación y el deterioro de la calidad del agua, son las principales causas del abandono de pozos, ya que, por cuestiones de cantidad, calidad y costo, se vuelve imposible la extracción del agua subterránea para los usuarios. Otras causas del abandono pozos, pueden ser el secado del pozo, ya sea por las características hidráulicas del mismo o por estar situado en una zona no muy productiva, sin embargo, estas últimas causas, no están relacionadas a la sobreexplotación del acuífero (Pulido, 2001). Por otra parte, los problemas legales por afección a los derechos a terceros, puede llegar a ser considerado un efecto de la sobreexplotación, debido al régimen de explotación que se está llevando a cabo, sin embargo; es probable que se trate de un abatimiento local.

Otro efecto relevante de la explotación intensiva, es la compactación inducida del terreno o subsidencia. La subsidencia puede presentarse como consolidación de sedimentos o subsidencia controlada por estructuras geológicas, en ambos casos este efecto es atribuido a la explotación intensiva del agua subterránea (Figuroa et al., 2018). Se origina debido a la disminución de la presión de poro cuando el nivel piezométrico desciende, este proceso en acuíferos detríticos llevará a la consolidación por la redistribución del material, lo que se

traduce a la pérdida de la capacidad de almacenamiento (Pulido, 2001; Domínguez et al., 2007).

Las tasas de subsidencia pueden ser muy variables de acuerdo a sus condiciones de extracción, recarga y por supuesto, las características del medio geológico incluido su espesor (Figueroa et al., 2018). Por consiguiente, para acuíferos en suelos consolidados, kársticos o en rocas volcánicas, las consecuencias pueden llegar a ser de mayor impacto, ya que la subsidencia que pueden presentar puede ser de mayor escala, debido al colapso de bloques, tal es el caso de las dolinas en ambientes kársticos. Estos efectos pueden tener múltiples repercusiones en aspectos sociales, ambientales y económicos, como se verá más adelante.

Los impactos que la sobreexplotación tiene en el medio ambiente, son variados, pero muestran cierta conexión, uno de los que ha tenido más atención, es la modificación inducida en el régimen de los ríos. La conexión río-acuífero, es muy susceptible a los cambios en el nivel piezométrico, ya que, dependiendo de la elevación de este, el acuífero puede tener aportaciones al río, volviéndolo un río perenne, o viceversa, el río puede tener aportaciones al acuífero. Cuando se presenta la sobreexplotación, el nivel desciende lo suficiente para provocar que el río aporte agua al acuífero a tal punto de convertir los ríos perennes en intermitentes. Este fenómeno, a su paso tendrá repercusiones en el paisaje, la conservación de los ecosistemas y la alteración del ciclo hidrológico. Pulido (2001), menciona que en determinados casos donde el impacto en los ríos es muy severo, es correcto provocar una alimentación inducida estacional, para disminuir el impacto aguas abajo.

Esta modificación del ciclo hidrológico por las conexiones río-acuífero, también se presenta con otros cuerpos de agua, como humedales, lagunas y lagos, o incluso manantiales, ya que el ritmo de explotación está modificando todas las descargas del acuífero, ya sean superficiales o subterráneas. Por lo que al igual que los ríos, estos cuerpos de agua pueden llegar a secarse o verse reducidos drásticamente (Pulido, 2001).

Un impacto ambiental poco observable es la compartimentación de acuíferos. Por lo general, la capa impermeable de los acuíferos tiende a tener una forma irregular, en algunos

casos más marcada que en otros. Por lo que la compartimentación es provocada por el descenso del nivel, ya que al disminuir, algunas zonas del acuífero pueden quedar aisladas por la forma de la capa inferior del acuífero en oquedades o incluso por otras capas impermeables del acuífero (Pulido, 2001). Este fenómeno, incluso puede llegar a afectar la comunicación subterránea de cuencas superficiales (Domínguez et al., 2007). Este efecto negativo en particular, debería ser tomado en cuenta seriamente, ya que esta compartimentación puede provocar un análisis erróneo del comportamiento del acuífero.

#### ***4.3.2 Efectos indirectos de la sobreexplotación de acuíferos***

La sobreexplotación al ser un proceso progresivo, va generando efectos negativos directos, sin embargo, los impactos que genera, por lo general son el inicio de una serie de impactos negativos, por lo que esta actividad, asimismo, presenta efectos indirectos.

El cambio en el ciclo hidrológico, se ve reflejado indirectamente en la alteración de la recarga de acuíferos, ya que al disminuir el nivel piezométrico y con ello modificar las relaciones de agua superficial-subterránea, la zona no saturada está más expuesta a la evaporación. Por lo tanto, al momento de la precipitación, el suelo retendrá un mayor volumen de agua y el volumen de escurrimiento será menor, y ambos volúmenes serán más propensos a evaporarse. Por lo tanto, la recarga al acuífero puede presentar variaciones con el paso del tiempo, agudizando la relación extracción/recarga. Aunado a esto, conforme el nivel piezométrico cae, el tiempo que tarda el agua superficial en alcanzar la zona saturada ira aumentando proporcionalmente. Todo esto, comúnmente genera condiciones de aridez y un incremento en la erosión de suelo.

Conforme las condiciones de evaporación aumentan, el suelo empieza a presentar problemas de salinización principalmente en zonas agrícolas, ya que aunado al incremento de sales en el agua subterránea extraída, la alta tasa de evaporación las acumula en la superficie de los suelos (Pulido, 2001). Esto se vuelve un proceso cíclico, ya que el agua que

se recarga en este tipo de suelos, puede llegar a duplicar la concentración de sales, esta agua será extraída posteriormente y volverá a depositar la sal en el suelo a causa de la evaporación, y el proceso se repite una y otra vez deteriorando el agua y el suelo (Pulido, 2000). La salinidad de los suelos trae consigo la pérdida de vegetación, abandono de tierras agrícolas y el inicio de la desertización progresiva. Este proceso de degradación, incluso puede provocar el transporte de suelo, cuando los lechos de los cuerpos de agua se secan, propiciando el avance del desierto (Pulido, 2000; Moreno-Reséndez et al., 2015).

La inducción de hundimientos y colapsos, como se explicó anteriormente, son provocados por el descenso del nivel piezométrico, lo cual disminuye la resistencia del suelo, ya que el agua ayuda a soportar el peso del mismo (Pulido, 2001). Diversos estudios, muestran que los casos más catastróficos de subsidencia se deben en gran medida a la actividad humana, por lo que las principales causas son el aumento de gradiente, así como fluctuaciones del nivel y recarga inducida (Pulido, 2001).

La subsidencia, acarrea una serie de efectos un tanto destructivos, ya que, al presentarse los hundimientos o colapsos, todas las estructuras de la zona están en una situación vulnerable, ya que pueden verse afectados edificios, canales, carreteras, puentes e instalaciones de servicios (Romero- Navarro et al, 2010; Figueroa et al., 2018; INEGI, 2019). Los daños, pueden ir desde pequeños agrietamiento o fisuras en las estructuras, al colapso total de las mismas, debido a los asentamientos diferenciales en muros de carga y/o separación de elementos estructurales, así como problemas en las redes de abastecimiento de agua y alcantarillado e inundaciones ocasionadas por estas últimas.

Además de los daños físicos, la subsidencia podría favorecer la infiltración de contaminantes a los acuíferos, ya sean de origen antrópico o natural, debido a las grietas, oquedad o reacomodos que genera este evento (Figueroa et al., 2018). Por otra parte, también existe el riesgo al que está expuesta la población a causa de estas consecuencias. Por lo que, teóricamente en la condición más crítica, este efecto puede generar pérdidas económicas, sociales, ambientales e incluso humanas.

En cuanto a las propiedades físicas de los acuíferos, la subsidencia puede ser una de las causantes al disminuir la capacidad de almacenamiento, ya que esto implica la disminución de la porosidad y permeabilidad. Aunado a esto, la consolidación de los acuíferos, podría ser un factor relevante en el incremento de inundaciones. Por otro lado, los potenciales hidráulicos pueden ser modificados por los cambios en la dirección del flujo generados por la explotación (Pulido, 2001). Cuando las propiedades de los acuíferos se ven considerablemente afectadas, se vuelve necesario el análisis de los nuevos parámetros hidráulicos del acuífero para continuar monitoreando su comportamiento.

#### **4.4 SOBREEXPLOTACIÓN EN MÉXICO**

En México, la explotación del agua subterránea comenzó en 1930 aproximadamente, debido a las necesidades para abastecer la demanda de agua de la ciudad de México y el desarrollo agrícola en las zonas áridas del país, ya que las fuentes superficiales de abastecimiento eran insuficientes ante el rápido incremento de la demanda de este recurso (CONAGUA, 2010a).

Dichas actividades permitieron el desarrollo socioeconómico de las ciudades, sin embargo; también provocaron un impacto negativo, ya que para 1975 la extracción excesiva era evidente, generando la sobreexplotación de 32 acuíferos, donde el Valle de México, Mexicali, La Laguna y Hermosillo mostraban las condiciones más críticas (CONAGUA, 2010a; CONAGUA, 2005).

Esta situación, fue empeorando con la creciente explotación de los acuíferos, por lo que en 1985 se tenían 80 acuífero sobreexplotados, en 1998 ya eran 100, en 2012 la cifra llegó a 106, y finalmente tuvo una pequeña disminución, ya que a partir del 2015 el número de acuíferos sobreexplotados se han mantenido en 105 hasta el 2017 (CONAGUA, 1999, 2005, 2010a, 2013a, 2016, 2017, 2018ah).

En la Tabla 1 se muestra la evolución del número de acuíferos sobreexplotados en el país a lo largo de la historia desde 1975. Esta evolución, a pesar de tener pequeñas recuperaciones, de forma general sigue una tendencia de incremento, la razón de que esto suceda, es la falta de interés del gobierno y la sociedad para recuperar los acuíferos sobreexplotados a un estado de equilibrio y promover la explotación del agua subterránea de forma sostenible.

*Tabla 1.* Registro histórico de acuíferos sobreexplotados en México, Fuente: CONAGUA 1999, 2001a, 2002, 2005, 2006, 2008, 2010a, 2010b, 2011, 2012, 2013a, 2014, 2015b, 2016, 2017, 2018ah.

AÑO	ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS	DOCUMENTO
1975	32	Estadísticas del agua en México 2005; CONAGUA, 2010a
1981	36	Estadísticas del agua en México 2005; CONAGUA, 2010a
1985	80	Estadísticas del agua en México 2005; 2008
1998	100	Compendio básico del agua 1999
1999	100	Compendio básico del agua 2001
2000	96	Compendio básico del agua 2002
2001	97	Estadísticas del agua en México 2003
2003	102	Estadísticas del agua en México 2005
2004	104	Estadísticas del agua en México 2005
2005	104	Estadísticas del agua en México 2006
2006	104	Estadísticas del agua en México 2008
2007	101	Estadísticas del agua en México 2008
2008	101	Estadísticas del agua en México 2010
2009	100	Estadísticas del agua en México 2011
2011	101	Estadísticas del agua en México 2012
2012	106	Estadísticas del agua en México 2013
2013	106	Estadísticas del agua en México 2014
2014	106	Estadísticas del agua en México 2015
2015	105	Estadísticas del agua en México 2016
2016	105	Estadísticas del agua en México 2017
2017	105	Estadísticas del agua en México 2018

En la actualidad, se estima que de los 653 acuíferos que se alojan en el territorio nacional, 105 acuíferos están sobreexplotados (Figura 7), 32 con suelos salinos o agua salobre, 18 con intrusión marina y 448 acuíferos tienen disponibilidad (CONAGUA, 2018ah).

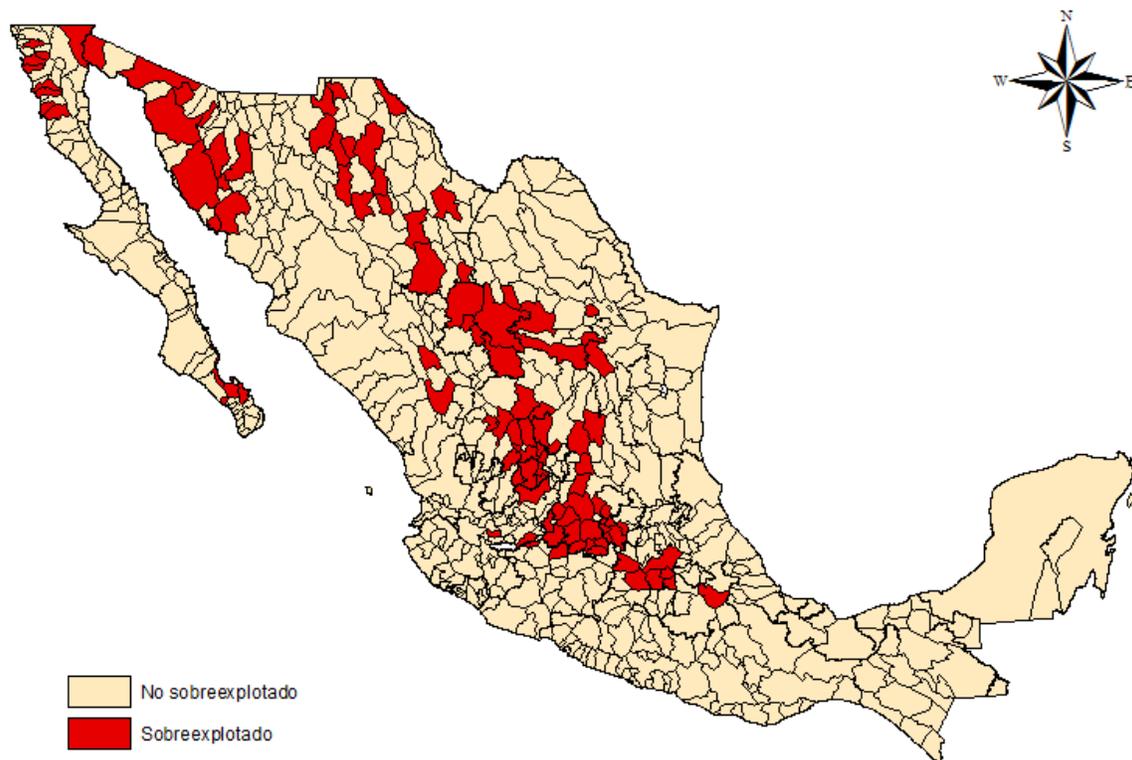


Figura 7. Acuíferos sobreexplotados 2017, Basado en: CONAGUA, Estadísticas del agua en México 2018.

La disponibilidad de agua, en primera instancia está relacionada con la precipitación, ya que a partir de este componente del ciclo hidrológico, se determina la cantidad de agua que escurre superficialmente y la que es infiltrada, por lo tanto también la cantidad de agua que puede ser aprovechada. La precipitación al ser una componente meteorológica, no tiene una distribución espacio-temporal uniforme, lo cual se ve reflejado en las diferentes zonas del país, donde en la porción noroeste y central, se encuentran las zonas más áridas del país,

donde la precipitación en algunas zonas no excede los 300mm de precipitación anual, por otra parte en la porción sureste y suroeste, las precipitación ascienden hasta cerca de 5000mm de precipitación anual (Figura 8).

Las severas condiciones climáticas, en la parte norte y centro de México, es una de las principales causas de sobreexplotación de acuíferos, debido al acceso limitado de los recursos hídricos. La distribución espacial del agua no es equitativa, ya que en la zona central-norte y noroeste recibe el 25% de la precipitación total para abastecer el 50% de la superficie nacional, en la zona central del país y estados costeros como Sinaloa y Tamaulipas, reciben el 27.5% de la precipitación para un 22.5% de superficie y finalmente la zona sur y sureste del país es la que cuenta con más recursos hídricos, al recibir el 49.6% de la precipitación en tan solo 27.5% de superficie (Rolland & Vega, 2010).

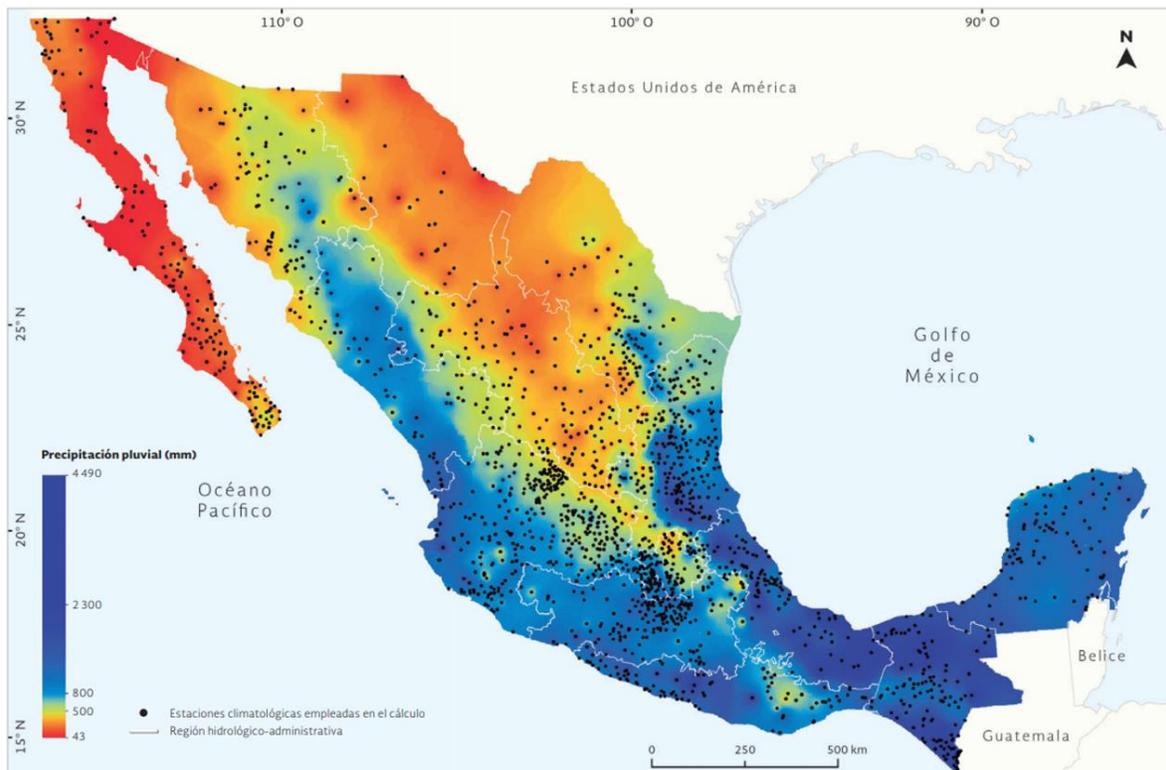


Figura 8. Distribución de la precipitación pluvial normal 1981-2010, Fuente: CONAGUA, Atlas del Agua en México 2018.

Las zonas más afectadas por la sobreexplotación de acuíferos son las zonas áridas del centro y norte del país, esto se debe a la presión que ejerce la poca disponibilidad de agua superficial sobre la extracción de agua subterránea, provocando que su principal fuente de abastecimiento sea el agua subterránea (Figura 8) (CONAGUA, 2018ah).

De acuerdo a lo anterior, se puede ver la relación de la sobreexplotación con los factores climáticos y la disponibilidad que representan, ya que las zonas áridas comúnmente están sujetas a bajas precipitaciones y altas tasas de evaporación. Por ende, las zonas más áridas y con menores precipitaciones, se ven obligadas a cubrir las demandas de abastecimiento de agua potable con fuentes alternativas a las superficiales, incentivando principalmente el uso del agua subterránea. Actualmente, los estados donde el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento son Guanajuato, Querétaro, Coahuila, Durango, Baja California, Yucatán, Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí, Chihuahua, Sonora y la Ciudad de México (CONAGUA, 2018ag).



Figura 9. Fuentes predominantes para usos consuntivos por municipio 2017, Fuente: CONAGUA, Estadísticas del agua 2018.

A nivel nacional, el 39% del abastecimiento de agua proviene de las aguas subterráneas, proporcionando 34,380 Hm<sup>3</sup> por año para usos consuntivos (CONAGUA, 2018ah). Sin embargo, este valor es un valor promedio poco representativo, ya que en algunos estados este recurso es de mayor relevancia, como es el caso de Yucatán donde el agua subterránea representa el 100% del abastecimiento de agua potable, de Quintana Roo con un 99.92%, Baja California Sur con un 91.05%, Campeche con un 80.28%, Zacatecas con 74.71%, Tlaxcala con un 74.12%, la Ciudad de México con un 72.41%, Aguascalientes con un 71.57% y Querétaro con un 66.9%, siendo estos los principales estados que se abastecen con agua del subsuelo (CONAGUA, 2019).

El registro público de derechos de agua (REPDA) muestra que el 32.7% del total del agua subterránea utilizada a nivel nacional es extraída por los estados de Chihuahua, Sonora, Guanajuato y Jalisco. Otro 25.1% es extraído por Yucatán, Querétaro, Coahuila, Durango, Baja California, Aguascalientes, Zacatecas Y San Luis Potosí. Por otra parte, la Ciudad de México, el Estado de México y Puebla extraen un 9.6%. De acuerdo a lo anterior, se determina que estas entidades son las más importantes en cuanto extracción de agua subterránea, obteniendo el 67.4% del volumen total de agua subterránea utilizada a nivel nacional (CONAGUA, 2019). Se estima que los acuíferos que actualmente se encuentran en estado de sobreexplotación, suministran alrededor del 80% del volumen total de agua subterránea que es extraída en el país (CONAGUA, 2010a).

El aumento de la demanda de agua por los diferentes sectores, está muy relacionado al incremento de la población, ya que al incrementar los usuarios del agua indudablemente la demanda tendrá un ascenso para cubrir las necesidades de los nuevos usuarios. En México, desde mediados del siglo XX, se registró el incremento gradual de la población (Figura 10).

En 1950, la población en el país era de 25.79 millones de habitantes, en 1960 de 34.92, en 1970 de 48.23, en 1980 de 66.85, en 1990 de 81.25, en el 2000 de 97.48, en 2010 de 112.34, hasta alcanzar una cifra de 124.9 millones de habitantes en 2018 (INEGI, 1910, 1921, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2018). De

acuerdo a estos datos, la población actual es cuatro veces mayor que la registrada hace 68 años, pasando de 25.79 a 124.9 millones de habitantes, con un incremento de cerca de 100 millones de habitantes.

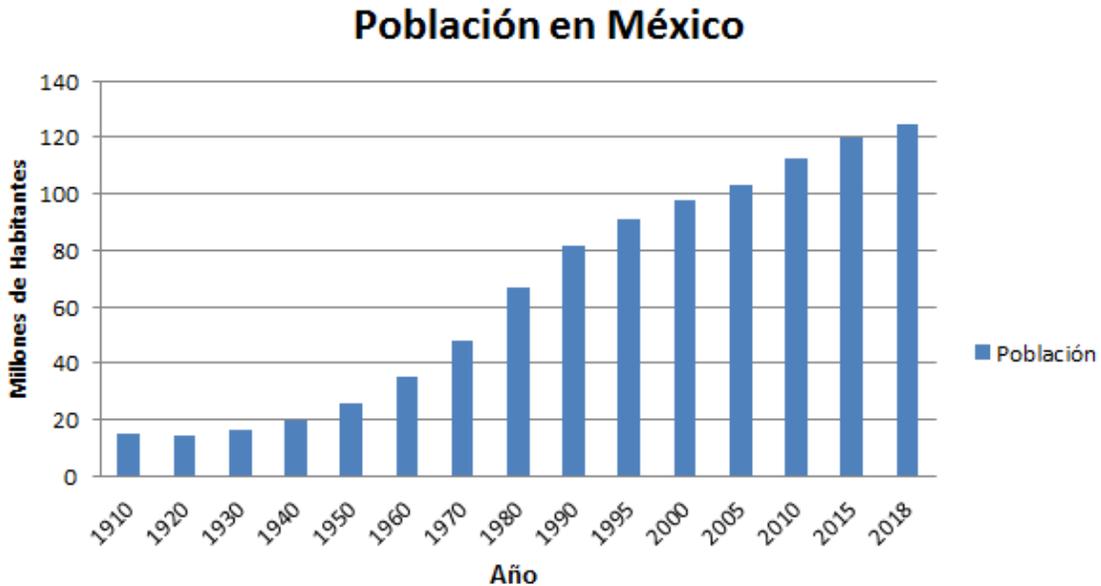


Figura 10. Gráfica de la población en México de 1910-2018. Elaboración propia con datos obtenidos de la serie histórica censal e intercensal del INEGI 1910, 1921, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2018.

Sosa (2012) ha identificado las zonas norte, noreste y centro del país, como las zonas con mayor crecimiento demográfico, ya que en sus principales ciudades se concentra cerca del 77% de la población total del país, además de ser las zonas de mayor producción contribuyendo con el 87% del PIB nacional, no obstante, también son las zonas con los problemas más graves de estrés hídrico. Se espera que en los próximos años, el crecimiento de la población siga incrementando y se concentre principalmente en las zonas urbanas, por lo que cubrir las demandas de agua de las ciudades será uno de los grandes retos del futuro.

De acuerdo al incremento demográfico, la demanda alimenticia tiende a incrementar en la misma medida, por lo que la agricultura genera cada vez más presión sobre los recursos hídricos. El CEDRSSA (2015) evaluó que las trece regiones hidrológico-administrativas del país, consumían alrededor del 97% del volumen total utilizado para abastecer las actividades

primarias en riego de cultivos, además; identificó el grado de presión que las actividades primarias provocan sobre el recurso hídrico, por lo que en la Tabla No.2 se el grado de presión y la clasificación que le corresponde a cada región hidrológico-administrativa. Se puede observar como la región Aguas del Valle de México tiene un grado de presión muy alto del 136.1%, y detrás están la región de la Península de Baja California, Noroeste, Pacífico Norte, Balsas, Río Bravo, Cuencas Centrales del Norte y Lerma-Santiago-Pacífico con un grado de presión Alto de 58.67% en promedio.

Tabla 2. Volumen concesionado para actividades primarias (Mm<sup>3</sup>/año) y el grado de presión generado sobre el recurso hídrico (2012), Fuente: La agricultura y la gestión sostenible del agua en México, 2015

No.	Región	Volumen concesionado			Agua concesionada para actividades primarias (%)	Agua renovable	Grado de presión total (%)	Clasificación del grado de presión
		Total	Actividades primarias	Otros				
I	Península de Baja California	3895.2	3156.8	738.4	81.0	4999	77.92	Alto
II	Noroeste	6988.5	6284.4	704.1	89.9	8325	83.95	Alto
III	Pacífico Norte	10460.2	9762.1	698.1	93.3	25939	40.33	Alto
IV	Balsas	10652.2	6034.8	4617.4	56.7	22899	46.52	Alto
V	Pacífico Sur	1508.3	1078.0	430.3	71.5	32351	4.66	Sin estrés
VI	Río Bravo	9396.5	7875.9	1520.6	83.8	12757	73.66	Alto
VII	Cuencas Centrales del Norte	3734	3247.7	486.3	87.0	8065	46.30	Alto
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	15047	12330.1	2716.9	81.9	35754	42.08	Alto
IX	Golfo Norte	5630	4092.2	1537.8	72.7	28115	20.02	Bajo
X	Golfo Centro	5075.7	3254.0	1821.7	64.1	95124	5.34	Sin estrés
XI	Frontera Sur	2273.2	1704.0	569.2	75.0	163845	1.39	Sin estrés
XII	Península de Yucatán	3353.3	2192.5	1160.8	65.4	29856	11.23	Bajo
XIII	Aguas del Valle de México	4719.7	2337.3	2382.4	49.5	3468	136.09	Muy alto
Total o promedio nacional		82733.8	63349.8	19384	74.8	471497	17.5	Bajo

El grado de presión promedio que estas actividades generan en todo el país es de 17.5%, al que le corresponde una clasificación de grado de presión bajo, sin embargo; de acuerdo a la diversidad de condiciones climáticas, demográficas, económicas y sociales, que existen entre las regiones hidrológicas-administrativas, es poco recomendable asumir como representativo el valor ponderado de todas las regiones, ya que la realidad es que el 60% de ellas tienen un alto grado de presión sobre el recurso hídrico, el cual en cierta medida proviene del subsuelo.

En el periodo que corresponde del año 2008 al 2017, el volumen de agua concesionado de agua subterránea para uso agrícola ha tenido una tasa de crecimiento media anual de 2.02%, al volumen de agua superficial concesionado para esta misma actividad le corresponde una tasa de crecimiento media anual 0.47%, de acuerdo a los datos publicados por CONAGUA (2018ah) que se muestran en la Figura 11. A pesar de que sea mayor la cantidad de agua superficial para cubrir la demanda del sector agrícola, el agua subterránea tiene un grado de presión mayor.

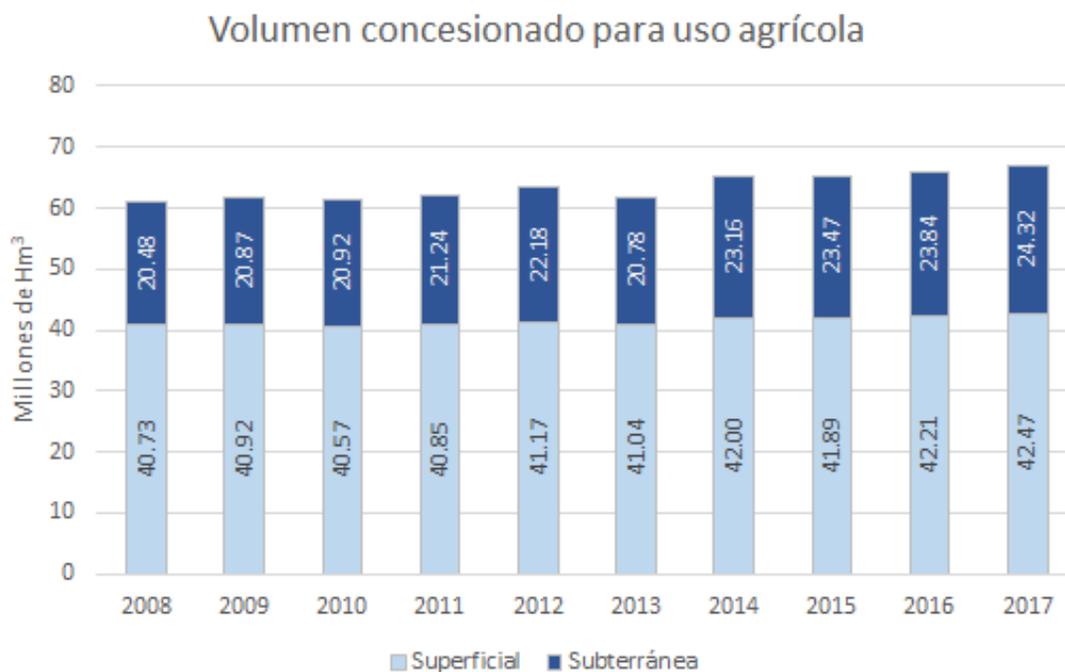


Figura 11. Gráfica de la evolución del volumen concesionado de uso agrícola por tipo de fuente (2008-2017) (Miles de Hm<sup>3</sup>), Fuente: Estadísticas del agua en México, 2018.



En 2017, el INEGI cuantificó un total de 32, 406,237.11 hectáreas de superficie agrícola, de las cuales 25,595,474.62 hectáreas corresponden a agricultura de temporal y 6,810,762.49 hectáreas a agricultura de riego, las cuales son regadas por 63.6% de agua superficial y 36.4% de agua subterránea (CONAGUA, 2018ah).

El gran impacto que tiene este recurso en el país, radica en que es la fuente de abastecimiento para el riego de 2,369,079 de hectáreas (un tercio de la superficie total de riego), además; abastece cerca de 58% del volumen de agua que requieren las ciudades para abastecimiento público, en donde se concentran 124.9 millones de habitantes, y abastece el 53% de la demanda para instalaciones industriales (CONAGUA, 2018ai; INEGI, 2018). Sin embargo, todo beneficio tiene un costo, por lo que el uso intensivo del agua subterránea, se ha visto reflejado principalmente en el descenso de los niveles piezométricos, casos de subsidencia, salinización de suelos, deterioro de la calidad del agua y el aumento de los costos de explotación.

A pesar de que ciertos efectos negativos han sido identificados en los acuíferos mexicanos, no se ha llevado a cabo el monitoreo y seguimiento necesario para identificar y dimensionar correctamente las consecuencias ambientales negativas. La información de monitoreo de dichos efectos comúnmente es escasa o incluso nula, ya que sólo algunos casos específicos han tenido seguimiento, no obstante; en la Figura 12 se muestran los sitios reportados en la literatura que presentan alteraciones ambientales causados por el uso intensivo del agua subterránea.

En la Figura 12 se muestra como gran parte del país presenta altas concentraciones de fluoruro en el agua que sobrepasan la normativa de agua potable (1.5mg/L) de acuerdo a la Modificación de la NOM-127-SSA1-1994, también muestra los sitios que presentan concentraciones de arsénico, hierro, manganeso, plomo y nitratos fuera de la normativa ya que los límites son de 0.025mg/L, 0.30mg/L, 0.15mg/L, 0.01mg/L y 10mg/L, respectivamente (CCNNRFS, 2000). Pulido (2000) hace referencia al alto contenido salino de arsénico, flúor y boro en México, debido a la movilización de aguas fósiles por efecto de

la explotación intensiva. Por otra parte, son evidentes los casos de salinización de suelos en la porción noreste del país, así como la intrusión marina en las costas de Sinaloa, Sonora y Baja California.

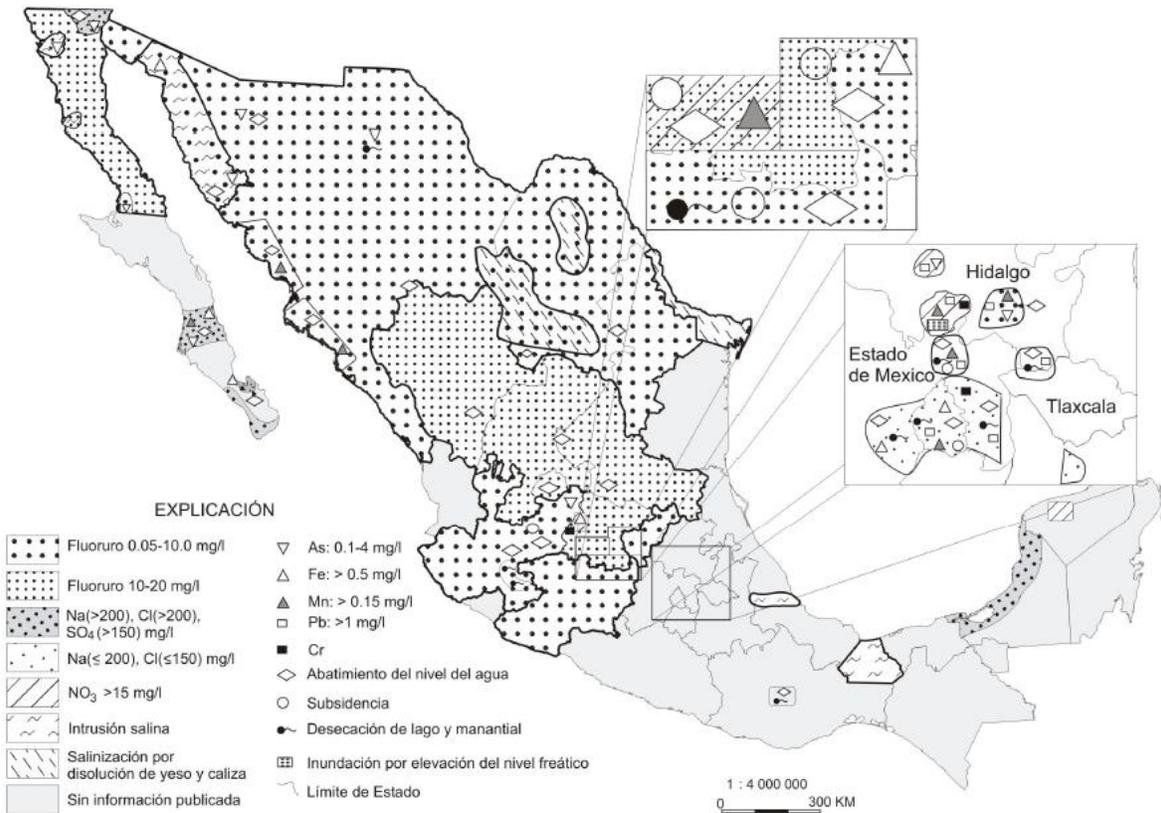


Figura 12. Mapa de impactos ambientales relacionados al uso intensivo del agua subterránea, Fuente: Domínguez, J. & Carrillo-Rivera, J.J en “El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México”, 2007.

Además, se muestran los sitios que presentan subsidencia principalmente en el centro del país (Figura 12). Figueroa et al. (2018) identifica las provincias fisiográficas de la Mesa Central y el Cinturón Volcánico Transmexicano como las zonas principales donde se desarrolla la subsidencia debido a la explotación intensiva del agua subterránea, ya que el 76% de los casos de subsidencia en México están relacionados con la sobreexplotación de acuíferos (en zonas con alta densidad de pozos), y una vez más, estas zonas coinciden con las zonas áridas y semiáridas del país.



Las ciudades con casos de subsidencia notables que han sido reportados en la literatura son Villa de Arista (18.4 cm/año), Mexicali (18 cm/año), Zamora (12.8 cm/año), Aguascalientes (12 cm/año), Jocotepec (10.7 cm/año), Celaya (8.5 cm/año), Morelia (8 cm/año), Irapuato (7.2 cm/año), Querétaro (7 cm/año), Tepic (6.8 cm/año), Salamanca (6 cm/año), Loreto (Zacatecas)(6 cm/año), Puebla (4.4 cm/año), Guadalajara (3.3 cm/año), Ciudad Guzmán (2.5 cm/año), Toluca (8.3 cm/año), y San Luis Potosí (2 cm/año) (Figueroa et al., 2018 ; Sarychikhina & Glowaka, 2015; Davila-Hernandez, 2014).

Los problemas que ha estado generando la sobreexplotación de los acuíferos, se ha presentado de forma lenta en los últimos años. El poco o nulo monitoreo de los acuíferos, ha influido en que se considere a los efectos negativos de la sobreexplotación como un riesgo silencioso, pero contundente.

El limitado conocimiento que se tiene del agua subterránea, ha provocado la toma de decisiones inadecuadas y con ello, el deficiente manejo de este recurso. Por lo que es necesario llevar a cabo un monitoreo adecuado de los parámetros físicos y químicos, para implementar acciones que protejan las reservas acuíferas ante las respuestas hidrológicas de la explotación intensiva.

#### ***4.4.1 Sobreexplotación en el Estado de Chihuahua***

El estado de Chihuahua se encuentra en el norte del país, colinda con Estados Unidos de América, Coahuila, Durango, Sonora y Sinaloa. Cuenta con una superficie de 247,487 Km<sup>2</sup>, la cual está dividida en 67 municipios.

De igual forma, está dividido en 61 acuíferos, los cuales están alojados en dos provincias hidrogeológicas, la provincia Cuencas Aluviales del Norte que abarca la zona noreste del estado y la provincia Sierra Madre Occidental que abarca la zona suroeste. Los acuíferos pertenecientes a la provincia Cuencas Aluviales del Norte, tienen una estructura de

graben por lo que están constituidos por grandes depósitos aluviales de 300-2000m de espesor rodeados de las zonas montañosas conformados principalmente por calizas. Los acuíferos alojados en la provincia de la Sierra Madre Occidental, están conformados por grandes y densos bloques de rocas volcánicas, por lo que a pesar de sus grandes fallas, es poca el agua infiltrada, por lo que los volúmenes de agua de captación de la cuenca escurren superficialmente y recargan las provincias adyacentes (Velázquez & Ordaz, 1989). De acuerdo a las condiciones hidrogeológicas, los acuíferos más propensos a ser sobreexplotados son los acuíferos de las Cuencas Aluviales del Norte.

De los 105 acuíferos sobreexplotados en México en 2017, el 14.3% se encuentran alojados en el Estado de Chihuahua, que representan el 2.3% del total de acuíferos en el país. El Estado consta con 61 acuíferos, de los cuales 15 están en condiciones de sobreexplotación, siendo estos Ascensión, Baja Babícora, Buenaventura, Cuauhtémoc, Casas Grandes, El Sauz-Encinillas, Palomas-Guadalupe Victoria, Laguna La Vieja, Flores Magón-Villa Ahumada, Chihuahua-Sacramento, Meoqui-Delicias, Jiménez-Camargo, Valle de Juárez, Los Juncos y Llano de Gigantes (CONAGUA, 2018ag).

Sin embargo, de acuerdo a los estudios de actualización de disponibilidad de agua realizados por la Comisión Nacional del Agua en 2018, existen 30 acuíferos sin disponibilidad de agua subterránea en el estado, de los cuales 28 presentan condiciones de sobreexplotación (Figura 13). De acuerdo a lo anterior, el acuífero de Janos, Laguna de Mexicanos, Samalayuca, Laguna Tres Castillos, Laguna de Tarabillas, Laguna de Patos, Laguna Santa María, Conejos-Médanos, Laguna de Hormigas, El Cuarenta, Los Moscos, Parral Valle del Verano, Villalba y Llano de Gigantes se suman a los acuíferos sobreexplotados en Chihuahua actualmente. Por otra parte los acuíferos Santa Clara y Alto Rio San Pedro, no tienen disponibilidad pero no se encuentran sobreexplotados. Además, los acuíferos San Felipe de Jesús y Laguna de Palomas tuvieron una recuperación apreciable, por lo que actualmente tienen disponibilidad y no están sobreexplotados

(CONAGUA, 2018ac, 2018ae). Por otra parte, hay 31 acuíferos que tienen disponibilidad y están en condición de subexplotados.

En la Figura 13 se observa como en la zona central del estado con dirección noroeste-sureste se encuentran los acuíferos sobreexplotados actualmente, que representan casi el 50% de los acuíferos de Chihuahua. En la porción este y suroeste, se encuentran los acuíferos que tienen condición de subexplotados actualmente.

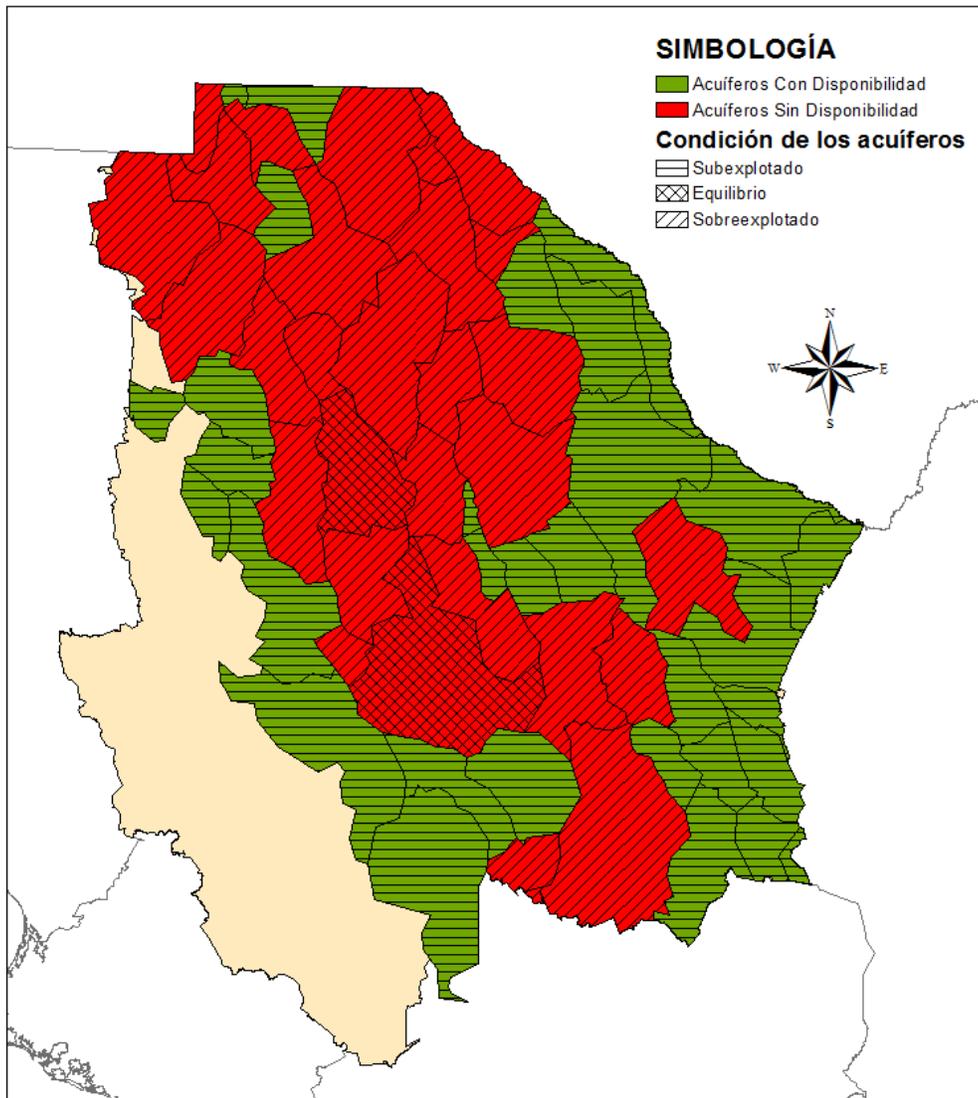


Figura 13. Condición y disponibilidad de los acuíferos del estado de Chihuahua. Basado en los datos de los estudios de disponibilidad de los acuíferos del estado de Chihuahua de CONAGUA en 2018.

De acuerdo a la normativa mexicana, se considera que existe una sobreexplotación del manto acuífero de acuerdo a la relación extracción/recarga, por lo que toda relación mayor a uno tendrá la condición de sobreexplotado debido a que esto representan un valor de extracciones mayor al volumen de recarga. Las condiciones de sobreexplotación más críticas se presentan en los acuíferos de Laguna de Tarabillas, Laguna de Patos, Laguna Santa María, Laguna La Vieja, Conejos Médanos, Laguna de Hormigas, Los Juncos, Llano de Gigantes y Cuauhtémoc. El resto de acuíferos presenta valores menores a dos en la relación extracción/recarga. En la Tabla No.3 se muestran los valores de disponibilidad y relación de extracción/recarga de los 30 acuíferos que actualmente presentan condiciones que limitan su extracción.

Tabla 3. Relación extracción/recarga de los acuíferos sin disponibilidad del Estado de Chihuahua, Elaboración propia con datos obtenidos de: CONAGUA (2015a, 2018a-2018ab, 2018ad, 2018af).

ACUÍFERO	DISPONIBILIDAD (Hm <sup>3</sup> /Año)	EXTRACCIÓN (Hm <sup>3</sup> /Año)	RECARGA (Hm <sup>3</sup> /Año)	RELACIÓN EXT/REC
Ascension	-107.2839	239.4839	132.2	1.8115
Baja Babícora	-94.3898	184.9898	90.6	2.0418
Buenaventura	-116.6847	183.1847	66.5	2.7547
Cuauhtémoc	-197.0395	311.2833	115.2	2.7021
Casas Grandes	-20.1022	200.1023	180.0	1.1117
El Sauz-Encinillas	-54.6532	117.0532	62.4	1.8759
Janos	-44.4252	170.6252	141.9	1.2024
Laguna de Mexicanos	-6.9071	42.0071	35.1	1.1968
Samalayuca	-8.4130	24.4130	16.0	1.5258
Palomas-Guadalupe Victoria	-2.9621	16.2621	15.6	1.0424
Laguna Tres Castillos	-28.4279	47.2279	18.8	2.5121
Laguna de Tarabillas	-209.0165	245.4165	36.4	6.7422
Laguna de Patos	-26.1496	37.1496	11.0	3.3772
Laguna Santa Maria	-266.0834	308.0834	45.2	6.8160
Laguna La Vieja	-166.2918	227.7918	61.5	3.7039
Flores Magon- Villa Ahumada	-116.3197	253.8197	137.5	1.8460



Santa Clara	-12.8320	36.432	59.4	0.6133
Conejos-Medanos	-82.0177	100.8177	18.8	5.3626
Laguna de Hormigas	-205.3862	230.8863	25.5	9.0544
El Cuarenta	-2.9865	6.5865	3.6	1.8296
Los Moscos	-0.7607	38.4607	37.7	1.0202
Chihuahua-Sacramento	-57.6648	114.2648	56.6	2.0188
Meoqui-Delicias	-170.6394	381.8394	211.2	1.8080
Jimenez-Camargo	-161.5013	329.3013	173.3	1.9002
Valle de Juarez	-86.2386	212.1386	125.9	1.685
Parral-Valle del Verano	-12.0714	38.7714	26.7	1.4521
Alto Rio San Pedro	-0.1344	27.3344	56.3	0.4855
Villalba	-9.5789	22.6789	17.5	1.2959
Los Juncos	-470.7069	604.2069	133.6	4.5225
Llano de Gigantes	-36.5859	55.3859	18.8	2.9461

Por sus condiciones naturales, el Estado presenta limitaciones en la disponibilidad del agua, ya que es uno de los principales estados del país que se ven afectados por las contantes sequías, esto se debe a que el 72.65% de la superficie del estado es árido o semi-árido debido a su clima que va desde muy seco a semi-seco (INEGI, 2003; JCAS, 2011; CONAGUA, 2018ah).

Por consiguiente, la precipitación media anual es de 420 milímetros por año, lo que dificulta el abastecimiento de agua para los diferentes usos, ya que en Chihuahua se generan cerca de 11,000 Hm<sup>3</sup> de escurrimiento superficial medio anual, de los cuales el 56.8% se exporta hacia los estados de Sonora y Sinaloa, y un 7.7% es exportado a la cuenca del Río Bravo (JCAS, 2011). Por lo tanto, el 35.5% restante corresponde al volumen de agua superficial que es aprovechada dentro de la entidad, lo que ha generado un aumento representativo en la extracción de agua subterránea para el abastecimiento general de agua potable. En cuanto al volumen total de agua que se aprovecha en el estado de Chihuahua, 40.3% proviene de escurrimientos superficiales, mientras que el 59.7% restante proviene de fuentes de agua subterránea (JMAS, 2011).



De acuerdo a los últimos datos actualizados del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), el estado de Chihuahua tiene registrados 21651 títulos de concesiones de agua subterránea que permiten la extracción de 3,028.04 Mm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 13556 corresponden a títulos para uso agrícola que suman un total de 2,446.04 Mm<sup>3</sup>/Año concesionados, lo que equivale al 80.78% del volumen total concesionado de agua subterránea, además; existen 5056 de títulos destinados al uso doméstico y público urbano con un volumen total concesionado de 457.55 Mm<sup>3</sup>/Año que corresponde al 15.11% del total, 106 títulos para uso industrial con un volumen concesionado de 68.63Mm<sup>3</sup>/Año que representa el 2.27% del total y 2933 títulos destinados a diversos usos que incluyen el uso pecuario, acuicultura y servicios con un volumen concesionado de 55.82Mm<sup>3</sup>/Año que constituye 1.84% del volumen total concesionado (REPDA, 2020a).

Los diez municipios más vulnerables a la sobreexplotación son los municipios de Ascensión, Cuauhtémoc, Chihuahua, Jiménez, Janos, Ahumada, Camargo, Namiquipa, Nuevo Casas Grandes y Delicias, actualmente la mayoría de ellos ya tienen problemas con la explotación intensiva de sus mantos acuíferos (Tabla No.4).

Esto se debe a los volúmenes concesionados de aguas subterráneas que se extraen anualmente en estos municipios, donde nueve de ellos destinan grandes volúmenes para el uso agrícola, debido a la influencia que generan las comunidades menonitas en el desarrollo de la agricultura en dichos municipios, por lo que el 63% del volumen total concesionado para uso agrícola en todo el estado se consume en estos diez municipios con un volumen total de 1,541.38 Mm<sup>3</sup>/Año. Ascensión y Cuauhtémoc, son los municipios que consumen mayores volúmenes de agua para uso agrícola.

Por su parte, el municipio de Chihuahua destaca pero no por el volumen de agua destinado a la agricultura, sino por el volumen de agua subterránea concesionado para uso doméstico y público urbano, ya que este municipio destina poco más del 60% de su volumen total concesionado de agua subterránea para este uso, lo que corresponde a 174.26 Mm<sup>3</sup>/Año para abastecer principalmente la Ciudad de Chihuahua (REPDA, 2020b). No obstante, estos

diez municipios utilizan el 53% del volumen total concesionado en el estado para suministrar el agua de uso doméstico y público urbano, con un volumen total de 243.89 Mm<sup>3</sup>/Año.

Es evidente la importancia de del recurso hídrico subterráneo en los municipios mencionados anteriormente, ya que además de ser su fuente principal de abastecimiento, tienen un consumo elevado de este recurso, ya que en estos diez municipios se utiliza el 61.7% del volumen total de agua subterránea disponible en el estado, donde los municipios de Ascensión, Cuauhtémoc y Chihuahua son los responsable de la mitad de ese volumen (Tabla No.4) (REPDA, 2020a; REPDA 2020b).

Tabla 4. Volúmenes concesionados de los municipios más vulnerables a la sobreexplotación en el Estado de Chihuahua, Elaboración propia con datos obtenidos de: REPDA (2020a, 2020b).

Lugar	Municipio	No. Pozos	Volumen Concesionado Uso Agrícola Mm <sup>3</sup> /Año	Volumen Concesionado Uso Doméstico y Público Urbano Mm <sup>3</sup> /Año	Volumen Total Concesionado Mm <sup>3</sup> /Año	% Volumen Total Concesionado en el Estado
1	Ascensión	1,629	336.41	7.07	344.14	11.37
2	Cuauhtémoc	3,695	245.41	3.07	284.60	9.40
3	Chihuahua	1,078	89.10	174.26	283.55	9.36
4	Jiménez	1,045	176.34	8.25	185.57	6.13
5	Janos	1,284	181.36	1.59	184.68	6.10
6	Ahumada	970	151.63	3.46	158.84	5.25
7	Camargo	870	103.65	11.48	116.14	3.84
8	Namiquipa	743	103.88	1.51	107.54	3.55
9	Nuevo Casas Grandes	966	93.44	9.80	104.45	3.45
10	Delicias	701	60.16	23.42	99.19	3.28
TOTAL		12,981	1,541.38	243.89	1,868.71	61.71
Estado de Chihuahua		21,651	2,446.04	457.55	3,028.04	100.00

Debido a las condiciones naturales y legales, el recurso hídrico del estado de Chihuahua está fuertemente limitado para cubrir las crecientes demandas de agua para abastecimiento público-urbano y el sector agrícola, principalmente. Por lo que el incremento

de la población y el desarrollo de las zonas agrícolas son elementos claves en las causas que están generando la sobreexplotación de acuíferos en el estado. Dada esta situación, es importante la evolución que tienen a lo largo del tiempo para poder llevar a cabo la gestión adecuada de este recurso.

En 2015, la población total del estado de Chihuahua ascendió a 3,556,574 habitantes, siendo Juárez (1,391,180 hab.), Chihuahua (878,062 hab.), Cuauhtémoc (168,482 hab.), Delicias (148,045 hab.) y Parral (109,510 hab.) las principales localidades, ya que en ellas se concentra el 75% de la población total del estado (INEGI, 2015).

La tasa promedio de crecimiento a partir de los censos de INEGI desde 1940 hasta el año 2010, es de 27.82% por decenio, esta tasa de crecimiento es muy alta debido a los abruptos incrementos de población a mediados de siglo, por lo que la proyección de la población para 2020 sería de 4,354,276 habitantes. Sin embargo, esta tasa no es muy representativa de los incrementos de la población en los últimos años, por lo que la tasa de crecimiento promedio por cada cinco años, determinada con los datos que corresponden a los censos del periodo de 1990 a 2015 es de 7.87%, de acuerdo a esta tasa la proyección de la población del estado de Chihuahua en 2020 es de 3,836,540 habitantes.

### Población en Chihuahua

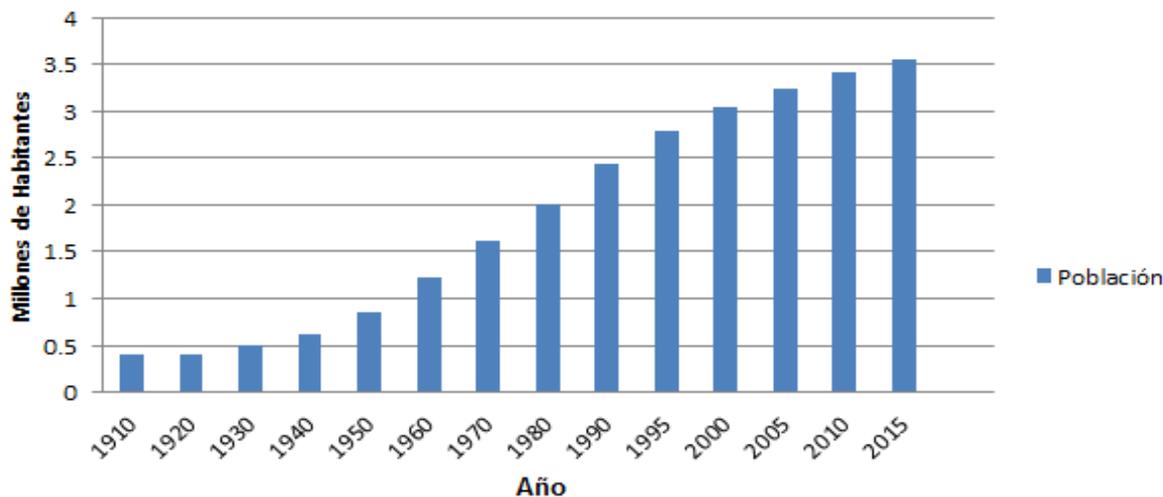




Figura 14. Gráfica de la población en el Estado de Chihuahua de 1910-2015. Elaboración propia con datos obtenidos de la serie histórica censal e intercensal del INEGI 1910, 1921, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015.

La tendencia del crecimiento demográfico de Chihuahua es similar a la tendencia del país, debido a que presentan un incremento gradual a partir de mediados del siglo pasado hasta la actualidad (Figura 14), por lo que el aumento de la población puede llegar a constituir un aumento representativo en la demanda de servicios.

Por otra parte, la agricultura es una actividad económica de importancia en el estado, por lo que en la parte central y suroeste del estado, se encuentran algunas regiones agrícolas de importancia, en comunidades como Cuauhtémoc, Delicias, Camargo y Jiménez. Actualmente los municipios con mayor cantidad de superficie sembrada son Cuauhtémoc (114,879 has.), Namiquipa (103,560 has.), Ahumada (72,091 has.), Guerrero (67,120 has.) y Buenaventura (66,493 has.) (SIAP,2019). Adicionalmente, Cuauhtémoc es el municipio líder por valor de producción, ya que cuenta con una superficie sembrada de 114,879 has., una superficie cosechada de 112,673 has. y un valor de producción de 4,102 MDP (SIAP,2019).

En la entidad, la agricultura ocupa un total de 1.04 Millones de hectáreas, de las cuales el 57.4% corresponde a hectáreas de riego y el 42.6% restante a hectáreas de temporal (SADER, 2018). La agricultura en el estado, tiene una concesión de 4724 Hm<sup>3</sup>/año, tal volumen es abastecido con 2033 Hm<sup>3</sup>/año provenientes de agua superficial y 2691 Hm<sup>3</sup>/año de agua subterránea (CONAGUA, 2018ah).

En el estado de Chihuahua, se producen 16.37 millones de toneladas de productos agrícolas con un valor de 47,187MDP, lo que corresponde al 6.2% del volumen generado a nivel nacional, lo cual posiciona a Chihuahua en el 4° lugar en el ranking nacional de producción agrícola (SIAP,2019).

Dado el impacto económico que tiene, la agricultura tiende a incrementarse gradualmente para atender a un mercado en constante crecimiento, por lo que desde 2009 la producción ha incrementado su valor tres veces en 2018 (Figura 15). Este aumento en el valor de producción se debe al constante incremento de la superficie cultivada, además de la

siembra de cultivos de alto rendimiento tales como la nuez, algodón, trigo, avena y maíz. Por todo lo anterior, la agricultura tiene fuertes intereses sociales y económicos, incluso políticos, lo cual tiende a generar un alto consumo de agua que cada vez va aumentando hasta el punto de no ser sostenible.

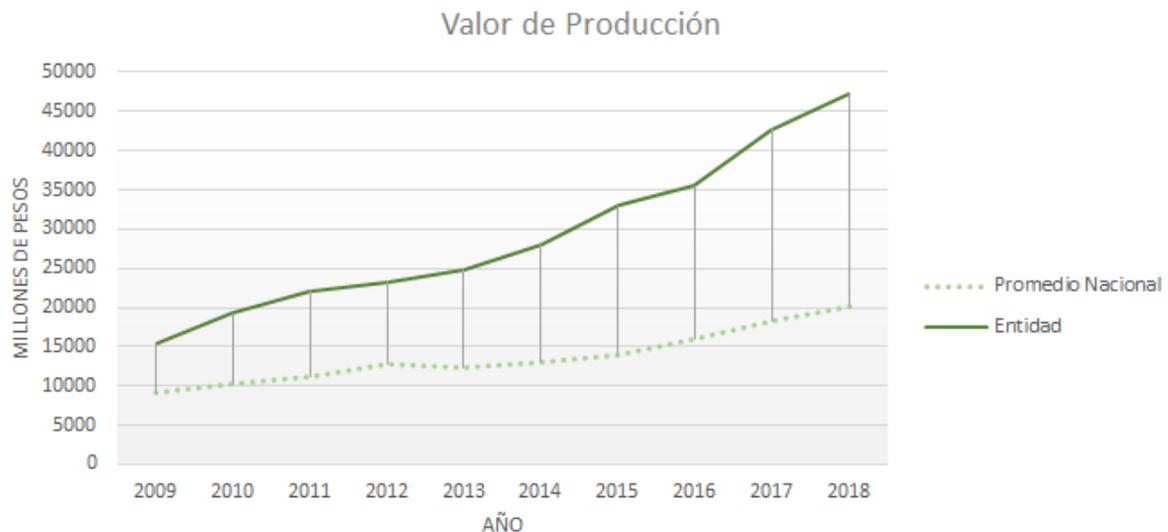


Figura 15. Evolución de la producción agrícola en el Estado de Chihuahua 2009-2018. Fuente: Infografía Agroalimentaria Chihuahua, 2019.

En conjunto, todas estas condiciones generan un grado de presión sobre el recurso hídrico del 45.1% en 2017, lo que es clasificado como un grado de presión alto, no obstante debido a las tendencias futuras, se espera que el grado de presión aumente a un 46.9% para el año 2030 (CONAGUA, 2018ah). En consecuencia, los efectos del uso intensivo del agua subterránea serán cada vez más evidentes.

En el Estado de Chihuahua, se tienen pocos registros de los efectos que ha tenido el incremento de acuíferos sobreexplotados, debido al escaso monitoreo de las aguas subterráneas en el estado. Los datos que se pueden encontrar al respecto, son registros históricos del nivel piezométrico donde se puede observar el descenso del mismo. Sin embargo, esto empieza a representar incrementos en el consumo de energía de los pozos,

disminución de la calidad del agua, alteración de la conexión de cuerpos de agua con el acuífero, hundimientos del terreno y pérdida de vegetación.

Los acuíferos que presentan una actividad agrícola intensiva, tienden a presentar grandes déficits en la disponibilidad del agua subterránea aunque en algunos casos el valor de la relación extracción/recarga no sea muy grande, esto se debe a que las zonas agrícolas extraen grandes cantidades de agua para el riego y un porcentaje de ese volumen es cuantificado como recarga difusa al acuífero por retornos de riego. Sin embargo, a pesar de que aumenta el volumen de recarga, la rápida extracción de grandes volúmenes de agua subterránea, tiende a provocar una rápida caída del nivel piezométrico, disminución de la calidad del agua y compactaciones del terreno acompañados de hundimiento y alteraciones de las propiedades hidráulicas del acuífero. Los acuíferos de Cuauhtémoc y Meoqui-Delicias son un claro ejemplo de como la agricultura intensiva ha causado un rápido abatimiento y se han detectado hundimientos del terreno. Además, en estos acuíferos se ha detectado la disminución de la calidad del agua debido a la presencia de nitratos y arsénico (Gutiérrez et al, 2016).

La disminución de la calidad del agua, empieza a reflejarse debido a causas naturales y antropogénicas, donde la explotación intensiva del agua subterránea juega un papel fundamental, ya que esta actividad puede llegar a acelerar la concentración de contaminantes en el agua ya sean naturales o no, debido a la movilización del agua subterránea a mayores velocidades, además de la concentración de sales al disminuir el volumen de agua almacenada en los acuíferos.

En el estado ha sido detectada la presencia de nitratos y flúor en 25 pozos de los acuíferos de Tabalaopa-Aldama y Aldama-San Diego, de los cuales 10 presentaron concentraciones superiores a 1.5 mg/L de flúor y 12 presentaron concentraciones mayores a 10mg/L de nitratos (Gutiérrez et al, 2016; Villalba et al, 2013). En adición, Nájera (2016) detecto el aumento de nitratos y fósforo en estos acuíferos en las estaciones de verano y otoño, los cuales posiblemente proceden de la infiltración de agua con residuos de

fertilizantes, también identificó la presencia de flúor a la que se le atribuye un origen natural debido a la disolución de fluorita y criolita generando concentraciones de 2.12-2.14 mg/L, y la presencia de arsénico con concentraciones de 0.008-0.02mg/L procedente de aluviones con arcillas, rocas riolíticas, residuos de centros urbanos, residuos de la minería o incluso residuos de la agricultura.

Además de la agricultura, las crecientes demandas de agua subterránea para abastecimiento de agua potable están provocando intensos regímenes de explotación en los acuíferos con grandes centros de población. En el estado el caso más crítico se encuentra en los acuíferos de Chihuahua-Sacramento, Sauz-Encinillas y Tabalaopa-Aldama, ya que son los responsables de proveer agua potable a la ciudad de Chihuahua, por lo que en los últimos años estas fuentes de agua subterránea han sido explotadas intensivamente y en consecuencia el acuífero Sauz-Encinillas y Chihuahua-Sacramento están en condición de sobreexplotación actualmente. Gutiérrez et al (2016) señalan al acuífero El Sauz-Encinillas, como un acuífero que empieza a tener serios impactos debido a su explotación intensiva para proporcionar agua a la ciudad de Chihuahua, ya que la laguna de dicho acuífero se ha convertido en un cuerpo de agua intermitente, lo que al mismo tiempo significa el inicio del proceso de desertización provocado por la movilización de los sedimentos del lecho de la laguna incentivando la pérdida de vegetación, la salinización del suelo y el deterioro de la calidad del aire. Esta situación, puede llegar a presentarse de forma similar en el acuífero de Cuauhtémoc si continua sosteniendo su ritmo de explotación.

Por otra parte, la subsidencia es uno de los efectos de la sobreexplotación que empieza a ser evidente en algunas zonas de la entidad, ya que diez de las principales ciudades del Estado sufren de hundimientos. De acuerdo a los registros de riesgos geológicos por hundimientos las ciudades son Ahumada, Ascensión, Buenaventura, Camargo, Casas Grandes, Cuauhtémoc, Delicias, Gómez Farías, Jiménez y Meoqui, las cuales acumulan un área afectada de 71,385 Km<sup>2</sup> (CENAPRED, 2020).



---

El grado de presión sobre el agua, la limitada información hidrogeológica y las escasas acciones de monitoreo de los acuíferos en el estado de Chihuahua, han estado generando en los últimos años una gestión del agua subterránea basada totalmente en la incertidumbre. El estado actual de sobreexplotación de casi la mitad de los acuíferos en Chihuahua, requiere acciones que permitan el incremento de conocimiento de su comportamiento hidrogeológico y un monitoreo constante, para poder llevar a cabo una gestión integrada de las demandas y tratar de mitigar los efectos de la sobreexplotación, además de buscar soluciones para revertir su condición y restaurar estas reservas acuíferas.



---

## **Capítulo 5: Gestión del agua subterránea**

## 5.1 GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua es un recurso natural indispensable de carácter finito, por lo cual debe ser utilizado de forma eficiente y sostenible mediante la planificación, manejo y distribución óptimos, con el objetivo de proveer el acceso a este líquido vital y al mismo tiempo mantener el equilibrio ambiental. La finalidad de esta conceptualización, es la administración adecuada de los recursos hídricos para beneficio de la sociedad y la preservación del medio ambiente, además del valor económico que representa.

Por todo lo anterior, la gestión del agua busca ampliar la perspectiva de los beneficios individuales de corto plazo a los intereses del bien común a largo plazo, porque solo con la colaboración y participación de todos los usuarios del agua, es posible alcanzar metas que los beneficien a todos, donde la pieza clave para que todo este proceso se lleve a cabo, es que todas las partes involucradas sigan percibiendo un beneficio individual.

Para lograrlo, la gestión y administración del recurso hídrico debe ir más allá de los fundamentos técnicos, necesita de instituciones competentes, normas adecuadas y medios para aplicarlas, la participación activa de todos los usuarios, conciencia pública, educación y sobre todo, adecuarse a las necesidades locales (Llamas & Custodio, 2002).

La importancia de la componente local en la gestión del agua, radica en las diferentes condiciones y situaciones sociales, políticas y económicas en las que se extrae el agua subterránea, por lo que cada acuífero necesita de un plan de manejo hecho a la medida, de acuerdo a su caracterización hidrogeológica y su perfil socioeconómico, con el objetivo de crear estrategias específicas que permitan el uso eficiente del agua (GWP, 2013). Por otra parte, los planes de manejo deben de ser flexibles y adaptativos, esto quiere decir que pueden ser creados en base a la información disponible en ese momento, sin embargo; pueden y deben modificarse conforme se va generando información de las respuestas a las estrategias

planteadas, mediante las redes de monitoreo de los acuíferos y los efectos sociales percibidos por los usuarios (Llamas & Custodio, 2002; GWP, 2013).

Comúnmente, la gestión del agua subterránea es utilizada como una herramienta de remediación y no como una herramienta preventiva de control, por lo tanto, al momento de la creación de un plan de manejo para la gestión y administración del recurso, es habitual que ya existan diversos tipos de problemas en los acuíferos. De acuerdo a esta situación, el Groundwater Management Advisory Team (2006a), propone una serie de niveles o etapas en el proceso de la explotación de agua subterránea, en los cuales varía la disponibilidad, el volumen de extracción y el conflicto de interés entre usuarios, generando un esquema de identificación para realizar intervenciones de gestión a partir de la situación actual del acuífero (Figura 16).

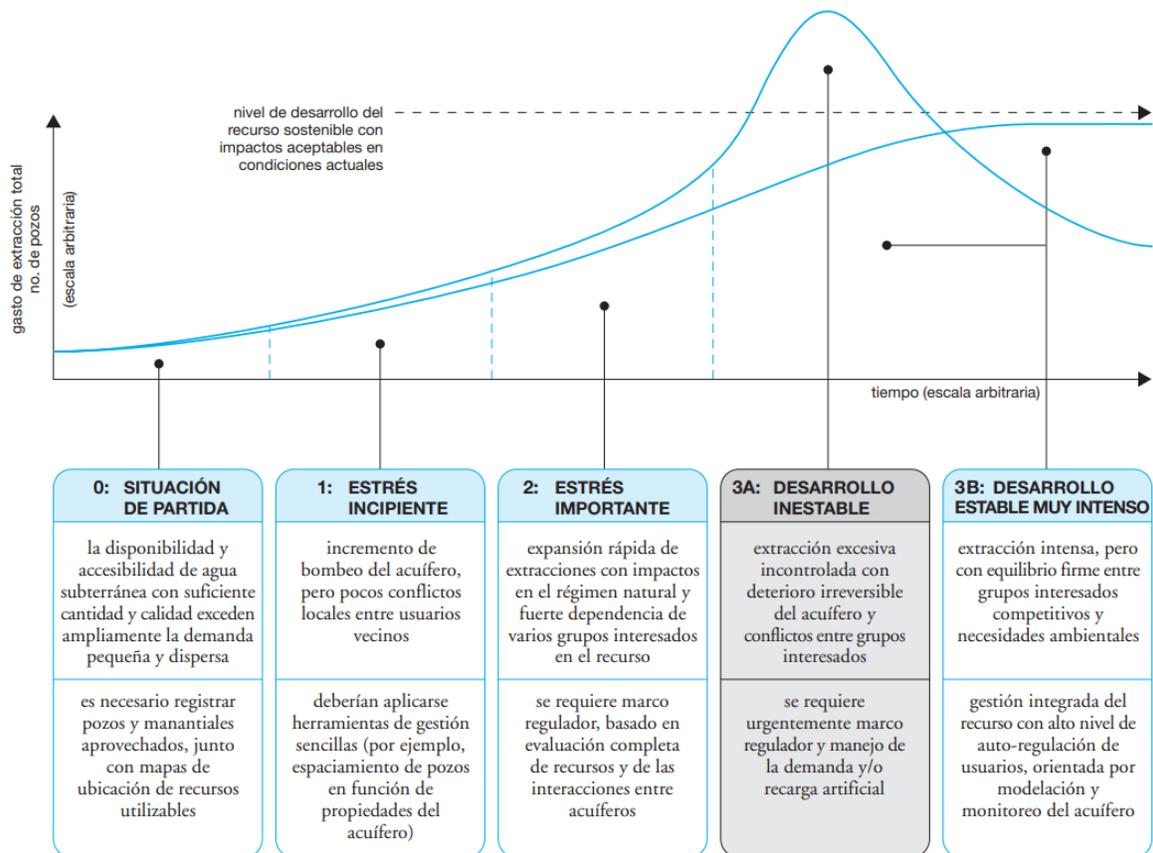


Figura 16. Etapas de desarrollo y necesidades de gestión en un acuífero importante. Fuente: Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica, 2006a.

Aunado a este esquema, propone herramientas de gestión acordes a los diferentes niveles de desarrollo, para aplicar estrategias efectivas a las problemáticas que presentan los acuíferos (Tabla No.5).

Tabla 5. Niveles de herramientas, instrumentos e intervenciones de gestión de agua subterránea necesarios para una etapa específica del desarrollo del recurso. Fuente: Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica, 2006a.

HERRAMIENTA E INSTRUMENTOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA	NIVEL DE DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA O EL INSTRUMENTO CORRESPONDIENTE (de acuerdo a la etapa de estrés hídrico)			
	0	1	2	3
<b>HERRAMIENTAS TÉCNICAS</b>				
Evaluación del Recurso	Conocimiento básico del acuífero	Modelo conceptual basado en información de campo	Modelos numéricos que operan simulando diferentes escenarios hipotéticos de extracción	Modelos ligados con apoyos para toma de decisiones y usados para planificación y gestión
Evaluación de la Calidad del Agua	No se experimentan restricciones de calidad	La variabilidad de la calidad es un asunto relevante en la asignación	Se entienden los procesos de calidad del agua	Se integra la calidad en los planes de asignación
Monitoreo de Acuíferos	No hay programa regular de monitoreo	Monitoreo de proyectos	Rutinas de monitoreo establecidas	Se usan programas de monitoreo para tomar decisiones de gestión
<b>INSTRUMENTOS INSTITUCIONALES</b>				
Derechos de Agua	Derechos de agua consuetudinarios	Aclaración esporádica de derechos de agua a nivel local	Se reconoce que los cambios en la sociedad se imponen a los derechos de agua consuetudinarios	Derechos dinámicos basados en planes de gestión
Disposiciones Regulatorias	Sólo regulación social	Regulación restringida	Regulación y aplicación activa por una agencia que se dedique a ello	Facilitación y control de auto-regulación por parte de grupos interesados
Legislación de Aguas	No existe	Se discute la preparación de ley sobre recursos de agua subterránea	Disposición legal para organizar a usuarios de agua subterránea	Marco legal completo para gestión de acuíferos



Participación de los Grupos Interesados	Poca interacción entre regulador y usuarios del agua	Participación reactiva y desarrollo de organizaciones de usuarios	Organizaciones de grupos interesados son integrados en estructuras de gestión	Grupos de interés y agencia reguladora comparten responsabilidad en la gestión de acuíferos
Conciencia y Educación	El agua subterránea es considerada como un recurso infinito y gratuito	Recurso finito (campañas de conservación y protección del agua)	Bien económico que forma parte de un sistema integral	Interacción y comunicación efectivas entre grupos interesados
Instrumentos Económicos	Casi no se reconocen las externalidades (la explotación es ampliamente subsidiada)	Sólo se aplican cargos simbólicos por extracción de agua	Se reconoce valor económico (reducción y orientación de subsidios)	Se reconoce valor económico (cobro adecuado y posibilidad de reasignación)
<b>ACCIONES DE GESTIÓN</b>				
Prevención de Efectos Colaterales	Poca preocupación sobre efectos colaterales	Se reconocen efectos colaterales (corto y largo plazo)	Medidas preventivas que reconocen valor in-situ	Mecanismo para equilibrar usos extractivos y valor in-situ
Asignación del Recurso	Restricciones limitadas para asignación	Competencia entre usuarios	Se definen prioridades para uso extractivo	Asignación equitativa de usos extractivos y valor in-situ
Control de Contaminación	Poco control sobre uso de suelo y descarga de derechos	Zonificación territorial, pero sin control proactivo	Control sobre contaminación puntual nueva y/o ubicación de pozos nuevos en zonas seguras	Control de todas las fuentes de contaminación puntuales y dispersas

De acuerdo a la Tabla No.5, se puede observar como los acuíferos que están en un nivel de desarrollo cero, tienen un régimen de explotación bajo por lo que requieren las medidas mínimas de gestión tales como censo y registro de pozos, conocimiento básico del acuífero y pocas restricciones para asignación. Para los acuíferos en un nivel de desarrollo uno, donde la extracción aumentó considerablemente en comparación al nivel cero y se empiezan a presentar conflictos entre usuarios, las medidas de gestión constan de la participación de los usuarios, campañas de conservación del agua, monitoreo de proyectos y

el recurso de evalúa mediante modelos conceptuales el acuífero. A partir del nivel dos de desarrollo, la explotación se vuelve intensiva y constantemente se presentan conflictos de intereses, por lo que la gestión se vuelve más compleja y requiere de la participación activa de instituciones y organizaciones para crear estructuras de gestión, redes de monitoreo establecidas, evaluación de la calidad química del agua, controles ambientales de contaminación y efectos negativos, y la evaluación del recurso mediante modelos matemáticos predictivos. Finalmente en el nivel tres, el régimen de explotación llega a un punto crítico y con ayuda del conocimiento que se ha generado a profundidad, es posible encontrar la explotación máxima sostenible, donde la gestión requiere un mercado del agua para tener derechos de agua dinámicos, mecanismo para equilibrar los usos del agua y realizar las remediaciones correspondientes, así como programas de monitoreo para la toma de decisiones, asignaciones limitadas por la calidad del agua y evaluaciones mediante modelos para la planificación y gestión.

De acuerdo a lo anterior, es evidente que la gestión del agua subterránea se vuelve cada vez más compleja de acuerdo al régimen de explotación que tiene un acuífero y las alteraciones antropogénicas que éste provoca. Esto debe a que el simple hecho de extraer este recurso produce alteraciones, por lo que es importante reducir y remediar los efectos negativos de esta actividad, además de buscar la optimización del recurso hídrico.

Por otra parte, la complejidad que toma la gestión del agua subterránea conforme se incrementa la explotación del acuífero, también se ve reflejada en las funciones de las instituciones y la participación de los usuarios, por lo que las instituciones tienen que reconocer hasta qué punto siguen siendo competentes y delegar algunas responsabilidades en otros elementos de la estructura administrativas para seguir trabajando eficientemente, en la Tabla No.6 se muestran la participación de las autoridades, organizaciones y usuarios en la actividades de gestión, así como la responsabilidad de las autoridades nacionales y locales sobre los recursos hídricos.



Tabla 6. Funciones clave para gestión de agua subterránea y roles institucionales. Fuente: Legislación y Disposiciones Reglamentarias Sobre Agua Subterránea desde reglas consuetudinarias hasta la planificación integrada en cuencas, 2006c.

FUNCIONES CLAVE	ACTIVIDADES PRINCIPALES	ROLES INSTITUCIONALES			
		Autoridad Nacional/ Agencia regional o de cuenca	Agencia reguladora local	Organización para la gestión de acuíferos	Asociación de usuarios de agua
Planificación Estratégica	Evaluación de Recursos (cantidad/calidad)	Responsabilidad	Participación	Participación	
	Evaluación de Usos y Levantamiento Socioeconómico		Responsabilidad	Participación	Participación
	Planificación del Desarrollo	Responsabilidad	Participación	Participación	
Regulación de Recursos	Administración de Derechos de Agua Subterránea	Responsabilidad	Responsabilidad	Participación	Participación
	Licencias para Descarga de Aguas Residuales	Responsabilidad	Responsabilidad	Participación	Participación
	Definición de Áreas Protegidas	Responsabilidad	Responsabilidad	Participación	
	Situaciones de Emergencia	Responsabilidad	Participación	Participación	
	Permisos para Perforistas de Pozos	Responsabilidad	Participación		
Monitoreo y Aplicación	Estado de Agua Subterránea (cantidad/calidad)		Responsabilidad	Participación	Participación
	Uso de Agua Subterránea		Responsabilidad	Participación	Participación
	Resolución de Conflictos	Responsabilidad	Responsabilidad	Participación	

La participación de todos los grupos de interés en la gestión del agua subterránea permiten que las actividades de gestión básicas relacionadas al censo de aprovechamientos monitoreo, inspección y recaudación de cuotas, se realicen efectivamente y con costos económicos menores, además de facilitar la integración e implementación de las decisiones de gestión relacionadas a los beneficios sociales, económicos y técnicos (GWMATE,2006d).

La acción colectiva de los grupos de interés puede llegar a hacer contribuciones importantes en la conservación, protección y monitoreo del agua subterránea, por lo que incluso es posible lograr una autorregulación comunitaria del recurso hídrico cuando el acuífero es explotado por un grupo socialmente homogéneo de usuarios (GWP, 2013).

### ***5.1.1 La gestión de acuíferos altamente explotados***

La falta de planificación se ha visto reflejada en la explotación descontrolada y caótica del agua subterránea. Actualmente la poca gestión que se lleva a cabo en los sistemas acuíferos, está enfocada a la gestión de la oferta. Esta gestión, constantemente busca el incremento de la oferta mediante acciones de recarga artificial, retornos de riego e importaciones de agua de otros acuíferos, sin embargo; a pesar de tomar acciones para aumentar el volumen de agua disponible, las demandas de agua también siguen incrementando, provocando un círculo vicioso en el uso del agua subterránea.

Para contrarrestar esta problemática, es necesario empezar a tomar acciones para orientar la gestión del agua, a una gestión enfocada en la demanda, lo que permitirá buscar estrategias encaminadas a la conservación y restauración de las reservas acuíferas.

El sector agrícola, a nivel mundial es el principal usuario del agua, por lo que para empezar a gestionar la demanda es necesaria la implementación de estrategias que permitan el ahorro del agua en esta actividad. Hay diferentes tipos de estrategias que abordan el problema desde diferentes puntos, existen las estrategias de ingeniería enfocadas a la eficiencia de la infraestructura de pozos, líneas de conducción y sistemas de riego presurizado, por otra parte, existen estrategias de gestión enfocadas a la programación del riego, el aprovechamiento de la humedad del suelo y la disminución de evaporación en las zonas agrícolas, y finalmente hay estrategias de agronomía relacionadas a los tipos de cultivos, rotación de cultivos, su rendimiento y sus características ante la sequía (GWMATE, 2006b).



Estas estrategias serán realmente efectivas si se ven reflejadas en el ajuste de los derechos de extracción de los pozos, donde una buena alternativa para no generar conflictos con los usuarios por la disminución de los volúmenes concesionado, es la compra de sus derechos del agua mediante el financiamiento para tecnificar sus sistemas de irrigación.

No obstante, también es necesario contar con estrategias enfocadas al uso conjuntivo del agua superficial y el agua subterránea, para optimizar el uso de todos los recursos hídricos, asimismo es posible implementar acciones que permitan la recarga del acuífero, dependiendo de la calidad química del agua y del medio hidrogeológico.

Por todo lo anterior, los acuíferos en los que se produce una explotación intensivas del agua subterránea pueden encontrar su grado óptimo de desarrollo cuando se imponen limitaciones, se realizan las compensaciones de externalidades y se hace uso de un esquema de desarrollo de recursos hídricos integrados (Llamas & Custodio, 2002).

## **5.2 LA GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO**

En México, la gestión y administración del agua, le corresponde a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) como organismo descentralizado del gobierno federal. La cual tiene por objetivo administrar y preservar los recursos hídricos de la nación, por lo que es responsable de otorgar permisos de extracción, uso del agua y descarga de aguas residuales, además de administrar el servicio meteorológico nacional y el registro público de derechos del agua, y finalmente de la elaboración de normativas que permitan regular el recurso de acuerdo a los objetivos de la Ley de Aguas Nacionales 1992 (Rolland & Vega, 2010).

La CONAGUA trabaja de la mano con otras dependencias del gobierno federal, estatal y municipal, tales como la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA), la Procuraduría

Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y departamentos que forman parte de la misma Comisión Nacional del Agua, tal es el caso de los Organismos de Cuenca, los cuales son responsables de la administración y preservación de las aguas nacionales de acuerdo a las regiones hidrológico-administrativas, y de las Direcciones Locales, que tienen la función de aplicar las políticas, estrategias, programas y acciones de la CONAGUA en cada estado de la república (Figura 17) (CONAGUA,2013b). Además, a través de los Consejos, Comisiones y Comités de Cuenca busca crear enlaces que promuevan la participación y comunicación con los usuarios del agua.

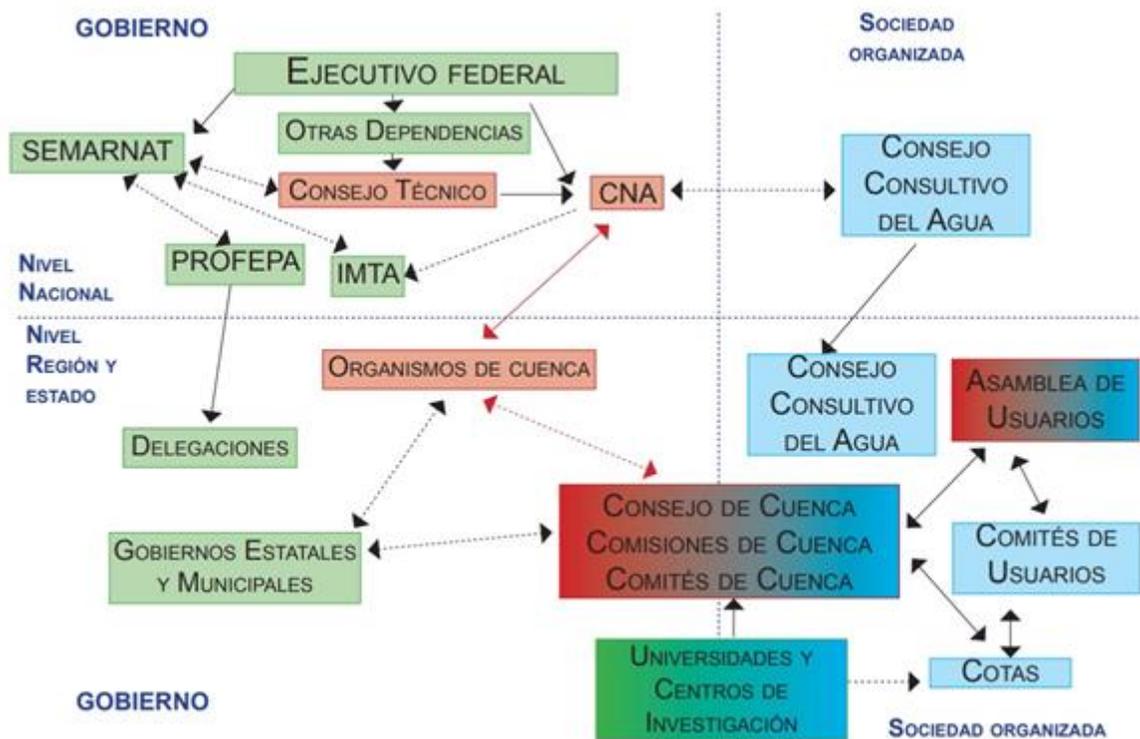


Figura 17. Sistema de gestión del agua. Fuente: Felipe Arreguín, Comisión Nacional del Agua, 2010.

En México, la estructura administrativa para la gestión del agua, ha tenido problemas en cuanto a la participación de los grupos de interés. Esto se debe a la falta de asignación de funciones específicas y responsabilidades de cada grupo, por lo que las partes involucradas no tienen un conocimiento claro de la función que deben desempeñar. En otros casos, la

gestión se ve interrumpida, debido al control centralizado que tiene la autoridad del agua, por lo que las actividades que pueden ser desarrolladas por estos grupos quedan limitadas.

Conforme el agua subterránea se ha vuelto cada vez más indispensable para las zonas áridas y semiáridas del país, provocando la explotación intensiva de este recurso, se ha vuelto evidente la falta de capacidad de la Comisión Nacional del Agua para realizar sus tareas de regulación relacionadas a la medición, inspección, monitoreo, vigilancia y actualización del REPDA (censo de aprovechamientos y volúmenes de extracción), así como tareas administrativas en relación a los planes de manejo, normativa y reglamentos para la extracción de aguas subterráneas (CONAGUA, 2010a).

Esto ha generado diversas problemáticas relacionadas a una posible sobreexplotación de los acuíferos, donde el principal problema técnico es la falta de instrumentación de los pozos para obtener los volúmenes reales extraídos de agua subterránea mediante medidores de flujo, ya que comúnmente se recurre a métodos indirectos a través del consumo de energía, la capacidad de las bombas y tiempo de bombeo, o los índices de consumo por láminas de riego dependiendo del tipo de cultivos. Aplicar estas metodologías genera incertidumbre en cuanto al valor total real de extracción de agua subterránea, el cual será utilizado posteriormente para determinar la disponibilidad de agua, que dadas estas situaciones carece de utilidad para la planificación y control de este recurso. Ya que aunado a la problemática de la escasez de medidores de flujo, está la incapacidad de la Comisión Nacional de Agua de estar constantemente actualizando y supervisando los censos de aprovechamiento, así como sus características y volúmenes de extracción, por lo que el valor de la demanda siempre estará por debajo del valor real de extracción.

Por todo lo anterior, es importante implementar estrategias para el mantenimiento e instrumentación de los pozos, además de llevar a cabo un programa de monitoreo que involucre los niveles piezométrico y los volúmenes de extracción. Para realizar estas tareas básicas de gestión, será necesario que la Comisión Nacional del Agua delegue las tareas que



---

no tiene capacidad de cumplir en los diferentes grupos de interés de acuerdo a las capacidades de los mismos.

No obstante, de acuerdo a los diferentes usuarios y escenarios del agua, se presentan diferentes problemáticas socioeconómicas en relación al recurso hídrico, sin embargo; la mayoría de los casos tienen el factor común de la agricultura, un tema que cada vez se vuelve más difícil debido a la sensibilidad que provocan los diversos intereses que tiene esta actividad.

El sector agrícola como principal usuario del agua, requiere de una buena gestión y administración del recurso hídrico, ya que en él se consume cerca del 80% del volumen total de agua en el país, y también es donde recae el peso de una actividad económica importante y la seguridad alimentaria del país.

Para la mejora de este sector, se han creado estrategias para incentivar y promover el reúso del agua, la reconversión de cultivos y el ajuste de concesiones de acuerdo a la disponibilidad de cada zona, así mismo se han creado estrategias para el mantenimiento adecuado de pozo, eficiencia de las líneas de conducción y distribución, y modernización o tecnificación de los sistemas de riego con la finalidad de obtener una mayor eficiencia en el riego de cultivos.

Estas acciones han sido promovidas por programas como el PADUA (Programa de adecuación de Derechos del Agua) que proporcione apoyos para la reconversión de cultivos, tecnificación de sistemas de riego y venta de derechos de agua, el PUEAEE (Programa de Uso Eficiente del Agua y la Energía Eléctrica) que proporcione apoyos para la rehabilitación de pozos e infraestructura, y programas como el MASAS (Manejo Sostenible de Aguas Subterráneas) que buscaba la estabilización de acuíferos explotados intensivamente (CONAGUA, 2010a). A pesar de ello, la participación de los usuarios directos del agua es de suma importancia, ya que de esto depende la aceptación e incluso la implementación de estas estrategias.

---

Es un hecho que la modernización de los sistemas de riego genera un ahorro considerable de agua, sin embargo; en ocasiones los agricultores utilizan este ahorro de agua para expandir la superficie de cultivo y aumentar su producción, por lo que la eficiencia en el consumo de agua que proporcionan los sistemas de riego beneficia directamente a los usuarios agrícolas del agua y no promueve la disminución de las demandas hídricas del campo (Banco Mundial, 2004).

Por otra parte, se cree que la tecnificación del campo provoca una disminución de la disponibilidad natural del agua, ya que a diferencia de los métodos de riego por inundación de superficie y por gravedad, los sistemas de riego presurizados, producen un pequeño o nulo volumen de retornos de riego (CONAGUA, 2010a). Esto se debe a una interpretación errónea del funcionamiento del ciclo hidrológico y de la disponibilidad de agua subterránea. El problema radica en considerar que la recarga por retornos de riego incrementa la recarga natural, cuando se trata de un volumen de agua que fue extraído del acuífero y posteriormente será infiltrado generando una recarga artificial inducida. Esta consideración se ve reflejada en la estimación de la disponibilidad de agua subterránea, ya que forma parte de la recarga, por lo que esto aparenta que la recarga natural aumento, pero también lo está dentro de las extracciones, por lo que en el balance hídrico el agua que se extrajo como excedente se contrarresta al infiltrarse, debido a lo cual teóricamente no produce una alteración. Sin embargo, el extraer ese volumen de agua excedente significa costos de extracción, cambios en la calidad química del agua, abatimiento del nivel freático y además, un largo tiempo de residencia para que vuelva a estar disponible. De acuerdo a todo lo anterior, la tecnificación del riego no disminuye la disponibilidad, por otra parte, lo que si provoca es que ese volumen de agua que constantemente estaba circulando por la zona no saturada debido a los retornos de riego, se vuelva un volumen disponible en el acuífero. Entonces, mantener los retornos de riego se vuelve una acción poco práctica, ya que la mejor agua infiltrada es la que no ha sido extraída, por lo que la gestión del agua actual debería tomar en cuenta esta conceptualización

mejor conocida como recarga virtual, con la finalidad de disminuir la presión y el impacto en el medio ambiente.

Estos conflictos son en gran medida una consecuencia de la gestión del agua desde la visión de la oferta y no desde la demanda, por lo que constantemente se buscan nuevas fuentes para incrementar la oferta del recurso hídrico, a pesar de que esto no siempre es posible o viable. Siguen dando concesiones sin pensar en el futuro, y por consiguiente en el aumento de la demanda de agua potable de la población futura, que posiblemente tendrá que ser proporcionada a partir de la demanda agrícola.

La gestión del agua en México, se ha visto sesgada por problemas de administración, falta de información, tomas clandestinas y conflicto de intereses, por lo que hay cinco aspectos principales que pueden ayudar a mejorar esta situación:

- Ordenamientos legales

Actualmente la Ley de Aguas Nacionales de 1992, es la que tiene como objetivo controlar, proteger y conservar los recursos hídricos para que puedan ser utilizados de forma sostenible. Por lo que para cumplir ese objetivo, es necesaria una actualización que implemente nuevos lineamientos para la determinación de la disponibilidad de agua, zonas de veda, el mercado del agua y acciones ante los cambios ambientales como el cambio climático.

El esquema actual de participación para la toma de decisiones, debería ser más simple y delegar algunas responsabilidades a los COTAS y Consejos de Cuenca, buscando la administración descentralizada y participativa.

- Conocimiento hidrogeológico

El conocimiento hidrogeológico de los acuíferos debe de ser una práctica constante que permita analizar su evolución a través del tiempo, ya que el monitoreo es la única herramienta para evaluar la condición de los acuíferos, ya sea en condiciones favorables o adversas, por lo que la caracterización y el

monitoreo, abren paso a crear propuestas técnicas para su uso sostenible. De acuerdo a lo anterior, es necesario promover el estudio hidrogeológico de todos los acuíferos del país y crear una red de monitoreo que genere datos piezométrico, de calidad del agua y de efectos de la sobreexplotación.

- Programas y estrategias

Se necesita la continua implementación de estrategias, que se adapten a las necesidades y a las condiciones sociales, económicas y ambientales de los usuarios del agua para promover el uso eficiente del recurso hídrico. Así mismo, la creación de programas hídricos proporcionará financiamiento para llevar a cabo dichas estrategias.

- Interacción y comunicación

Para poder ejecutar correctamente los planes de manejo, gestión y administración del agua, todas las partes involucradas ya sea en el uso o administración del agua subterránea, deben interactuar y tener una buena comunicación para poder conseguir el objetivo que buscan en común: tener acceso al agua.

- Educación acerca del recurso hídrico

La gestión del agua tiene diferentes actores, principalmente representantes del gobierno, administradores y usuarios del agua, los cuales actúan desde su propia perspectiva (por lo que es importante en punto anterior), sin embargo, al momento de tomar decisiones, se debe tomar en cuenta las situaciones e intereses, y sobretodo éstas deben estar fundamentadas de acuerdo al entendimiento del funcionamiento del ciclo hidrológico que rige a este recurso. Para lograr este objetivo, es importante promover el conocimiento hidrológico e hidrogeológico básico y la cultura del agua, en todos los niveles.



Conforme los aspectos anteriores se vayan desarrollando, será posible tomar decisiones informadas y acertadas que permitan el uso del agua subterránea en beneficios de todos. Para lograrlo, es imprescindible la participación de todas las partes involucradas y una visión común que se base en el desarrollo de información para el manejo del agua, donde continuamente se mida, recopile, analice y publique la información generada de las reservas acuíferas.

### **5.3 LA GESTIÓN DEL AGUA EN GUANAJUATO**

El estado de Guanajuato, es reconocido por las profundas labores de gestión que se llevaron a cabo mediante el programa MASAS (Manejo Sostenible de Aguas Subterráneas) financiado por el Banco Mundial, en el periodo del año 2000-2006.

El estado de Guanajuato tuvo un gran desarrollo agrícola e industrial desde mediados del siglo pasado, y con ello, un incremento demográfico importante. El agua subterránea es indispensable para el desarrollo del estado, ya que es la responsable de abastecer el 99% del volumen que se abastece para uso doméstico, el 60% del volumen de agua destinada a la producción agrícola y el 100% del volumen abastecido al sector industrial (GWMATE, 2006f). Estos elementos en conjunto provocaron el rápido aumento de la demanda de aguas superficiales y subterráneas para abastecer estos tres sectores, y por ende, problemas de sobreexplotación presentando caídas significativas de los niveles piezométrico, altos costos de energía, alteración en la calidad del agua, daño a infraestructuras por problemas de asentamiento y un déficit de 1.200 Mm<sup>3</sup>/año (Mejía & Sandoval, 2006).

El uso intensivo del agua subterránea a finales del siglo XX, trajo consigo la necesidad de llevar a cabo una gestión de la demanda del recurso hídrico, sin embargo; esto no fue posible debido a los escasos registros existentes de los títulos concesionados y los usos del agua, relacionados a la falta de interés de los usuarios (GWMATE, 2006f).



A raíz de esta situación, en 1998 dio inicio el proceso para crear planes de manejo para 15 Acuíferos de Guanajuato, utilizando un modelo de gestión que involucrara la participación de la sociedad en la resolución de la problemática del recurso hídrico. Por lo que promovió la creación de 14 Consejos Técnicos de Aguas conformados principalmente por todos los usuarios del agua que tienen un título de concesión, con el objetivo de integrar a los usuarios en la gestión del recurso hídrico. Además, creó el Consejo Estatal Hídrico (CEH), el cual tiene la función vincular a los 14 COTAS en la creación de estrategias para el uso sustentable del agua en Guanajuato.

Para llevar a cabo la implementación de dichas estrategias, los consejos tienen un fideicomiso para la Participación Social en el Manejo del Agua de Guanajuato (FIPASMA) obtenido a través de la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG) para cumplir los objetivos del proyecto “Concertación Social para la Estabilización de Acuíferos” (Mejía & Sandoval, 2006).

Las actividades preliminares que la CEAG le asignó a los COTAS fueron promover proyectos relacionados a la gestión del recurso para resolver las problemáticas locales, contribuir en la administración de los derechos de agua, campañas de concientización sobre el uso del agua, representar a los usuarios ante las negociaciones con el gobierno, asistir a los usuarios en los trámites e concesión y buscar una sustentabilidad financiera (GWMATE, 2006f). En la Tabla No. 7 se muestra la participación de los usuarios, COTAS, la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato y la Comisión Nacional del Agua en el desarrollo de las funciones de gestión.



Tabla 7. Funciones de gestión del agua subterránea. Fuente: México- Los Cotas: Avances en la Gestión Participativa del Agua Subterránea en Guanajuato, 2006f.

FUNCIONES	ORGANIZACIONES SOCIALES			OFICINAS GUBERNAMENTALES		
	USUARIOS	COTAS	CEH o CC	CEAG	CNA-GE/OC	OTROS
Obtener/apegarse a los derechos de uso de agua subterránea	Responsable	Apoyo			Hacer cumplir	
Operación y mantenimiento de pozo/sistemas	Responsable	Apoyo		Apoyo		
Medición de extracción del agua subterránea	Responsable	Apoyo			Hacer cumplir	
Formular/implementar planes de gestión de agua subterránea	Responsable	Contribución	Contribución	Apoyo	Hacer cumplir	Responsable
Denunciar pozos/ perforaciones clandestinos	Contribución	Responsable			Hacer cumplir	
Denunciar fuentes potenciales de contaminación de agua subterránea	Contribución	Responsable			Hacer cumplir	Apoyo
Conciliar información sobre uso de agua subterránea y energía	Contribución	Responsable		Apoyo	Apoyo	Apoyo
Mantener actualizado el perfil de usuario/ usos de agua subterránea	Contribución	Responsable		Apoyo	Hacer cumplir	
Actualizar la información sobre la situación de los acuíferos		Responsable		Apoyo	Apoyo	
Promover campañas de comunicación para el público en general		Contribución	Responsable	Responsable	Apoyo	
Monitoreo de nivel, uso y calidad del agua subterránea	Contribución	Contribución		Responsable	Responsable	
Mobilización y evaluación de las contribuciones de los COTAS	Contribución		Contribución	Responsable		
Actualizar periódicamente el sistema de derechos de agua subterránea	Contribución	Contribución			Responsable	
Controlar la descarga y el reúso de aguas residuales/ desechos sólidos	Responsable	Contribución		Apoyo		
Resolver disputas entre usuarios/ contaminadores de agua subterránea	Contribución	Contribución		Apoyo	Responsable	Contribución
Formular/implementar medidas de ahorro de agua	Responsable	Contribución	Contribución	Contribución	Hacer cumplir	Contribución
Formular/implementar ordenamiento territorial	Contribución	Contribución	Contribución	Contribución		Responsable

En la tabla anterior se muestra como los COTAS son responsables de mantener actualizada la información de los usuarios y del acuífero, además de denuncias cualquier situación irregular. También tienen otras funciones donde contribuyen al monitoreo del nivel, uso y calidad del agua subterránea, implementar medidas de ahorro de agua y la resolución de conflictos entre usuarios, entre otras. Sin embargo, la Comisión Nacional del Agua es la responsable de hacer cumplir las funciones de gestión.

Los logros obtenidos por los COTAS han sido un avance importante en cuestiones técnicas y administrativas, ya que crearon un padrón de usuarios, la base de datos de aprovechamientos con datos de ubicación y usos del agua, realizan campañas de monitoreo piezométrico anuales, crearon un catálogo de servicios para la atención de los usuarios, se toman decisiones en conjunto, atienden y canalizan a los usuarios en los tramites de títulos de concesión y cuentan con campañas permanentes de cultura del agua.

En busca del ahorro del agua para su uso sostenible, los COTAS propusieron diferentes estrategias enfocadas al ahorro del agua de la agricultura, ya que este sector es el principal usuario del agua en el estado. Algunas de las estrategias propuestas son la reducción del subsidio a la energía eléctrica, sustitución de cultivos por otros que consuman menos agua, renuncia a derechos de uso de agua subterránea, mejora de la eficiencia del uso del agua para riego, cambios en el régimen de producción agrícola y la recolección y reúso de aguas residuales urbanas (GWMATE, 2006f). Su objetivo común, es reducir el uso de agua subterránea tanto como sea posible sin reducir los ingresos económicos de los usuarios.

A pesar de las arduas labores que los COTAS realizaron en el estado de Guanajuato, su alcance no fue suficiente, ya que lograron recabar información hidrogeológica importante y encontraron formas de optimizar el uso del agua, pero no lograron la recuperación de los acuíferos. Esto se debe a la incapacidad legal de los COTAS para gestionar las demandas, debido a que no tienen autoridad y por ende tampoco capacidad de control para hacerlo.



En 2005, se implementó una estrategia para mantener las capacidades técnicas de los COTAS, que consistió en seguir desarrollando estudios hidrogeológicos y modelos matemáticos, además de promover el apoyo financiero, técnico y político de estos grupos de interés (Mejía & Sandoval, 2006). Por otra parte, la CEAG también impulsó la creación de Comités de Monitoreo, con la finalidad de capacitarlos en la toma de lecturas y volúmenes para proporcionar información confiable, también desarrollo un programa de mapeo de vulnerabilidad a la contaminación que incluye un inventario de fuentes de contaminación (CONAGUA, 2010a; GWMATE, 2006f).

La experiencia que dejó este programa en busca de la recuperación de acuíferos, es la valiosa participación que pueden desempeñar los usuarios del agua cuando se involucran en el proceso de gestión, sin embargo; también es importante señalar la necesidad de financiamiento y de capacidad legal que requieren para llevar a cabo las estrategias de gestión que permitan el uso sostenible del agua subterránea.

De lo que no cabe duda, es que los COTAS por si solos no pueden lograr los objetivos principales de recuperación, pero sería imposible lograrlo sin ellos. Por lo que la gestión del agua está siendo limitada por la incapacidad de la Comisión Nacional del Agua para aplicar la legislación acerca de las concesiones de agua subterránea, la perforación de pozos clandestinos y los volúmenes de extracción.

#### ***5.4.1 Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato 2000-2025***

Con la iniciativa de implementar una planeación y gestión integrada de los recursos hídricos del estado de Guanajuato, se creó el Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato 2000-2025. Dicho documento se creó bajo un enfoque que considera el grado de desarrollo del recurso, de acuerdo a la gestión de la disponibilidad comprometida, dentro de un marco que promueve las acciones coordinadas de aspectos sociales, económicos y ambientales, que



además, promueve la participación social para desarrollar programas que resuelvan las problemáticas a escala local (Sandoval, 2000).

La creación de este plan estatal se llevó a cabo mediante dos fases, la primer fase consistió en una fase de diagnóstico donde se realizaron tareas de recopilación y análisis de información para la caracterización hidrológica y geohidrológica de las cuencas y acuíferos del estado, también se realizó un inventario de recursos financieros, infraestructura y recursos humanos (Sandoval, 2000). Todas estas actividades se efectuaron para integrar los aspectos de caracterización hidrogeológica y socioeconómica, y con ellos identificar las diversas problemáticas relacionadas con el recurso hídrico dentro de la zona de estudio.

Terminada la primera fase, comenzó el proceso de la creación de objetivos derivados de la problemática ya identificada, los cuales darían lugar a una serie de estrategias encaminadas a contribuir en el logro de los objetivos principales. Los objetivos específicos que plantearon para el Plan Estatal Hídrico de Guanajuato (CEAG, 2000), fueron los siguientes:

- Diseñar y conformar una estructura de carácter formal apropiada para la formulación y la aplicación de la política hidráulica del Estado de Guanajuato, que permita el análisis, planeación, programación e instrumentación de acciones y programas dentro de las atribuciones del gobierno estatal y los gobiernos municipales
- Instaurar un proceso racional para la generación de una cartera estatal de acciones y proyectos en materia hidráulica, para sustentar su inclusión en los catálogos regionales y nacionales, según el caso
- Crear instrumentos para el fomento de una nueva actitud social y gubernamental en relación con el manejo del agua, ligada a la distribución ordenada y transparente de responsabilidades
- Implantar un sistema estatal de información para la planeación, control y evaluación del estado de los recursos ligados al aprovechamiento del agua, la

ejecución de los programas y acciones, y su impacto en el bienestar social, el desarrollo económico y la calidad ambiental del estado de Guanajuato

- Continuar con la ejecución de las acciones ya identificadas como prioritarias y ajustarlas al marco de planeación para que coincidan con sus objetivos
- Lineamientos para el establecimiento de un sistema estatal de planeación y gestión del agua

La segunda fase, consistió en la participación de las autoridades, los comités y organizaciones de usuarios para revisar las estrategias propuesta, además de tener la libertad de modificarlas o hacer nuevas propuestas (Sandoval, 2000).

Para la integración documental del agua en Guanajuato, se presentaron los principales aspectos de planeación, que incluían la ejecución de estudios sobre disponibilidad, balances, calidad y usos del agua, el desarrollo del Sistema Estatal de Información para la Planeación Hidráulica, la aplicación de modelos de simulación, optimización y evaluación, el desarrollo del Plan Estatal Hidráulico, la implantación de mecanismo para el monitoreo y adecuaciones de acciones y programas hidráulicos dentro Sistema Estatal de Información para la Planeación (CEAG, 2000).

#### **5.4 PROGRAMA NACIONAL HÍDRICO 2019-2024**

El Programa Nacional Hídrico 2019-2024, fue creado a partir de la consulta pública mediante 52 foros de consulta que se llevaron a cabo en el 2019, donde se identificaron cinco problemas principales en relación al recurso hídrico. Estos consisten en el acceso insuficiente e inequitativo a los servicios de agua potable y drenaje, uso ineficiente del agua, pérdidas humanas y daños materiales derivados de fenómenos hidrometeorológicos extremos, deterioro de cuencas y acuíferos que perturban el ciclo del agua y limitan su disponibilidad, y finalmente la falta de espacios democráticos para la gestión del agua en todos sus ámbitos.

A partir de cada uno de estos problemas públicos, se crearon cinco objetivos prioritarios que buscan remediar dichas problemáticas, los cuales consisten en garantizar progresivamente los derechos humanos al agua y al saneamiento, aprovechar eficientemente el agua para contribuir al desarrollo sostenible de los sectores productivos, reducir la vulnerabilidad de la población ante inundaciones y sequías, preservar la integridad del ciclo del agua a fin de garantizar los servicios hidrológicos que brindan cuencas y acuíferos, y mejorar las condiciones para la gobernanza del agua a fin de fortalecer la toma de decisiones y combatir la corrupción (SEMARNAT & CONAGUA, 2020).

Así mismo, el Programa Nacional Hídrico desarrollo estrategias que contribuyan a cumplir los objetivos prioritarios. A continuación, se muestran las estrategias publicadas por la Comisión Nacional de Agua (2020) para el desarrollo de objetivos. Para el primer objetivo que es garantizar los derechos humanos al agua y saneamiento, se crearon las siguientes estrategias para brindar el acceso al agua a todas las personas:

- Proteger la disponibilidad de agua para la implementación del derecho al agua
- Abatir el rezago en el acceso al agua potable y saneamiento
- Fortalecer a los organismos operadores de agua y saneamiento
- Atender los requerimientos de infraestructura hidráulica

El segundo objetivo que busca el uso eficiente del agua para desarrollar su uso sostenible sin afectar los factores socioeconómicos tiene estrategias de carácter técnico y social, ya que sus estrategias son:

- Aprovechar eficientemente el agua en el sector agrícola
- Fortalecer a las asociaciones de usuarios agrícolas
- Apoyar y promover proyectos productivos en zonas marginadas para impulsar el desarrollo
- Orientar el desarrollo de los sectores industrial y de servicios para mitigar su impacto

El tercer objetivo que busca hacer frente a las condiciones climáticas extremas, tales como sequías e inundaciones, busca mejorar la información hidrometeorológica y aplicarla para la prevención de riesgos y daños, por lo que se apoyan en cuatro estrategias para lograrlo:

- Fortalecer los sistemas de observación e información hidrológica y meteorológica para mejorar la gestión de riesgos
- Fortalecer medidas de prevención de daños ante fenómenos hidrometeorológicos y de adaptación para reducir la vulnerabilidad
- Desarrollar infraestructura para la protección de centros de población y zonas productivas
- Fortalecer la atención de emergencias relacionadas con el agua para proteger a la población

El cuarto objetivo que busca hacer frente a las condiciones de deterioro cuantitativo y cualitativo mediante la preservación integral del ciclo hidrológico, cuenta con las siguientes estrategias:

- Conservación de cuencas y acuíferos para la provisión de servicios hidrológicos
- Reducir y controlar la contaminación para evitar el deterioro de cuerpos de agua
- Reglamentar cuencas y acuíferos para asegurar su cantidad y calidad de agua, además de reducir la sobreexplotación
- Atender emergencias hidroecológicas para protección de la población y el medio ambiente

El quinto objetivo está destinado a la mejora de las condiciones de gobernanza que permitan la participación de todos los grupos de interés y el apoyo institucional, para lograr la gestión integrada de los recursos hídricos, mediante estas estrategias:

- Garantizar el acceso a la información en el proceso de planeación y rendición de cuentas
- Promover la participación ciudadana en la gestión del agua
- Fortalecer el sistema financiero del agua para focalizar inversiones a zonas y grupos de atención prioritaria
- Fortalecer las capacidades institucionales para la transformación del sector

Todas estas estrategias, se apoyan en acciones puntuales que permiten mejorar y fortalecer el alcance de las estrategias. Sin embargo, todas estas medidas de mejora deberán ser aplicadas de acuerdo a las necesidades locales, ya que la planificación hídrica nacional tiene metas de gestión en cuanto a la visión general del país.

Para determinar el avance en el cumplimiento de objetivos del Programa Nacional Hídrico, se integraron tres indicadores, el primero que es el indicador de metas para el bienestar, que engloba las metas principales que deben ser cumplidas por cada objetivo, y dos parámetros para medir el cumplimiento de las principales estrategias (Tabla No.8)(CONAGUA, 2020). Los parámetros que serán evaluados de acuerdo a la implementación de estrategias se muestran en la Tabla No. 9.

Tabla 8. Relación de indicadores sobre las metas para el bienestar y los parámetros, por objetivo prioritario del PNH 2020-2024. Fuente: Programa Nacional Hídrico 2020-2024, 2020.

Objetivo prioritario PNH	INDICADORES		
	Meta para Bienestar	Parámetro 1	Parámetro 2
1	Volumen de agua protegido/asignado o concesionado al uso doméstico o público urbano	Proporción de la población que tiene acceso al agua entubada diariamente así como al saneamiento básico en las 14 entidades más rezagadas	Proporción del agua residual municipal recolectada que es tratada
2	Grado de presión sobre el recurso hídrico de las zonas Centro y Norte del país	Rendimiento de cultivos básicos en zonas con infraestructura de riego	Eficiencia en el uso del agua medida como el cociente de valor agregado bruto entre agua utilizada
3	Número de estaciones de observación meteorológica que se encuentran en operación	Habitantes protegidos contra inundaciones	Superficie productiva protegida contra inundaciones
4	Número de cuencas con caudal ecológico para protección de la biodiversidad	Número de cuencas y acuíferos reglamentados	Proporción de sitios de monitoreo de calidad de agua superficial con calidad aceptable, buena o excelente
5	Recaudación de la CONAGUA en precios corrientes	Proporción de los trámites de los usuarios de aguas nacionales y bienes inherentes que son resueltos vía un sistema informático integral de administración del agua, recibidos en esta administración	Número de consejos de cuenca con participación de mujeres y de grupos sociales que no estaban incorporados en la gestión del agua

Tabla 9. Parámetros para evaluar el cumplimiento de los objetivos en las estrategias del PNH 2020-2024. Fuente: Programa Nacional Hídrico 2020-2024, 2020.

Objetivo Prioritario	Parámetros	Actual	Año
1	Proporción de la población que tiene acceso al agua entubada diariamente así como al saneamiento básico en las 14 entidades más rezagadas, (%)	37.6	2018
1	Proporción del agua residual municipal recolectada que es tratada, (%)	63.8	2018
2	Rendimiento de cultivos básicos en zonas con infraestructura de riego, (t/ha)	7.4	2018
2	Eficiencia en el uso del agua medida como el cociente de valor agregado bruto entre agua utilizada, (pesos constantes del 2010/m <sup>3</sup> )	489.8	2017
3	Habitantes protegidos contra inundaciones	1,111,099.0	2018
3	Superficie productiva protegida contra inundaciones, (ha)	69,734.0	2018
4	Número de cuencas y acuíferos reglamentados	35.0	2018
4	Proporción de sitios de monitoreo de calidad de agua superficial con calidad aceptable, buena o excelente, (%)	58.9	2018
5	Proporción de los trámites de los usuarios de aguas nacionales y bienes inherentes que son resueltos vía un sistema informático integral de administración del agua, recibidos en esta administración, (%)	48.0	2018
5	Número de consejos de cuenca que cuentan con vocalía de equidad de género	4.0	2018
5	Número de consejos de cuenca que cuentan con grupos sociales que no estaban incorporados en la gestión del agua	5.0	2018

De acuerdo a todo lo anterior, el Programa Nacional Hídrico 2020-2024 pretende explotar los recursos hídricos para brindar el acceso al agua a cada uno de los habitantes del país, así como desarrollar programas de manejo para el uso de agua subterránea en el sector agrícola e industrial que permitan su desarrollo económico dentro de un marco de gestión sostenible, por lo que mediante la participación de la sociedad y el gobierno, se podrán lograr metas de desarrollo sostenible, seguridad hídrica y seguridad alimentaria.

Además, el PNH 2020-2024 se ha enfocado en cumplir los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la ONU, incluyéndolos en las acciones puntuales de los objetivos primarios. Con



---

estas acciones ha logrado involucrar dieciséis de los diecisiete objetivos del desarrollo sostenible 2030 (SEMARNAT & CONAGUA, 2020), de los cuales los siguientes objetivos son los que han tenido más acciones de influencia en el Programa Nacional Hídrico:

- Fin de la pobreza
- Salud y bienestar
- Agua limpia y saneamiento
- Industria, innovación e infraestructuras
- Reducción de la desigual en y entre los países
- Ciudades y comunidades sostenibles
- Vida y ecosistemas terrestres

#### **5.4.1 Plan Estatal Hídrico 2040**

El Plan Estatal Hídrico 2040 del estado de Chihuahua fue creado en el 2019, a partir de la participación de dependencias de gobierno municipales, estatales y federales, así como de la participación de los sectores productivos, especialistas y ciudadanos.

A partir de los esfuerzos de caracterización de las cuencas y acuíferos del estado y la participación en diversos foros, se identificaron los cinco problemas prioritarios que se deben resolver para gestionar y administrar el agua. Los problemas que se plantean en el PEH 2040 (JCAS, IMTA, 2019), son los siguientes:

- Déficit en acuíferos y conservación ambiental y sustentable de cuencas hidrológicas
- Uso de agua en la agricultura
- Servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, y mala calidad de agua potable
- Gobernanza y gobernabilidad
- Riesgos ante fenómenos meteorológicos extremos, sequías e inundaciones



De acuerdo a la problemática del recurso hídrico que se presenta en Chihuahua, se determinaron seis objetivos generales, los cuales son garantizar la seguridad hídrica del estado de Chihuahua, incentivar el uso racional del agua en la agricultura, fortalecer a los organismos operadores, incentivar la gobernabilidad y gobernanza en el sector del agua, reducir el riesgo de la población ante fenómenos meteorológicos y promover la educación, investigación e innovación en temas hídricos (JCAS, IMTA, 2019).

Los objetivos anteriores, en realidad son muy parecido a los objetivos prioritarios del Programa Nacional Hídrico 2019-2024, esto se debe a que todas las cuencas y acuíferos, deben cumplir con las estrategias y objetivos del PNH 2019-2024, sin embargo; cuidando estos intereses, cada estado crea su propio Plan Estatal Hídrico en el que puede agudizar el carácter local de las estrategias que se van implementar para la gestión de los recursos hídricos.

Aunado a los objetivos del plan estatal, se llevó a cabo la creación de proyectos estratégicos que están enfocados a contribuir en ocho aspectos, los cuales son el sistema de control de pozos en el estado, tecnificación del riego y reconversión del cultivos para uso eficiente del agua en la agricultura, fortalecimiento de las JMAS y JRAS para la medición y gestión de presiones, remoción de metales pesados para el mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano, reúso de aguas residuales tratadas con énfasis para la agricultura, fortalecimiento de organismo operadores de agua potable y de los COTAS para el control de las extracciones de los acuíferos, control de inundaciones en ciudades y enseñanza del valor del agua en el sistema educativo estatal (JCAS,IMTA, 2019). A través de estos ocho proyectos, se planearon 654 acciones puntuales que ayudarán a cumplir con los objetivos y estrategias de gestión a lo largo del periodo del año 2019-2040.

Todos los proyectos y acciones a realizar planteados en el Plan Estatal Hídrico, serán ejecutados de acuerdo a los recursos financieros disponibles y las limitaciones técnicas, administrativas, sociales o legales que puedan presentar. De manera periódica, la Junta



---

Central de Agua deberá dar seguimiento a la implementación de las acciones del PEH 2040 para la verificación del cumplimiento de los objetivos principales.

Los retos del agua que se plantean actualmente en el estado de Chihuahua pueden llegar a ser muy complejos debido a los volúmenes incierto de extracción de agua subterráneas, la falta de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en los acuíferos. Esto se magnifica por la baja participación de las organizaciones de usuarios en estado, ya que no todos los acuíferos cuentan con Consejo Técnico de Agua Subterránea (COTAS) por falta de interés social y financiamiento por parte de las autoridades gubernamentales. De acuerdo a la implementación de las estrategias del Plan Estatal Hídrico 2040, todo esto puede cambiar.



---

## **Capítulo 6: Tareas del Estado Guanajuato en la Gestión del Agua**



## **6.1 SITUACIÓN DE LOS NIVELES DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS EN EL ESTADO DE GUANAJUATO**

En el estado de Guanajuato, en el año de 1998, pone en marcha a través de la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato, un plan intensivo de estudios hidrogeológicos de las principales zonas acuíferas del estado, con el propósito de contar con herramientas cuantitativas para sustentar las acciones de planeación hidráulica y de gestión integral del agua, ordena la construcción de modelos de simulación hidrodinámicos. Todas las tareas realizadas se enfocaron en un Plan Estatal de Hidráulico de Guanajuato 2000-2025, que se orientó al mejor uso del agua subterránea, bajo el enfoque de un desarrollo sustentable.

De forma paralela, puso en marcha el Programa de Actualización de Mediciones Piezométricas (PAMP). De acuerdo a Acevedo (2004), la CEAG realizó el monitoreo anual de una red piloto, que abarcaba la medición del nivel estático en 920 pozos de uso agropecuario, público e industrial, que se encuentran distribuidos en 18 de los 20 acuíferos del estado de Guanajuato.

Esta tarea se emprendió en el año de 1998, una vez que se derivó la conceptualización del funcionamiento hidráulico de los acuíferos y se estableció la red piloto; se continuó con el seguimiento las tareas del monitoreo piezométrico estatal; la misión de estas tareas era determinar el abatimiento promedio anual.

De acuerdo Acevedo (2004), no se tenían datos históricos, que respaldaran el análisis de información para conocer la evolución de los niveles estático en los acuíferos, no obstante, la CEAG, a través de la dirección de estudios y monitoreo, en el periodo que se extendió del año de 1998 al año 2005, empieza la labor de generar información de los niveles de agua, lo que le permite informa que el rango de variación de abatimiento para los 6 años medidos fue de 0.5 a 3 metros anuales, lo que asocian a varios factores, como las características climatológicas, geológicas, hidrogeológicas, el desarrollo social, económico e industrial del

estado de Guanajuato. Esta información de la evolución de los niveles de agua, se debió al programa de mediciones piezométricas; de esta manera, se manifiesta la importancia de mantener programas y acciones para conocer la manera que operan los acuíferos.

Asimismo, Acevedo (2004), reporta que durante el desarrollo de los estudios hidrogeológicos para los acuíferos de Guanajuato, se censaron 17,242 aprovechamientos de agua subterránea, a saber 15,718 fueron pozos profundos, así mismo 12,878 estaban activos; en cuanto a los usos se obtuvo que el 76 % son de uso agrícola, el 18% potable, 4% pecuario y 2% industrial. Con respecto al volumen de extracción anual se reportaba el dato de 4,258 Hm<sup>3</sup>, que se distribuía el 83.2% al uso agropecuario, mientras que al público el 15% y al industrial 1.8 %.

## **6.2 PROGRAMA DE MANEJO DEL ACUÍFERO**

En el año del 2002, la CEAG en coordinación con los COTAS, da inicio a los trabajos de implantación del “Programa de Manejo del Acuífero”, mediante el cual busca desarrollar en lo inmediato, acciones de alto impacto que fomenten la participación social en la solución de los problemas relativos al manejo del agua y disminuir la demanda de agua través del fomento a la productividad (Montoya et al., 2004).

Dado que el sector agrícola es el mayor consumidor del agua (> 80%), la misión del programa de manejo, se centró en aportar las ayudas por medio de asesoramiento técnico, para mejorar y tener un consumo del agua más eficiente, por lo que se dieron la tarea en buscar las ayudas para tener sistemas de riego modernos de alta eficiencia .

Para la implementación del programa, se definió una zona piloto de cada acuífero, en función al área de mayor abatimiento, normalmente cubría una superficie de 50 a 70 km<sup>2</sup>, además se integraban a los usuarios, entre 100 y 300, que eran pequeños propietarios o ejidatarios.

De acuerdo a Montoya et al. (2004) se realizaba un diagnóstico socioeconómico como un análisis de actores, donde se deducían las bases de trabajo en la zona. Una vez realizado este diagnóstico se llevan a cabo foros informativos y de consulta con los usuarios, para asegurar su compromiso y participación así como para definir las acciones y la forma de implantación.

Otra tarea titánica fue la implementación de la modernización de los sistemas de riego estableciendo, el uso de cultivos alternos e invernaderos; todas estas acciones fueron direccionadas con el propósito de involucrar a los usuarios a la toma de decisiones en el uso y manejo del agua subterránea, para crear conciencia en una recuperación de los niveles de agua de los acuíferos, que conduzca a un desarrollo sustentable para ellos mismos.

### **6.3 REGLAMENTACIÓN DE ACUÍFEROS**

La Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, en 2003, empezó a desarrollar de una reglamentación de acuíferos, con la finalidad de tener un mejor control de mismos. A continuación de forma resumida se mencionan las tareas a seguir de la reglamentación.

1. Con el objetivo central, la disminución de la demanda y tener un mejor control del recurso, se requiere de un monitoreo permanente de las extracciones y los niveles de agua en cada acuífero.
2. Para la realización de las tareas del monitoreo se proponía tres alternativas:
  1. Los usuarios a través del COTAS.
  2. La C.N.A. con su personal.
  3. El Estado a través de la CEAG y mediante la canalización de recursos provenientes del pago de derechos.

El monitoreo implicaba la instalación de macromedidores en los pozos, así como la aplicación de métodos indirectos para la estimación de las extracciones, como la estimación de caudales mediante la interpretación de imágenes de satélite.



---

Por otro lado, se recomendaba el autocontrol por parte de los usuarios del acuífero para no excederse en las extracciones, bajo la supervisión de Comisión Nacional del Agua y Comisión Estatal del Agua Guanajuato

3. Se propone un esquema de sanciones:

1. Sanción económica
2. Sanción financiera
3. Desde la reducción de los volúmenes asignados hasta cancelación del título de concesión según el nivel del delito y del daño provocado.

4. Para la disminución de la demanda de agua, se proponía:
  1. La redefinición de las dotaciones volumétricas
  2. Tecnificación de las actividades productivas
  3. Reconversión de las actividades productivas

En el caso de la redefinición de las dotaciones se proponía que se dividiera el volumen máximo de extracción permitido del acuífero entre los usuarios de forma equitativa; por ejemplo considerando la actividad agrícola: el volumen se divide proporcionalmente al número de hectáreas reportadas, en función del cultivo y del tipo de suelo.

Por su parte la tecnifican de las actividades productivas como la agricultura y la industria, se habla de instrumentar nuevos sistemas de producción y recuperación de las aguas grises a través de plantas de tratamiento de agua, con el fin de que disminuyera la extracción del agua y como consecuencia los costos de producción.

En el aparto de reconversión de actividades se proponía:

1. Buscar procesos que proporcionen un valor agregado a la producción, incrementando el índice de productividad del agua (\$/m<sup>3</sup>).
2. Favorecer el establecimiento de industrias “secas”.

La reglamentación que proponía la CEAG, era con el fin de asegurar la sostenibilidad de los programas de planes de manejo, que así misma operaría como un control estricto de uso del agua por parte de los usuarios y que ellos mismos fueran quienes tuvieran la misión de la implementación por medio de las asociaciones de usuarios.

Cabe destacar, aunque fue un primer proyecto a nivel nacional de reglamentación de los acuíferos de Guanajuato, las misiones que dictaba este reglamento eran de gran importancia para mitigar los efectos nocivos de las extracciones por bombeo, además de un control apropiado de las demandas y uso del agua.

#### **5.4 PROGRAMA ESTATAL HIDRÁULICO DE GUANAJUATO: HORIZONTE DE PLANEACIÓN AL AÑO 2030**

En la actualidad el gobierno de Guanajuato a continuado con la misión del cuidado de sus acuíferos, por lo que ha desarrollado un nuevo programa para el control del agua; Programa Estatal de Guanajuato 2030, en donde se reconoce por CONAGUA, que de 20 acuíferos que pertenecen al estado, 18 se encuentran sobreexplotados (DOF, 2013).

A continuación se exponen las líneas estratégicas del programa para la sustentabilidad del agua.

- Respetar los volúmenes de extracción concesionados para cada uno de los sectores;
- Elevar las eficiencias de riego mediante la modernización, rehabilitación y/o tecnificación de superficie de riego  $m^3$
- Reúso de aguas residuales tratadas (Intercambio sectorial)
- Conversión de Patrón de Cultivos
- Incremento de la Oferta (Entradas) de agua mediante la construcción de estructuras adecuadas para la recarga:
- Cosecha de agua mediante pozos/tanques

- 
- Presas de recarga sobre acuíferos con manto freático profundo
  - Pozos de recarga mediante agua excedente de plantas potabilizadoras saneamiento
  - Construcción de infraestructura para tratamiento de aguas residuales
  - Revisión/Análisis y establecimiento de tarifas competitivas para el uso de agua residual tratada. En su caso aplicación de subsidios para promover su uso.
  - Aumento de la eficiencia de conducción y distribución de agua potable
  - Promover campañas de cultura de agua
  - Promover la participación de la comunidad científico – académica del estado y a nivel nacional; para la introducción de innovaciones tecnológicas en lo referente al uso, manejo y gestión del recurso agua.

Se observa que el nuevo Programa Estatal Hidráulico, conserva la misma esencia del programa que se empezó a desarrollar en el 1998, sin embargo aún sigue siendo complicado la aplicación rigida del cualquier Programa para el control de los acuíferos, debido a la cuestión social, ya que la integración de los usuarios en el control de la problemática, demanda acciones realistas con una factibilidad económica que se puedan ejecutar en un tiempo razonable, donde se ilustren los resultados, sin embargo involucra y hacer conciencia de la necesidad de cuidar los acuíferos a los usuarios continua siendo una tarea titánica; sin sopesar las cuestiones políticas que juegan un papel importante en el proceso.

Al final cualquier programa de acciones para la recuperación de acuífero, más bien para romper la inercia de la sobreexplotación, de tal manera que se explote bajo un régimen equilibrado, con lleva un alto grado de incertidumbre e implica un esfuerzo mayúsculo de la sociedad y los gobernantes.



---

## Capítulo 7: Conclusiones

---

## 7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La disponibilidad de los acuíferos, ha estado sujeta a la distribución de la población, la tasa de crecimiento de las ciudades y las actividades económicas, generando problemas de acceso y abastecimiento de agua. Todos estos factores, se agudizan de acuerdo a las condiciones climáticas, por lo que las zonas áridas son las zonas más vulnerables y las cuales actualmente son las más afectadas.

La disponibilidad del agua en las zonas áridas de México, como es el caso de Chihuahua, está limitada principalmente por su disponibilidad física, condicionando las actividades económicas y la vida misma. El recurso hídrico es indispensable para el desarrollo del país, por lo que es necesario realizar acciones que promuevan el uso eficiente y su conservación.

La problemática en el manejo del agua, parte inicialmente de las conceptualizaciones que tenemos sobre el recurso hídrico, una de ellas es la disponibilidad de agua y la otra la sobreexplotación de los acuíferos. La primera más que un problema de conceptualización, tiene conflicto con ser considerada una herramienta para determinar el volumen de agua que puede ser extraído, la programación hídrica, los planes de manejo y la declaración de vedas. Esto se debe a la falta de información disponible para realizar un balance hídrico y a las numerosas incertidumbres relacionadas a los componentes hidrológicos que involucra su cálculo.

Debido a esta incertidumbre para la determinación de la disponibilidad mediante la metodología del balance hídrico, es recomendable cambiar los procedimientos para evaluar la disponibilidad utilizando metodologías para estimar la disponibilidad física, la cual permite encontrar el rendimiento sostenible del acuífero por medio del monitoreo de valores que pueden ser medidos con menor incertidumbre, como son los volúmenes de descarga natural y los niveles piezométricos.

La metodología descrita en la normativa mexicana se basa en el método del balance hídrico, al igual que otras metodologías utilizadas en otros países, sin embargo; la necesidad de tener

confiabilidad en el valor del volumen realmente disponible de agua, ha llevado a estos países a implementar acciones que permitan darle a la disponibilidad un verdadero sentido de gestión.

En la Unión Europea se han implementado indicadores que permiten determinar la disponibilidad de agua no solo a partir del volumen existente, sino que este volumen está restringido por condiciones de calidad química del agua, además de los aspectos ambientales que tienen prioridad.

Por otra parte, Australia ha creado un mercado del agua complejo con el que asegura el acceso eficiente al agua para todos sus habitantes, y lo ha logrado mediante la tecnología y la gobernanza, ya que desde hace años se ha dedicado a crear bases de datos diarios de todos los parámetros hidroclimáticos y redes de monitoreo automatizadas necesarias para la implementación de modelos de simulación que continuamente están estimando la disponibilidad, esta información y una política estricta sobre la administración del recurso hídrico, es lo que ha permitido un mercado del agua integral. De acuerdo a lo anterior, la normativa mexicana debe enfocarse en el desarrollo de acciones que permitan validar la disponibilidad de agua como una herramienta útil de gestión.

Otro conflicto relacionado a la disponibilidad es el de la sobreexplotación y es uno de los que más ha causado conflicto con su conceptualización. La sobreexplotación, ha estado ligada a diferentes interpretaciones, comúnmente está asociada a la relación de la extracción (demanda) y la recarga (oferta).

La condición de sobreexplotación se da cuando la demanda supera el volumen de la oferta, lo que provocará la disminución constante en el almacenamiento del acuífero, en algunas ocasiones se considera una condición de sobreexplotación hasta que el acuífero muestra evidencias de los efectos negativos que presenta debido a la explotación que se desarrolla en él, y en otras ocasiones la condición de sobreexplotación está relacionada al volumen de agua que es extraído del acuífero, haciendo referencia a cierto porcentaje del volumen que solo puede ser extraído una vez, donde se vuelve una condición de minado del acuífero.

Por estas interpretaciones, la sobreexplotación es un concepto que no está bien definido de forma objetiva, por lo que su definición debería estar más relacionada a una visión económica de

costo-beneficio, donde se defina como sobreexplotación la condición donde el costo de los efectos negativos sea mayor a los beneficios que genera el uso del agua subterránea. Sin embargo, esta perspectiva puede no ser siempre práctica, debido a la incertidumbre que existe en cuanto a la estimación y predicción de los impactos que se van a generar.

La sobreexplotación vista desde el punto de vista de la explotación intensiva de agua subterránea, se ha presentado a nivel mundial desde mediados del siglo XX. Las causas de esta actividad intensa se deben principalmente al desarrollo de las comunidades, ya sea por el incremento de la población en centros urbanos, las demandas del sector agrícola o para hacer frente a las condiciones climáticas. Estas son problemáticas locales que deben ser atendidas, ya que este régimen de explotación no puede ni debe ser una situación permanente cuando no se tiene ningún tipo de control del recurso hídrico.

Los indicios de la sobreexplotación surgen a partir del continuo descenso del nivel piezométrico en los acuífero y a partir de ahí, se desencadena una serie de impactos negativos, ya que el agua subterránea como parte del ciclo hidrológico está ligada a otros componentes ambientales. Algunos de los efectos negativos que han sido observados comúnmente y han sido documentados, son el continuo y acelerado descenso del nivel piezométrico, alteraciones en la calidad química del agua subterránea, inicio del proceso de desertización, asentamientos del terreno natural, modificación de las propiedades físicas de los acuíferos y alteraciones del ciclo hidrológico.

La extracción de agua subterránea, siempre va a provocar alteraciones o efectos negativos al ser una actividad de origen antropogénica, por lo que es importante asumir los impactos negativos que genera su explotación y no solo disfrutar de los beneficios que aporta. Para hacerlo, se deben identificar, monitorear y finalmente compensar estas externalidades. Los efectos que pueda llegar a tener un acuífero son soportables por un tiempo definido, en el cual se lleve a cabo la implementación de una gestión integrada para utilizar el recurso hídrico de forma sostenible, de lo contrario; las afectaciones pueden llegar a ser irreversibles cuando se mantiene el mismo régimen de explotación intensivo por periodos muy prolongados.



Por todo lo anterior, se puede decir que aún no hay una forma del todo fiable para determinar la sobreexplotación de un acuífero, ya que comúnmente varía de acuerdo a diferentes conceptualizaciones e intereses, desde la incertidumbre que se tiene sobre la recarga e incluso sobre la extracción, hasta la perspectiva política, social y económica que pueda tomar, además; los efectos observados deberán ser representativos de todo el acuífero, los cuales es posible que tarden décadas en aparecer de acuerdo a su caracterización hidrogeológica.

El uso intensivo del agua subterránea ha llevado a cuestionar la sostenibilidad futura de este recurso, sin embargo; el problema no es la cantidad de agua que se tiene para satisfacer las crecientes demandas, sino el modo en que se usa, se maneja y se comparte el agua. Por lo que la crisis del recurso hídrico, es una crisis de gobernanza.

Para realizar una gestión integral de los recursos hídricos se requiere de una acción colectiva, donde participen las instancias gubernamentales de todos los niveles, las organizaciones de usuarios, especialistas, todos los sectores económicos y la ciudadanía en general, ya que los problemas relacionados a la gestión y administración del agua generalmente pueden tener soluciones técnicas fáciles, sin embargo, siempre tienden a ser complejas social y económicamente.

La gestión de los recursos hídricos en México, ha estado limitada por los ordenamientos legales vigentes, la falta de conocimiento hidrogeológico de los acuíferos, la integración de todos los usuarios del agua en los procesos de planeación y administración, y la educación y conciencia pública acerca del recurso del hídrico. Todos estos aspectos vuelven una situación compleja la toma de decisiones informadas y acertadas. Por lo que para adoptar una nueva visión de la gestión basada en el consenso social, primero es necesario implementar programas de educación sobre el agua y su funcionamiento.

Las organizaciones de usuarios involucradas en la gestión y administración del recurso hídrico, han demostrado su capacidad para gestionar procesos administrativos relacionado a las concesiones, así como la creación de censos de aprovechamiento y llevar a cabo las tareas de monitoreo pertinentes para mantener actualizadas las bases de datos, por lo que estas organizaciones deben ser alentadas a involucrarse en el proceso de gestión.



---

Las principales razones para que los usuarios del agua, no formen parte de estas organizaciones, es la falta de interés y por ende, no asumen su papel de socios ni la responsabilidad que conlleva, creando una situación de conformismo. Por lo tanto, se deben crear estrategias que motiven a los usuarios a ser parte del proceso de gestión, donde se sientan entendidos y sean representados correctamente. También es importante que mantengan la visión del beneficio particular y no solo la de buscar el bien común, para provocar la motivación constante de los usuarios. Finalmente, es de suma importancia proporcionar recursos financieros a estas organizaciones para que puedan implementar las estrategias de gestión para cumplir los objetivos que se plantean en los planes de manejo, además de brindarles el poder administrativo que les permita hacer modificaciones y administrar la asignación de derechos del agua subterránea, para dar comienzo a la gestión de la demanda.

A pesar de los planes de manejo para la gestión de aguas subterráneas, actualmente la sobreexplotación no ha sido revertida ni siquiera detenida, ya que no se ha llevado a cabo el correcto y continuo monitoreo hidrogeológico y mucho menos, se han llevado a cabo las remediaciones ambientales necesarias para validar la extracción de agua subterránea. Sin embargo, los planes de manejo a nivel nacional y estatal actuales, buscan promover la gestión social para implementar estrategias encaminadas al uso sostenible del agua subterránea mediante evaluaciones sistemáticas de las condiciones de los acuíferos, por lo que se espera empezar a obtener resultados para el año 2025.



---

## Referencias

## REFERENCIAS

- Acevedo T., B. (2004). Evolución del abatimiento en el nivel estático de los acuíferos de Guanajuato. *Aqua Forum-CEAG*, No. 37.
- Ambroggi, R.P. (1977). Underground reservoirs to control the water cycle. *Scientific American* 236(5), 21-27.
- Arreguín Cortés, F. I., Martínez Austria, P. F., & Trueba López, V. (2004). El agua en México, una visión institucional. (January).
- AWA (Australian Water Association) (2011). La dinámica industria del agua en Australia. Australian Trade Commission.
- Banco Mundial (2004). Gestión de recursos hídricos en México: el papel del PADUA en la sostenibilidad hídrica y el desarrollo rural. Vol. 1.
- Banco Mundial (2019). Agricultura y alimentos, Panorama general.
- BOM (Bureau of Meteorology) (2013). The National Water Account: Companion Guide. ISBN:9780642706430. Melbourne.
- BOM (Bureau of Meteorology) (2015). Water in Australia 2013-14
- BOM (Bureau of Meteorology) (2019). Water in Australia 2017-18
- Carrillo, J.J. (2014). Por una Gestión Integral del Agua Subterránea (GIAS): Una Propuesta. Coloquio Nacional Agua Subterránea en México. Coloquio llevado a cabo en Morelos, México.
- CCNNRFS (Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario) (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.
- CE (Comisión Europea) (2009). Documento guía No. 18 Guía sobre el estado de las aguas subterráneas y la evaluación de tendencias.
- CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria) (2015). La agricultura y la gestión sustentable del agua en México.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2020). Atlas Nacional de Riesgos. <http://atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>, Fecha de consulta: Febrero 2020.
- Chávez, A. (2006). Disponibilidad de agua subterránea. Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ingeniería.
- Chávez, R., Lara, F., & Sención, R. (2006). El agua subterránea en México: Condición actual y retos para un manejo sostenible. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 115–126. ISSN: 0366-0176. México.



- 
- Comisión Estatal del Agua en Guanajuato (2000). Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato 2000-2025.
- Comisión Estatal del Agua en Guanajuato (2003). Reglamento de acuíferos (Modelo V.2).
- Comisión Estatal del Agua en Guanajuato (2003). Situación Hidráulica de Guanajuato. Comisión Estatal de Guanajuato, Guanajuato. p 96.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (1999). Compendio básico del agua en México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2001a). Compendio básico del agua en México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2001b). Programa Nacional Hidráulico 2001-2006. Compendio básico del agua en México. Comisión Nacional del Agua. México, p 96.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2002). Compendio básico del agua en México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2005). Estadísticas del agua en México 2005.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2006). Estadísticas del agua en México 2006.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2008). Estadísticas del agua en México 2008.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2010a). El agua en México: Cauces y Encauces.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2010b). Estadísticas del agua en México 2010.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2011). Estadísticas del agua en México 2011.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2012). Estadísticas del agua en México 2012.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2013a). Estadísticas del agua en México 2013.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2013b). Organismos de Cuenca y Direcciones Locales.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2014). Estadísticas del agua en México 2014.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuauhtémoc (0805), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015b). Estadísticas del agua en México 2015.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015c). NOM-011-CONAGUA
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2016). Estadísticas del agua en México 2016
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2017). Estadísticas del agua en México 2017.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ascensión (0801), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Baja Babícora (0803), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
-



- 
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018c). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Buenaventura (0804), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018d). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuauhtémoc (0805), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018e). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Casas Grandes (0806), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018f). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018g). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Janos (0808), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018h). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Mexicanos (0809), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018i). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Samalayuca (0810), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018j). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018k). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna Tres Castillos (0813), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018l). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Tarabillas (0814), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018m). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Patos (0817), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018n). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Santa María (0818), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018o). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna la Vieja (0819), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.



- 
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018p). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Flores Magón-Villa Ahumada (0821), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018q). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Santa Clara (0822), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018r). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Conejos-Médanos (0823), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018s). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Hormigas (0824), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018t). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Cuarenta (0827), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018u). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Los Moscos (0828), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018v). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018w). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Meoqui-Delicias (0831), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018x). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Jiménez-Camargo (0832), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018y). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Juárez (0833), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018z). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Parral-Valle del Verano (0834), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018aa). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Alto Río San Pedro (0838), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018ab). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Villalba (0840), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.



- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018ac). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Felipe de Jesús (0845), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018ad). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Los Juncos (0847), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018ae). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Palomas (0848), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018af). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Llano de Gigantes (0849), Estado de Chihuahua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018ag). Atlas del agua en México 2018.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018ah). Estadísticas del agua en México 2018.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018ai). Numeragua 2018.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2019). Títulos y volúmenes de aguas nacionales y bienes inherentes por uso de agua. Información estadística. Disponible en [www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/informacion-estadistica-62159](http://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/informacion-estadistica-62159)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2020). Programa Nacional Hídrico 2019-2024 Resumen.
- Custodio, E. (2000a). The complex concept of overexploited aquifer. *Papeles del Proyecto aguas subterráneas*. ISBN: 84-95516-04-.
- Custodio, E., Llamas, M., & Sahuquillo, A. (2000b). Retos de la hidrología subterránea. *Ingeniería del agua*, 7 (1), 23-36.
- Custodio, E. (2002). Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal* (2002) 10:254–277. DOI 10.1007/s10040-002-0188-6.
- Custodio, E., Llamas, M., & Sahuquillo, A. (2008). *La gestión de las aguas subterráneas*. (1), 25. Sevilla.
- Custodio E., Albiac, J., Cermerón, M., Hernández, M., Llamas M.R., & Sahuquillo A. (2017). Groundwater: benefits, problems and consequences in Spain. *Sustainable Water Resources Management*. DOI 10.1007/s40899-017-0099-2.
- Davila-Hernandez, N., Madrigal, D., Exposito, J.L. & Xanat, A. (2014). Multi-Temporal Analysis of Land Subsidence in Toluca Valley (Mexico) through a Combination of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Historical Piezometric Data. *Scientific Research*.
- DGA (Dirección General de Aguas) (2008). Norma de exploración y explotación de aguas subterráneas. Ministerio de Obras Públicas.
- Domínguez, J. & Carrillo-Rivera, J.J. (2007). El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México. Publicado por la UNAM para el Congreso Internacional



---

“Hacia la conmemoración del Bicentenario de la Independencia y el Centenario de la Revolución mexicana. Retos y Perspectivas”.

- FCIHS (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea) (2009). Hidrogeología. Barcelona, España.
- Figuerola-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J., Hernández-Madrugal, V., & Villaseñor-Reyes, C. (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology*, 246, 91-106.
- Garrels, R.M., Mackenzie, F.T. & Hunt, C. (1975). *Chemical Cycles and the Global Environment: Assessing Human Influences*. Kaufman, Los Altos, California.
- Gil Antonio, M. de los Á., Reyes Hernández, H., & Márquez Mireles, L. E. (2014). Disponibilidad y uso eficiente de agua en zonas rurales. *Investigación y Ciencia*, 22, 67.73. ISSN: 1665-4412
- Gleick, P. H., 1996: Water resources. In *Encyclopedia of Climate and Weather*, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.
- Gobierno del Estado de Guanajuato, CONAGUA (2015). Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato, Resumen Ejecutivo.
- Gutiérrez, M., Reyes-Gómez, V.M., Alarcón-Herrera, M.T. & Núñez-López, D. (2016). Acuíferos de Chihuahua: estudios sobre sustentabilidad. *TECNOCENCIA Chihuahua*, Vol. X, Núm. 2.
- GWMATE (Groundwater Management Advisory Team) (2006a). “Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica”. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Serie de Notas Informativas, Nota 1. Banco Mundial*
- GWMATE (Groundwater Management Advisory Team) (2006b). “Estrategias para la Gestión del Agua Subterránea facetas del enfoque integrado”. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Serie de Notas Informativas, Nota 3. Banco Mundial*
- GWMATE (Groundwater Management Advisory Team) (2006c). “Legislación y Disposiciones Reglamentarias Sobre Agua Subterránea desde reglas consuetudinarias hasta la planificación integrada en cuencas”. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Serie de Notas Informativas, Nota 4. Banco Mundial*
- GWMATE (Groundwater Management Advisory Team) (2006d). “La participación de los Grupos Interesados en la Gestión del Agua Subterránea movilizar y apoyar organizaciones de gestión de acuíferos”. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Serie de Notas Informativas, Nota 6. Banco Mundial*
- GWMATE (Groundwater Management Advisory Team) (2006e). “El Agua Subterránea en la Planificación Hídrica Nacional y de Cuencas promover una estrategia integral”. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Serie de Notas Informativas, Nota 9. Banco Mundial*
- GWMATE (Groundwater Management Advisory Team) (2006f). “México- Los Cotas: Avances en la Gestión Participativa del Agua Subterránea en Guanajuato”. *Gestión*



---

Sustentable del Agua Subterránea. Serie de Notas Informativas, Nota 10. Banco Mundial

GWP (Global Water Partnership) (2013). Aguas subterráneas y agricultura de regadío: haciendo una relación beneficiosa más sostenible.

Hiscock, K.M. & Bense, V.F. (2014). Hydrogeology Principles and Practice, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, 518 p.

Holzer, T.L. & Galloway, D.L. (2005). Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States. Eng Geol 16:87–99.

IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Center) (2006). Guía para el Seguimiento General de las Aguas Subterráneas. Versión española por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1910). Tercer Censo de Población de los Estados Unidos Mexicanos 1910.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1921). Censo General de Habitantes 1921.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1930). Quinto Censo de Habitantes 1930.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1940). Sexto Censo de Habitantes 1940.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1950). Séptimo Censo de Habitantes 1950.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1960). VII Censo General de Población 1960.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1970). IX Censo General de Población 1970.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1980). X Censo General de Población y Vivienda 1980.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1990). XI Censo General de Población y Vivienda 1990.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (1995). Conteo de Población y Vivienda 1995.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2000). XII Censo General de Población y Vivienda 2000.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2003). Síntesis de información geográfica del estado de Chihuahua. ISBN 970-13-4166-X.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2005). II Conteo de Población y Vivienda 2005.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2010). Censo de Población y Vivienda 2010.

---



- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2015). Encuesta Intercensal 2015.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2017). Encuesta Nacional Agropecuaria 2017.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2018). Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica ENADID 2018.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2019). Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales.
- JCAS (Junta Central de Agua y Saneamiento) (2011). Programa Sectorial 2011-2016. Gobierno del Estado.
- JCAS (Junta Central de Agua y Saneamiento) & IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) (2019). Plan Estatal Hídrico 2040. Gobierno del Estado de Chihuahua.
- Kemper, K.E. (ed.) (2004). Theme issue: groundwater – from development to management. *Hydrogeology Journal* **12**(1), 3–5.
- Li, C.J., Tang, X.M. & Ma, T.H. (2006). Land subsidence caused by groundwater exploitation in the Hangzhou- Jiaxing-Huzhou Plain, China. *Hydrogeol J* **14**(8):1652–1665.
- Liu, C.W., Chou, Y.L., Lin, S.T., Lin, G.J. & Jang, C.S. (2010). Management of high groundwater level aquifer in the Taipei Basin. *Water Resour Manag* **24**:3513–3525.
- Llamas, M.R. (2004). La gestión de las aguas subterráneas y los conflictos sociales relativos al Plan Hidrológico Nacional. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat. (Esp)* Vol. 98, No.2, pp 235-254, 2004.
- Llamas M.R., & Custodio E. (2002). Acuíferos explotados intensivamente: conceptos principales, hechos relevantes y algunas sugerencias. *Boletín Geológico y Minero* Vol. 113. ISSN: 0366-0176.
- Martínez, L., Hernández-Mora, N. & Llamas, M.R., (2002). El uso sostenible de las aguas subterráneas en España. *Boletín Geológico y Minero* Vol. 113(3): 229-241. ISSN: 0366-0176
- Mejía G., J.A. & Sandoval M., R. (2006). “Aportación de las comunidades de usuarios a la gestión de los recursos hídricos. Experiencia de los consejos técnicos del agua en México”. De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada. Instituto Geológico y Minero de España.
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el reto demográfico) (2019). Directiva Marco del Agua. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua/default.aspx>
- Molina, J.L., Aróstegui, J.L.G., Benavente, J., Varela, C., Hera, A. & Geta J.A.L. (2009). Aquifers overexploitation in SE Spain: a proposal for the integrated analysis of water management. *Water ResourManag* **23**:2737–2760.
- Montoya S., J., Barrera M., A.J. & Agner O., I.C. (2004). El proyecto de Consejo Técnico de Aguas y los programas de manejo de acuífero. *Aqua Forum-CEAG*, No.37.



- MOP (Ministerio de Obras Públicas) (2008). Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas.
- MOP (Ministerio de Obras Públicas) (2012). Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025. Dirección General de Aguas. Chile.
- MOP (Ministerio de Obras Públicas) (2017). Balance Hídrico Nacional. Dirección General de Aguas.
- Moreno-Reséndez, A., Reyes-Carrillo, J.L., Márquez-Quiroz, C., Márquez-Hernández, C. & Moncayo-Luján, R. (2015). Actividades antropogénicas, cambio climático, degradación del suelo, desertificación y enfoque de la agricultura sustentable.
- Nájera H., B. (2016). Variación estacional de la calidad del agua en los acuíferos de Tabalaopa-Aldama y Aldama-San Diego, en Chihuahua, México (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.
- Ortiz, C. (2014). El estado de las aguas subterráneas en Chile. Artículo publicado en: <http://olca.cl/articulo/nota.php?id=104620>
- Ortiz-Zamora, D. & Ortega-Guerrero, A. (2010). Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resour Res* 46:W01513.
- Phienweij, N., Giao, P. & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Eng Geol* 82(4):187–201.
- Pulido, A. (2000). La explotación de las aguas subterráneas y su implicación en la desertización. *Boletín geológico y minero*. ISSN 0366-0176, Vol. 111, No.5, 2000, págs. 3-18.
- Pulido, A. (2001). Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas, 2001-01-01, ISBN 84-8108-240-6, PAGS. 115-132.
- REPDA (Registro Público de Derechos del Agua) (2020a). Base de datos: Censo de aprovechamientos de agua subterránea en el Estado de Chihuahua. Última actualización: 26 de Junio de 2020.
- REPDA (Registro Público de Derechos del Agua) (2020b). Base de datos: Censo de aprovechamientos de agua subterránea de los municipios de Ascensión, Cuauhtémoc, Janos, Chihuahua, Jiménez, Ahumada, Nuevo Casas Grandes, Camargo, Namiquipa, y Delicias, en el Estado de Chihuahua. Última actualización: 26 de Junio de 2020.
- Rolland, L. & Vega C., Y. (2010). La gestión del agua en México. *Polis*, 6 (2), 155-188. *Revista Scielo*.
- Romero-Navarro, M., Pacheco-Martínez, J., Ortiz, J., Zemeño de León, M., Araiza-Garaygordobil, G., & Mendoza-Otero, E., (2010). Land subsidence of the Aguascalientes Valley, México: historical review and present situation. *IAHS-AISH Publication* 339.
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) (2018). Compendio de Indicadores 2018. Programa de Concurrencia con las Entidades Federativas. Chihuahua.



- Sahu, P. & Sikdar, K. (2011). Threat of land subsidence in and around Kolkata City and East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *J Earth Syst Sci* 20(3):435–446.
- Sahuquillo, A. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat. (Esp)* Vol. 103, No.1, pp 97-114, 2009. X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica.
- Sandoval M., R. (2000). Planeación hidráulica para el desarrollo sustentable: propuestas preliminares a partir de la experiencia del Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato.
- Sarychikhina, O. & Glowacka, E. (2015). Spatio-temporal evolution of aseismic ground deformation in the Mexicali Valley (Baja California, Mexico) from 1993 to 2010, using differential SAR interferometry. DOI:10.5194/piahs-372-335-2015.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) & CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2020). Programa Nacional Hídrico 2019-2024.
- Shi, X.Q., Xue, Y.Q., Ye, S.J., Wu, J.C., Zhang, Y. & Yu, J. (2007). Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China. *Environmental Geology* 52(1):27–40.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2019). Infografía Agroalimentaria de Chihuahua 2019.
- Siebert, S., Burke, J. & Faures, J.M. (2010). Groundwater use for irrigation. *Hydrology and Earth Systems Science*, 14, 1863-1880. DOI:10.5194/hess-14-1863-2010.
- SKM (Sinclair Knight Merz) (2006). Stocktake and Analysis of Australia's Water Accounting Practice. Final Report.
- Sosa Rodriguez, F. S. (2012). El futuro de la disponibilidad del agua en México y las medidas de adaptación utilizadas en el contexto internacional. *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades*, XII (ISSN: 1405-3543), 165–187. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/654/65429255008.pdf>
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Bertoni, W. & Gonella, M. (2005). A century of land subsidence in Ravenna, Italy. *Environ Geol* 47:831–846.
- UE (Unión Europea) (2019). Información básica sobre la Unión Europea. [https://europa.eu/european-union/about-eu\\_es](https://europa.eu/european-union/about-eu_es)
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura por sus siglas en inglés) (2015). Adaptación a los impactos del cambio climático en los sistemas acuíferos. El agua subterránea en un medio cambiante.
- Vardon, M., Lenzen, M., Peavor, S. & Creaser, M. (2007). Water accounting in Australia. *Ecological Economics*, 61(4), 650-659.
- Velasco, I., Ochoa, L. & Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17(34), 35-71. ISSN 1870-3925.
- Velázquez A., L. & Ortiz A., A. (1989). Provincias hidrogeológicas de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Abril 1992, 22pp.
- Vilanova, E., Jordana, S., & Guimerá, J. (2005). Revisión de diferentes metodologías empleadas en el análisis de presiones e impactos sobre las aguas subterráneas según



---

la Directiva Marco (2000/60/CE). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas No. 21.

- Villalba, L., Colmenero-Sujo, L., Pinales-Munguía, A., Estrada-Gutiérrez, G., Rubio-Arias, H.O., Mireles-García, F. & Dávila-Rangel, I. (2013). Analysis of health risk due to the presence of radioactivity and chemical elements in groundwater. Aldama Municipality, Chihuahua, México. *Journal of Environmental Protection*, 4:1265-1271.
- Wu, Y.P., Jiang, W. & Ye, H. (2010). Karst collapse hazard assessment system of wuhan city based on GIS. 2010 international symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan, April 26–30.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2015). Agua para un mundo sostenible Datos y Cifras. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015. Paris, UNESCO.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2018). The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions. Paris, UNESCO.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO) (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESCO.
- Yang, T.C. & Yu, P.S. (2006). Application of fuzzy multi-objective function on reducing groundwater demand for aquaculture in land-subsidence areas. *Water Resour Manag* 20:377–390.
- Zakhem, B. A., & Kattaa, B. (2017). Overexploitation and cumulative drought trend effect on Ras El Ain karstic spring discharge (Khabour sub-basin, Syria). *Journal of Earth System Science*, 126(7), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0882-3>



---

## **Curriculum Vitae**

Ingeniero Civil con la especialidad de hidráulica e hidrología, por la facultad de ingeniería de UACH (2017), con 4 años de experiencia como consultor privado en la realización de trabajo de campo y gabinete de estudios hidrogeológicos, monitoreo piezométrico y evaluación del balance de aguas subterráneas,

Domicilio Permanente: Arroyo El Pabellón #2232, Colonia Los Arroyos  
Chihuahua, Chihuahua, Código Postal

Esta tesis fue mecanografiada por Ing. Ana Carolina Quiroz.