



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL



**“IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS
PARA LA RECARGA ARTIFICIAL
EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

JANNET MARTÍNEZ ARIAS

DIRECTORES:

M. EN C.A. JORGE PAREDES TAVARES

DR. EN ING. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO; OCTUBRE 2016

Agradecimientos

A **Dios** por permitirme culminar esta etapa de mi vida, guiándome por el buen camino, por las bendiciones recibidas y por darme la fuerza para salir adelante ante las adversidades.

A mi **Papá y Mamá** quienes fueron mi apoyo y motivación para culminar este logro, por sacarme adelante y brindarme los recursos necesarios para seguir con mi formación académica y por todo lo que han hecho por mí para convertirme en una mejor persona.

Al **Dr. José Luis Expósito Castillo** por brindarme la ayuda, paciencia y el tiempo para la realización de esta tesis, por los conocimientos aportados y por sus consejos de ser cada día mejor profesionalista y persona.

Al **Mtro. Jorge Paredes Tavares** por su apoyo y sugerencias brindadas para la realización de este trabajo.

A los maestros **Adriana Guadalupe Peñuelas y Julio Cesar Carbajal Monroy** revisores de este trabajo, por sus conocimientos aportados para mejorar este trabajo de investigación.

A todas aquellas personas que siempre han estado ahí apoyándome.

Resumen

El acuífero del valle de Toluca es de gran importancia para el abastecimiento de agua, tanto para la región del acuífero como para la Ciudad de México, sin embargo, el aumento de la población y la industria ha generado una creciente presión sobre los volúmenes extraídos ocasionando la sobreexplotación del acuífero afectando la cantidad y calidad del recurso.

En las últimas décadas, ha habido un creciente desarrollo de técnicas que permiten la recuperación de los niveles piezométricos, disminuyendo los efectos ocasionados por la sobreexplotación del acuífero. En este sentido, la recarga artificial (AR) es una técnica que se presenta para incrementar la disponibilidad de agua y al mismo tiempo puede mejorar la calidad de la misma. Por tal motivo, la presente investigación tiene como objetivo la identificación de áreas prioritarias para la recarga artificial en el acuífero del valle Toluca (AVT) mediante criterios hidrogeológicos y la aplicación de SIG.

El primer paso metodológico consistió en la descripción de las características físicas del acuífero (geología, hidrogeología, edafología, climatología) para conocer mejor la situación actual del acuífero. En segundo paso se seleccionaron los criterios hidrogeológicos para la identificación de áreas prioritarias para la recarga artificial, considerando la disponibilidad de información los criterios utilizados fueron: Áreas de abatimiento del nivel del agua subterránea, ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea, densidad de pozos de extracción, área principal de agrietamiento y principales zonas industriales. Finalmente, con la ayuda de un SIG, se aplicó el método de álgebra de mapas y se obtuvo como resultado la ubicación de las áreas prioritarias para la recarga artificial.

Las áreas de alta prioritarias para la recarga artificial sobresalen en la porción centro del acuífero, específicamente en la zona metropolitana del valle de Toluca, se espera que la identificación de dichas áreas puedan servir en la planeación de estrategias que apoyen la gestión y el manejo sustentable de los recursos hídricos.

Índice general

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Índice general.....	iii
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivos.....	5
Capítulo 2. Marco teórico.....	6
2.1 El agua subterránea, importancia y factores que condicionan su presencia.....	6
2.2 Problemática del agua subterránea.....	13
2.3 El agua subterránea en México.....	17
2.4 Recarga artificial. Conceptualización, clasificación y métodos.....	20
2.5 La recarga artificial de acuíferos en el marco de la gestión integral de los recursos hídricos.....	27
2.6 Factores que influyen en la recarga artificial.....	28
2.7 La recarga artificial de acuíferos en el ámbito global y local.....	31
2.8 Contexto legal en México sobre la recarga artificial.....	34
Capítulo 3. Descripción y generalidades del acuífero del valle de Toluca.....	36
3.1 Ubicación geográfica.....	36
3.2 Climatología.....	38
3.3 Geología.....	40
3.4 Edafología.....	44
3.5 Hidrología.....	47
2.5.1 Hidrología superficial.....	47
2.5.2 Hidrología subterránea.....	50
3.6 Población.....	52
3.7 Breve historia del uso del agua en el acuífero del valle de Toluca.....	54
Capítulo 4. Metodología.....	56
4.1 Recopilación y análisis de la información.....	56
4.2 Descripción de las características del acuífero del valle de Toluca.....	58
4.3 Análisis y selección de los criterios hidrogeológicos para la identificación de áreas prioritarias para recarga artificial.....	58
4.3.1 Áreas de abatimiento del nivel del agua subterránea.....	58
4.3.2 Ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea.....	62
4.3.3 Densidad de pozos de extracción.....	63
4.3.4 Área principal de agrietamiento.....	64

4.3.5	Principales zonas industriales.....	65
4.4	Identificación de áreas prioritarias para la recarga artificial.....	66
Capítulo 5. Presentación y análisis de resultados.....		70
5.1	Análisis de información disponible.....	70
5.1.1	Áreas de abatimiento del nivel del agua subterránea.....	70
5.1.2	Ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea.....	73
5.1.3	Densidad de pozos de extracción.....	75
5.1.4	Área principal de agrietamiento.....	77
5.1.5	Principales zonas industriales.....	77
5.2	Identificación de las áreas prioritarias para la recarga artificial.....	80
5.3	Propuesta de sistema de recarga artificial.....	86
Conclusiones y recomendaciones.....		90
Bibliografía.....		94

Índice de figuras

Figura 2.1	Distribución del agua en el Planeta.....	7
Figura 2.2	Movimiento del agua subterránea.....	10
Figura 2.3	Tipos principales de acuíferos en función de la presión.....	10
Figura 2.4	Interacción del agua subterránea y agua superficial.....	11
Figura 2.5	Cono de depresión originado por el bombeo intensivo.....	12
Figura 2.6	Contaminación del agua subterránea por aguas fecales.....	14
Figura 2.7	Subsidencia del terreno por bombeo intensivo.....	15
Figura 2.8	Evolución del nivel piezométrico de un acuífero.....	16
Figura 2.9	Usos del agua subterránea en México.....	18
Figura 2.10	Acuíferos sobreexplotados en México.....	19
Figura 2.11	Estanque o pileta de infiltración.....	21
Figura 2.12	Zanjas de infiltración.....	22
Figura 2.13	Recarga por inundación del terreno.....	22
Figura 2.14	Recarga de acuíferos por sobreriego.....	23
Figura 2.15	Escarificación del lecho del río.....	23
Figura 2.16	a) Esquema de un pozo absorción, b) Diseño de un pozo de absorción.....	24
Figura 2.17	Esquema de un pozo profundo.....	25
Figura 3.1	Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	37
Figura 3.2	Municipios localizados en la región del acuífero del valle de Toluca.....	38
Figura 3.3	Climas de la región del acuífero del valle de Toluca.....	39
Figura 3.4	Geología de la región del acuífero del valle de Toluca.....	42
Figura 3.5	Edafología de la región del acuífero del valle de Toluca.....	46
Figura 3.6	Hidrología de la región del acuífero del valle de Toluca.....	49
Figura 3.7	Crecimiento demográfico de los municipios comprendidos dentro de la región del acuífero del valle de Toluca.....	53
Figura 4.1	Esquema metodológico utilizado para generar los resultados de la investigación.....	57
Figura 4.2	Ubicación de multipiezómetros en la región del AVT, con su número de inventario.....	60
Figura 4.3	Esquema de un multipiezómetro.....	60
Figura 4.4	Ubicación de pozos de extracción en la región del AVT.....	64
Figura 4.5	Diagrama del álgebra de mapas.....	69
Figura 5.1	Isolíneas de abatimiento del nivel del agua subterránea para el periodo 1970-2014.....	72
Figura 5.2	Isolíneas de ritmo de abatimiento para el periodo 2010-2014... ..	75
Figura 5.3	Densidad de pozos de extracción en la región del AVT.....	76
Figura 5.4	Área principal del agrietamiento en la región del AVT	78
Figura 5.5	Principales zonas industriales en la región del AVT.....	79
Figura 5.6	Áreas prioritarias para la recarga artificial en la región del AVT.	80
Figura 5.7	Área de alta prioridad para la recarga artificial.....	82
Figura 5.8	Áreas prioritarias para la recarga artificial en la ZMVT.....	84
Figura 5.9	Áreas prioritarias para la recarga artificial al norte del AVT.....	85

Índice de tablas

Tabla 3.1	Crecimiento de la población por municipio 2000-2010.....	54
Tabla 4.1	Multipiezómetros localizados en el área de estudio.....	61
Tabla 4.2	Valores asignados a las áreas de abatimiento y ritmo de abatimiento.....	66
Tabla 4.3	Reclasificación de la capa de densidad de pozos de extracción...	67
Tabla 4.4	Rangos de clasificación para las áreas prioritarias de recarga artificial.....	67
Tabla 5.1	Abatimiento de los niveles del agua subterránea 1970-2014.....	71
Tabla 5.2	Ritmo de abatimiento de los niveles del agua subterránea.....	74
Tabla 5.3	Clasificación de la densidad de pozos de extracción.....	76

Capítulo 1.

Introducción

El agua subterránea juega un papel fundamental para el desarrollo de las zonas urbanas y rurales, siendo la fuente de abastecimiento para usos agrícolas, público e industrial. En México el 38.7% del agua utilizada proviene de fuentes subterráneas (CONAGUA-SEMARNAT, 2015).

Sin embargo el aumento de la demanda de agua subterránea para dichas actividades, ha incrementado el agotamiento de los niveles piezométricos del agua subterránea, generando otros problemas secundarios como efectos nocivos en la salud de las personas por el cambio de la calidad del agua extraída, mayores costos de extracción, hundimiento del suelo, desaparición de vegetación y manantiales, salinización y erosión del suelo, desequilibrio de ecosistemas lagunares e intrusión de agua salina.

Por tanto, la gestión de los recursos de agua subterránea juega un papel de suma importancia, dado que ésta tiene que equilibrar la explotación de dicho recurso, en términos de cantidad y calidad (Gale, 2005; Tuinhof, *et al*, 2006), además de la integración de estrategias para recuperar los acuíferos sobreexplotados y la aplicación de nuevas tecnologías para preservar e incrementar la reserva de agua subterránea, y vigilar su interacción con el agua superficial.

En este contexto, la recarga artificial es una de las herramientas de gestión del agua subterránea que puede ser útil para atenuar el problema de sobreexplotación

de acuíferos y garantizar el suministro de agua, y en algunos casos mejorar la calidad del agua presente en el acuífero, ya que busca el equilibrio entre las recargas y descargas que sufre el acuífero. Por sí sola no es la solución en situaciones de sobreexplotación de acuíferos, y podría únicamente aumentar las tasas de extracción. Sin embargo, puede tener un importante papel en el “paquete” de medidas de control de la extracción y restablecimiento del balance hídrico subterráneo (Gale, 2005).

Dependiendo de la fuente y calidad de agua, así como de la geología, edafología, e hidrogeología, se han desarrollado una gran variedad de métodos y dispositivos para la recarga artificial de aguas subterráneas (Chenini y Ben, 2010), como lo es la recarga en superficie, aprovechando las características de suelo como filtro natural, recarga directa al acuífero o la combinación entre estas.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo la identificación de áreas prioritarias para la recarga artificial, en el acuífero de Toluca mediante la utilización de criterios hidrogeológicos y la aplicación de Sistemas de Información Geográfica.

1.1 Planteamiento del Problema

En el valle de Toluca, el agua subterránea constituye la principal fuente de agua potable, que en los últimos años ha mostrado una sobreexplotación, así como un deterioro en su calidad (GEM-SMA, 2010).

El área del acuífero del valle de Toluca (AVT) abarca 32 municipios, dando una población total dentro de éste de 2,184,857 habitantes según el censo de población y vivienda 2010 realizado por INEGI, cifra que representa el 13.5% respecto a la población del Estado de México.

La explotación del agua subterránea se realiza mediante pozos de extracción, para el abastecimiento de la demanda urbana, industrial y agrícola dentro de la región del acuífero, conjuntamente se encuentran los volúmenes que se extraen para abastecer a la Ciudad de México, ocasionando la sobreexplotación del acuífero, según el estudio de actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero valle de Toluca (1501), Estado de México, realizado por CONAGUA en 2015, en el AVT se tiene un déficit de -136.726245 millones de metros cúbicos anuales.

La excesiva extracción del agua subterránea en el acuífero del valle de Toluca ha traído consecuencias directas como el abatimiento del nivel piezométrico. Además, de que la extracción intensiva de agua subterránea ha contribuido a la lenta desaparición de los cuerpos de agua superficiales, y como consecuencias indirectas se encuentra el agrietamiento y subsidencia del terreno (afectando viviendas), especialmente en la zona centro del acuífero.

En este marco, la recarga artificial se presenta como una técnica cuyo objetivo principal es incrementar la disponibilidad de agua y mejorar su calidad, para consumo humano y demás actividades, además de minimizar la sobreexplotación de acuíferos.

1.2 Justificación

En las últimas décadas, la expansión de la mancha urbana, el desarrollo de la industria y agricultura han generado una mayor explotación de agua subterránea dentro acuífero del valle de Toluca, reduciendo la disponibilidad del recurso, además de que se han reducido las zonas de recarga natural del acuífero.

Ante esta situación la aplicación de la recarga artificial es una alternativa que se presenta para incrementar la disponibilidad de agua, además de evitar los daños a la infraestructura urbana ocasionados por la subsidencia y agrietamiento del terreno generados por la sobreexplotación del acuífero.

Asimismo, se pretende que sirva como base para futuras investigaciones que sean un complemento a ésta y se llegue a la implementación de dicha técnica para beneficio de toda la sociedad. Disminuyendo los problemas ocasionados por la sobreexplotación y aumentando la disponibilidad de agua para el uso en las diversas actividades.

La presente investigación tiene como fin último la identificación de áreas prioritarias para la recarga artificial del acuífero en el valle Toluca (AVT). En este sentido, la presente investigación pretende realizar la propuesta de áreas prioritarias de recarga artificial retomando criterios hidrogeológicos, que faciliten el manejo integral del recurso agua.

Por último, considerando que las Ciencias Ambientales, a través de un enfoque multidisciplinario, buscan conocer, analizar y comprender el origen de la problemática ambiental y todos los factores que influyen en ella, para poder ofrecer alternativas de solución, a través de la gestión y el ordenamiento de los recursos naturales favoreciendo la armonía de la relación sociedad-naturaleza, se tiene que la propuesta de áreas prioritarias para la recarga artificial en el acuífero del valle de Toluca, busca favorecer la disponibilidad de agua para el desarrollo de cualquier actividad, que permita mejorar la calidad de vida de la población, mejorando las condiciones ambientales de la región.

Hipótesis

El establecimiento de áreas prioritarias de recarga artificial mediante criterios hidrogeológicos, facilitará en conjunto con investigaciones complementarias, la disminución de los daños causados por la sobreexplotación del acuífero del valle de Toluca, lo que favorecerá la disponibilidad de agua para la realización de las diversas actividades.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Identificar áreas prioritarias de recarga artificial en el acuífero del valle de Toluca, empleando criterios hidrogeológicos.

Objetivos particulares

1. Recopilar información disponible sobre el área y la temática de estudio.
2. Describir los atributos climatológicos, geológicos, edafológicos e hidrológicos del acuífero del valle de Toluca.
3. Seleccionar criterios hidrogeológicos que se emplearán para la identificación de las áreas prioritarias de recarga artificial
4. Determinar las áreas prioritarias de recarga artificial mediante el análisis de criterios hidrogeológicos y la aplicación de SIG.

Capítulo 2.

Marco Teórico

2.1 El agua subterránea, importancia y factores que condicionan su presencia

El agua subterránea ofrece funciones y servicios útiles al ser humano y al ambiente, éstas abastecen arroyos, manantiales y humedales; mantienen la estabilidad de la superficie del suelo en zonas donde el terreno es inestable y actúan como un recurso hídrico fundamental para satisfacer nuestras demandas básicas de agua.

Aunque en el mundo hay agua dulce suficiente para todos, los recursos están distribuidos de forma muy desigual en el tiempo y espacio. En muchas regiones, el agua dulce no contaminada es un recurso cada vez más escaso debido a factores como el crecimiento demográfico, la urbanización, la evolución de los modos de vida, el desarrollo económico, la contaminación y el cambio climático (UN-WATER, 2013).

Alrededor del 97,5% del agua de la Tierra está en los océanos, y por lo tanto no es apta para beber (Figura 2.1). El 2,5% de agua dulce en su mayor parte está encerrada en hielo y en aguas subterráneas, dejando tan sólo 0,007% aproximadamente en forma de lagos, ríos, represas y fuentes subterráneas poco profundas, reabastecidos por los procesos de evaporación y precipitación, y fácilmente disponible para uso de los seres humanos (PNUMA, 2008).

El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los satura de agua. Se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y, eventualmente, llegan a los manantiales, los arroyos, lagos y océanos (IMTA, 2009).

La presencia y el movimiento del agua subterránea están condicionados por ciertos factores entre los que se cuentan como más importantes: la forma del terreno, la geología, la presencia o ausencia de vegetación y la precipitación (Maderrey y Jiménez, 2005).

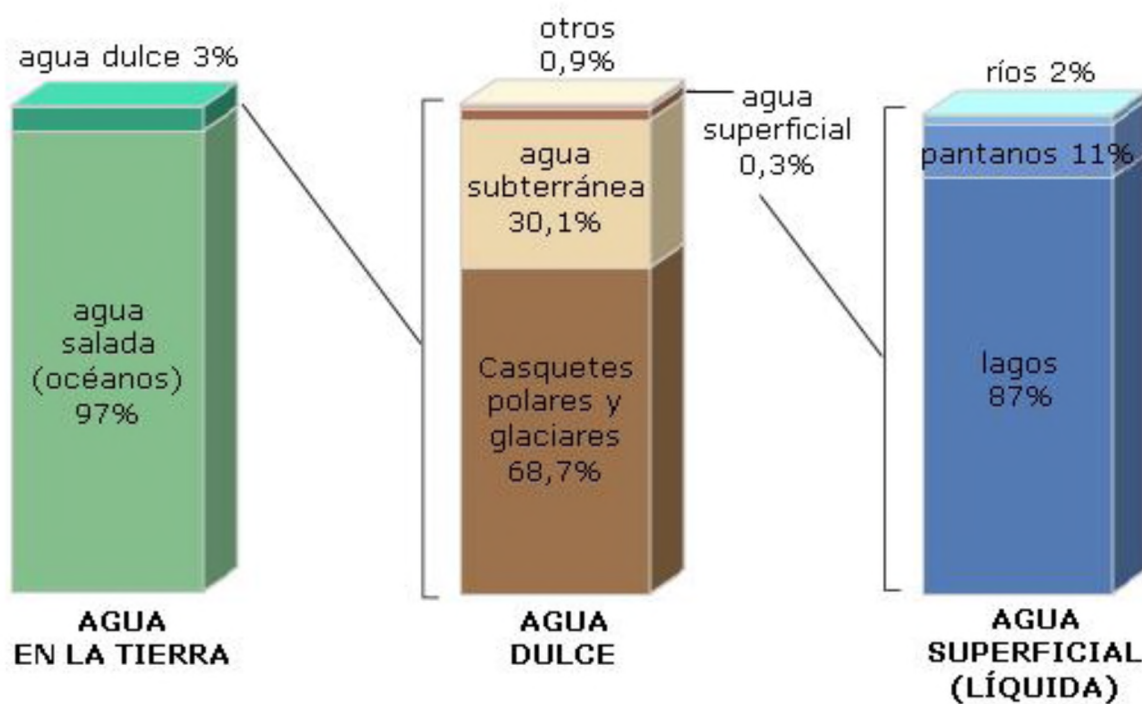


Figura 2.1. Distribución del agua en el Planeta (Gleick, 1993).

El aspecto geológico está relacionado con la velocidad de movimiento del agua infiltrada ya que este dependerá de la estructura y composición litológica de las formaciones. En lo que se refiere a la vegetación está estrechamente relacionada con el suelo ya que las raíces de las plantas y los animales propios del suelo lo agujeran haciéndolo más poroso y dándole así una oportunidad al agua de pasar a través de él, la vegetación puede facilitar la infiltración aún en suelos duros y arcillosos (Maderey y Jiménez, 2005).

La precipitación es el principal factor ya que, la mayor parte del agua del subsuelo proviene de la infiltración de la lluvia. Las zonas lluviosas constituyen, en mayor o menor grado, zonas de alimentación del agua subterránea. Así mismo, la precipitación es muy importante en dos aspectos, en su cantidad y duración.

Además de estos factores, existen dos parámetros básicos que determinan la circulación y almacenamiento del agua subterránea estos son: la porosidad y la permeabilidad (Morrell, *et al*, 2006).

La cantidad de agua subterránea que puede almacenarse depende de la porosidad del material. Se entiende como porosidad el porcentaje del volumen total de roca o de sedimento formado por poros. Los poros son con frecuencia espacios que quedan entre las partículas sedimentarias, pero también son comunes las diaclasas, las fallas, las cavidades formadas por disolución de la roca soluble, como la caliza, y las vesículas (vacíos dejados por los gases que escapan de la lava) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Cuando se mezclan sedimentos de diversos tamaños, la porosidad se reduce porque las partículas más finas tienden a llenar las aperturas entre los granos más grandes. De igual manera la profundidad disminuye la porosidad de las rocas, lo cual se explica por el aumento de la presión y la cementación de los poros en la profundidad.

En los poros de pequeño tamaño el agua está firmemente adherida a las paredes del poro por varios mecanismos, el más importante es la tensión superficial; en

tales poros el agua es retenida contra la acción de la gravedad (“capacidad de retención específica”) y no puede fluir libremente. Por el contrario en los poros de cierto tamaño una parte del agua fluye libremente por gravedad (agua gravitacional), a la porosidad correspondiente al agua gravitacional se le denomina porosidad eficaz, es decir, la porosidad eficaz indica cuánta agua es realmente asequible para su uso (Morrell, *et al*, 2006).

Ahora bien, la permeabilidad se entiende como la capacidad de la roca para permitir la circulación del agua en su seno, asimismo la permeabilidad requiere no sólo que la roca sea porosa sino que los poros estén conectados para permitir el flujo de agua, y deben ser lo bastante grandes para contener “agua gravitacional” (Morrell, *et al*, 2006).

Se puede decir que cualquier roca que tenga capacidad de albergar agua (función capacitiva) y que el agua pueda circular en su seno (función transmisiva), se puede considerar un acuífero.

En un acuífero se puede distinguir una zona superior denominada *zona no saturada* en la que el agua circula preferentemente en sentido vertical descendente y una *zona saturada*, en donde el flujo tiene componente esencialmente horizontal, donde el agua tiende hacia un cauce de corriente, lago o manantial. Se puede pensar en los serpenteos que sigue el agua como el compromiso entre el empuje descendente de la gravedad y la tendencia del agua a moverse hacia zonas de presión reducida (Figura 2.2) (Tarbuck y Lutgens, 2005; Morrell, *et al*, 2006).

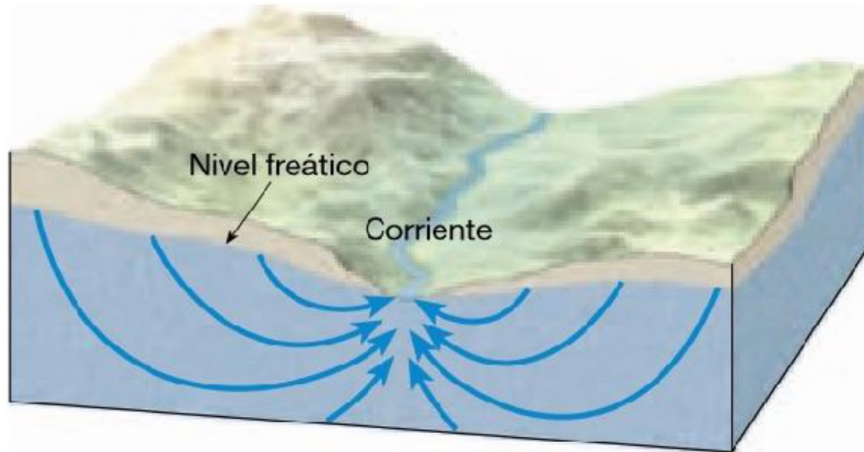


Figura 2.2 Movimiento del agua subterránea (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La separación entre la zona no saturada y la zona saturada se denomina superficie piezométrica que es la superficie libre en la que el agua está sometida a la presión atmosférica. Este esquema descrito corresponde a los denominados acuíferos libres. Si los materiales existentes entre el acuífero y la superficie del terreno son impermeables se dice que el acuífero es confinado. En este caso, no existe zona no saturada y la superficie piezométrica es virtual y se refiere a la altura que alcanzaría el agua en función de la presión a que está sometida (mayor que la atmosférica) (Figura 2.3) (Morrell, *et al*, 2006).

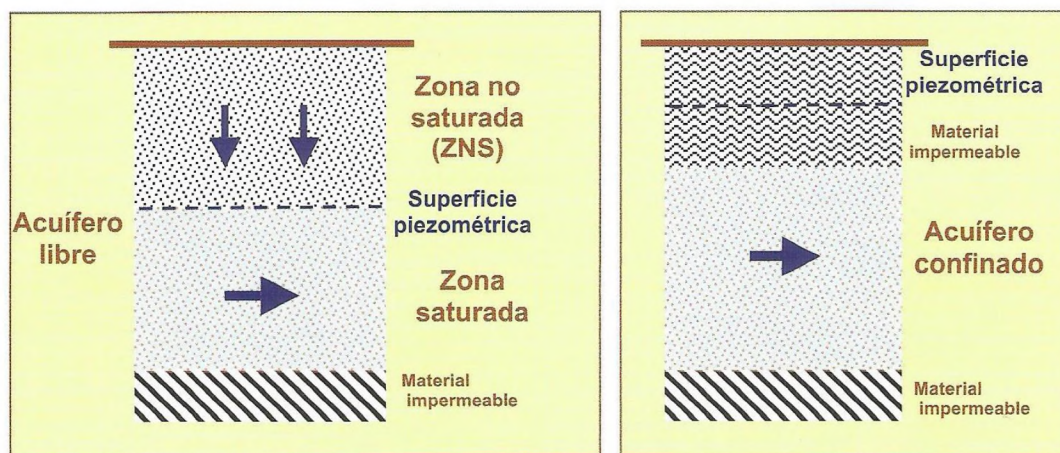


Figura 2.3. Tipos principales de acuíferos en función de la presión (Morrell, *et al*, 2006).

Sin importar el tipo de acuífero, este es un sistema en el que entra y sale agua por diversos mecanismos. Además de la precipitación las entradas de agua, se pueden dar por aportes de acuíferos adyacentes, por infiltración desde un río o lago (Figura 2.4). En conjunto a estas aportaciones se les denomina recarga natural. Por su parte las salidas de agua pueden tener lugar por alimentación lateral de acuíferos adyacentes, por descargas a ríos o manantiales, en el caso de acuíferos costeros por salidas al mar. Cuando las entradas y salidas son del mismo orden se considera que el acuífero está en equilibrio (Morrell, et al, 2006).

Las principales alteraciones a estas entradas y salidas, se dan por la intervención humana, los mecanismos de recarga se pueden modificar a causa de los riegos, cuyos excedentes pueden infiltrarse al acuífero, por impermeabilización de extensas áreas (cambio de uso de suelo) que reduce la recarga. Respecto a las salidas, la alteración humana más significativa son los bombeos (Morrell, et al, 2006). Cuando el bombeo de agua es intensivo, el resultado es una depresión en el nivel piezométrico, de forma aproximadamente cónica, conocida como cono de depresión (Figura 2.5) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La extracción de agua subterránea tiene como beneficio la disponibilidad de este recurso para consumo humano a un bajo costo. De igual manera, el agua subterránea ha ayudado históricamente para el desarrollo de grandes civilizaciones y en la actualidad las grandes ciudades dependen de la extracción de agua subterránea como fuentes de agua potable.

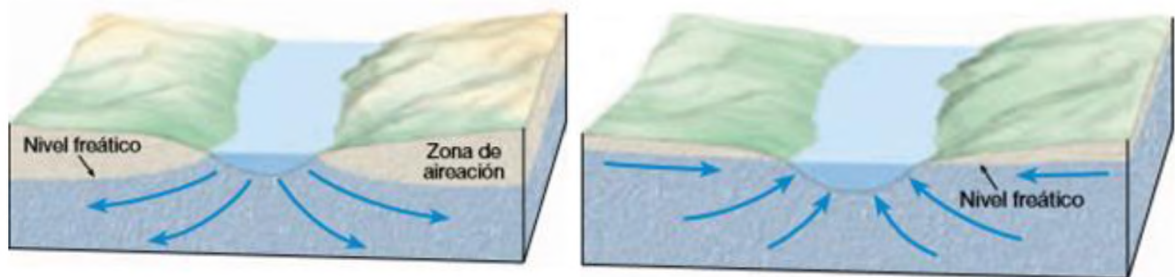


Figura 2.4. Interacción del agua subterránea y agua superficial (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Los sistemas de agua subterránea proporcionan globalmente del 25 al 40% del agua potable en todo el mundo. El agua subterránea representa un enorme recurso que se puede administrar solamente mediante el entendimiento de los diferentes tipos de acuíferos y sus índices de recuperación o recarga (ANC, 2008).

Se prevé que la demanda mundial de extracciones de agua aumente en un 55 % para el 2050, debido a la creciente demanda por parte de la industria, la generación de energía térmica, la agricultura y el uso doméstico (UN-WATER, 2014).

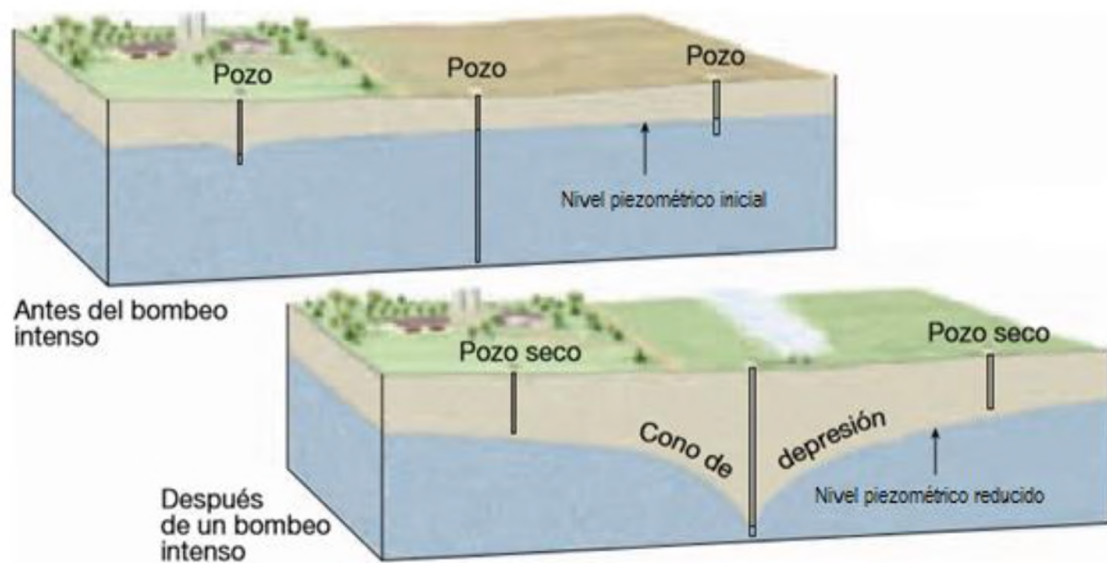


Figura 2.5 Cono de depresión originado por el bombeo intenso (Tarbuck y Lutgens, 2005).

2.2 Problemática del agua subterránea

A diferencia de otros recursos el agua no tiene sustituto en diversas actividades, es por ello que es necesario conocer cual son las principales problemáticas que se deben de enfrentar para poder llegar a una gestión integral y manejo sustentable de este recurso.

Los problemas relacionados con el agua subterránea se pueden agrupar en dos categorías cantidad (disponibilidad) y calidad, los cuales están estrechamente relacionados con el crecimiento poblacional y el desarrollo industrial de los países (OMS, 2014).

La contaminación del agua subterránea es una cuestión seria, en particular en las áreas donde los acuíferos proporcionan una gran parte del suministro de agua. La calidad de agua puede verse comprometida por presencia de agentes infecciosos, productos químicos tóxicos o radiaciones, esto puede deberse a causas naturales o por la actividad humana.

La contaminación natural se da por dos causas: mineralización y la intrusión salina. La primera es el resultado de la interacción del agua subterránea con los minerales presentes en el acuífero, las sustancias más comunes en el agua subterránea son el arsénico y el flúor, producto de la disolución en los sedimentos de partículas de origen volcánico; los carbonatos de sodio y magnesio, provenientes de la disolución de rocas calcáreas y magnésicas; los nitratos y nitritos son producto de la descomposición de plantas y animales (Gutiérrez y Becerra, 2014).

En los acuíferos costeros, el bombeo intensivo induce la intrusión marina, que se define como el proceso de movimiento temporal o permanentemente del agua salada tierra adentro desplazando al agua dulce. Una característica de los acuíferos costeros es la coexistencia de dos fases fisicoquímicas diferentes: agua dulce y agua salada. En este caso, el agua dulce es menos densa que el agua salada, de manera que flota sobre ella y la masa de agua salada adquiere forma

de cuña, apoyada en la base del acuífero y con un vértice dirigido tierra adentro (Morrell, *et al*, 2006).

Cuando se da una extracción intensiva, el agua de mar puede avanzar por dos mecanismos distintos: por avance de la interfase en la horizontal, cuando la extracción cubre una gran área, o por ascenso vertical en puntos de bombeo intensivo (Morrell, *et al*, 2006).

En lo que se refiere a la contaminación antropogénica, esta se deriva de las actividades agropecuarias, urbano-industriales, mineras y nucleares. Cabe agregar que este tipo de contaminación puede dividirse en química y biológica.

Los contaminantes químicos pueden provenir de los drenados de minas, fertilizantes usados en la agricultura, derrames de petróleo, pesticidas, fugas en depósitos de residuos radioactivos. La contaminación biológica comprende microorganismos, que ponen en riesgo la salud de las personas que beben agua extraída de pozos; se produce por el contacto del agua subterránea con agua residual sin tratar, excretas de animales o humanos (Gutiérrez y Becerra, 2014) (Figura 2.6).



Figura 2.6. Contaminación del agua subterránea por aguas fecales (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La subsidencia del terreno puede ser consecuencia de procesos naturales relacionados con el agua subterránea. Sin embargo, el terreno puede hundirse también cuando el agua se bombea desde los pozos más rápidamente de lo que pueden reemplazarla los procesos de recarga natural. Conforme se extrae el agua, la presión del agua desciende y el peso de la sobrecarga se transfiere al sedimento. La mayor presión compacta herméticamente los granos de sedimento y el terreno se hunde (Figura 2.7) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La disponibilidad de agua se relaciona directamente con la extracción de la misma, la principal fuente de explotación de agua subterránea son los pozos. Sin embargo, cuando los pozos están siendo bombeados con mucha intensidad, las salidas de agua superan las entradas, y el volumen de agua almacenada en el acuífero decrece paulatinamente y se establece una situación que se conoce como sobreexplotación, este continuo “vaciado” del acuífero se manifiesta (y puede monitorearse) por el descenso continuo del nivel piezométrico (Figura 2.8), al descender el nivel del agua subterránea, la extracción debe ser a una mayor profundidad aumentando el costo (Morrell, *et al*, 2006). En algunas zonas, la sobreexplotación amenaza la existencia del abastecimiento de agua subterránea.

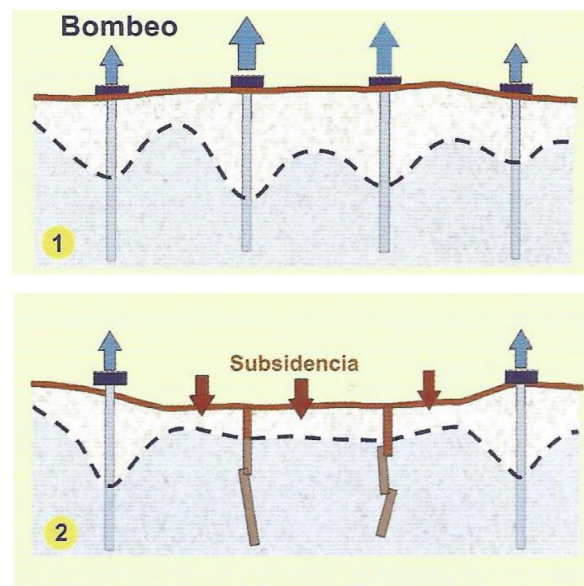


Figura 2.7. Subsidencia del terreno por bombeo intensivo (Morrell, *et al*, 2006).

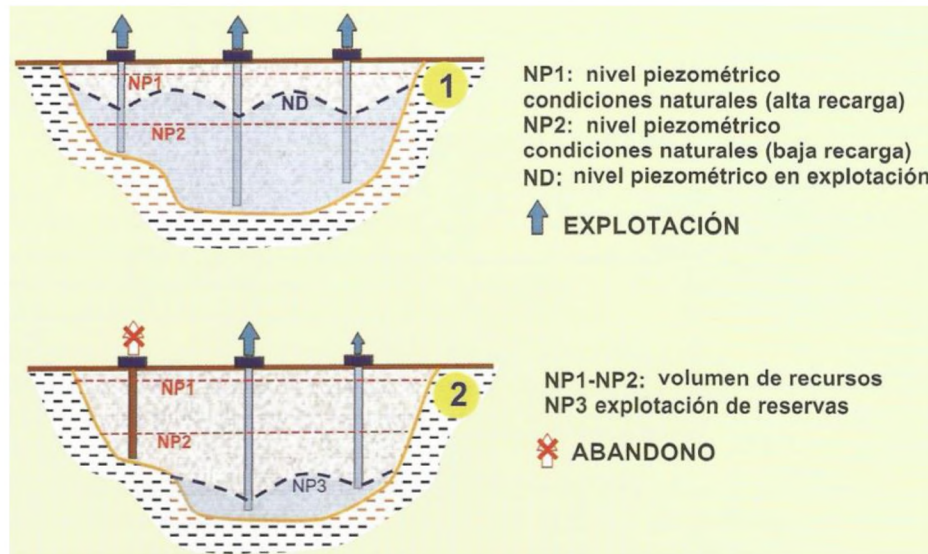


Figura 2.8 Evolución del nivel piezométrico de un acuífero (Morrell, et al, 2006).

Además, la sobreexplotación de acuíferos se presenta como una problemática que afecta tanto la cantidad como calidad del agua. La extracción masiva del recurso hídrico subterráneo tiene distintos efectos que generan diversos problemas tanto ambientales, como económicos y sociales (Carabias, et al, 2005).

Entonces, un acuífero sobreexplotado puede definirse como *“aquel en el que la extracción del agua subterránea es superior al volumen de recarga media anual, de tal forma que la persistencia de esta condición por largos periodos de tiempo puede ocasionar los siguientes impactos ambientales: agotamiento o desaparición de manantiales, lagos, humedales; disminución o desaparición del flujo base en ríos; abatimiento indefinido del nivel del agua subterránea; formación de grietas; asentamientos diferenciales del terreno; intrusión marina en acuíferos costeros; migración de agua de mala calidad”* (CONAGUA, 2014b).

En muchas ocasiones la situación se agrava por el reconocimiento tardío de que se está deteriorando el acuífero, como el agua subterránea no se ve, el problema puede tardar en hacerse evidente.

Desafortunadamente, estos problemas se deben al manejo ineficaz del agua, originados por una administración que no incorpora generalmente el

funcionamiento del agua subterránea dentro del manejo de este recurso y la falta de interés de los usuarios por conocer y preservar un recurso que es parte de su vida diaria (Angeles-Serranoj, *et al*, 2008; Anaya, 2011).

2.3 El agua subterránea en México

El subsuelo mexicano aloja gran número de acuíferos fuentes de agua que funcionan a la vez como vasos de almacenamiento, redes de acueductos y plantas de tratamiento naturales (CONAGUA, 2014).

Anualmente México recibe aproximadamente 1, 449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos (CONAGUA-SEMARNAT, 2015).

En 2014 en México se extraía del subsuelo cerca de 32,906 millones de m³ por año siendo el uso agrícola, (riego de cultivos e incluye el uso para la acuicultura, el pecuario), el principal uso con el 70.4%, posteriormente se encuentra el uso para abastecimiento público con un 22.2% (incluye rubros público urbano y doméstico), la industria autoabastecida con el 6.1% (incluye los rubros industriales, agroindustriales, servicios y comercios) y por último las termoeléctricas utilizan el 1.4% (incluye el volumen total concesionado para generación de energía eléctrica) (Figura 2.9) (CONAGUA-SEMARNAT, 2015).

Para fines de la administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos, de los cuales 106 se encuentran catalogados como sobreexplotados (Figura 2.10), 31 acuíferos con presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la Península de Baja California y en el altiplano mexicano. Además se presenta intrusión marina en 15 acuíferos costeros a nivel nacional (CONAGUA-SEMARNAT, 2015).

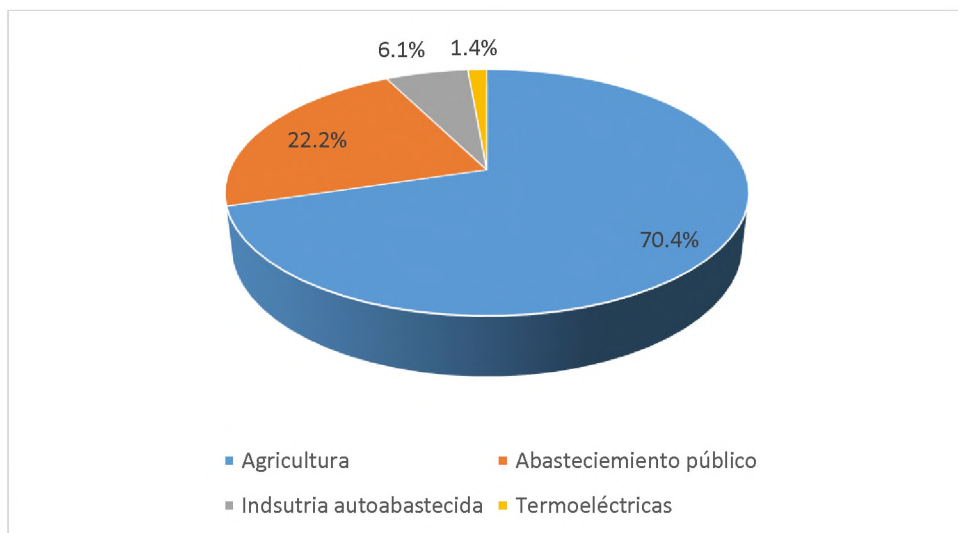


Figura 2.9. Usos del agua subterránea en México (CONAGUA-SEMARNAT, 2015).

Para el Estado de México y la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se tienen identificados nueve acuíferos, de los cuales el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el acuífero de Texcoco, el acuífero de Cuautitlán-Pachuca, el acuífero de Ixtlahuaca-Atlacomulco, el acuífero de Chalco-Amecameca, y el acuífero del valle de Toluca, se encuentra en la categoría de sobreexplotados (Korenfeld y Hernández, 2011).

Ante este contexto, la gestión integral de los recursos hídricos es una respuesta a los problemas de escasez, calidad, saneamiento y acceso al agua. Este enfoque pretende integrar el conocimiento de una diversidad de sistemas que deben considerarse en forma simultánea, bajo distintas disciplinas, concepciones, conocimientos, investigaciones y órganos normativos y de gestión, así como instituciones y usuarios (UNAM, 2013).



Figura 2.10 Acuíferos sobreexplotados en México (CONAGUA, 2015).

Una técnica actualmente utilizada dentro de la gestión integral de los recursos hídricos es la gestión de la recarga de acuíferos, la cual presenta varios beneficios como el aumento de la disponibilidad de agua subterránea, y mejora la calidad de la misma, reduce la intrusión marina, evita procesos de subsidencia en el terreno, aprovecha las características del terreno para mejorar la calidad de agua y el uso de acuíferos como sistemas de conducción de agua (UNAM, 2013). De igual manera es importante resaltar que esta técnica solo permite minimizar los daños causados por la sobreexplotación de acuíferos mas no es la solución al problema.

2.4 Recarga artificial. Conceptualización, clasificación y métodos

La recarga artificial es una técnica utilizada por muchos países, con la finalidad de contar con una mayor disponibilidad de agua para los diferentes usos antropogénicos, evitar la intrusión salina de los acuíferos, aprovechando las capas del suelo como un filtro natural, es decir aumentar la disponibilidad y mejorar la calidad del agua subterránea (Fernández y García, 2009).

La recarga artificial de acuíferos también suele denominarse con los acrónimos “AR” (Artificial Recharge) y “MAR” (Management of Aquifer Recharge) tiene sus orígenes desde la década de los años sesenta. También es conocida con el termino de Gestión de la Recarga de Acuíferos (GAR) (Fernández, 2013).

Para fines de este trabajo de investigación se entenderá a la recarga artificial como el *“conjunto de técnicas hidrogeológicas aplicadas para introducir agua a un acuífero, a través de obras construidas con ese fin”*, definición establecida en la NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, publicada por CONAGUA-SEMARNAT en el 2009.

De acuerdo a la NOM-014-CONAGUA-2003, los tipos de recarga artificial se clasifican en:

- a) Superficial: consiste en la recarga desde la superficie por infiltración en obras como: estanques o piletas de infiltración, inundación del terreno, cauces acondicionados, zanjas, sobrerriego o una combinación de ellas.
- b) Sub-superficial: consiste en la introducción del agua en la zona no saturada mediante pozos secos, zanjas o estanques profundos.
- c) Directo: consiste en la introducción directa del agua al acuífero por medio de pozos cuya sección abierta lo penetran parcial o totalmente.

Métodos de recarga superficial

Estanques o piletas de infiltración: Son uno de los dispositivos de más uso. Estos pueden presentar un gran número de ventajas y utilidades no solo para la recarga artificial, sino para otros usos muy diversos como es el tratamiento y depuración de aguas residuales, combate a los incendios forestales, etc. Los estanques están constituidos por una depresión en el terreno con paredes inclinadas cuyo fondo debe estar lo más nivelado posible para favorecer la infiltración homogénea (Figura 2.11). Requiere de una disponibilidad de suelo con características altamente permeables para favorecer la infiltración (Fernández, *et al*, 2010).

Zanjas de infiltración: Su principal fin es aumentar la infiltración natural. Estas obras de infiltración están principalmente enfocadas a la retención de aguas de escorrentía, aumentando la infiltración natural y además reducen la erosión de laderas. Las zanjas son estructuras excavadas en el terreno, con una morfología lineal (Figura 2.12). Suelen ubicarse siguiendo las curvas de nivel (Díaz, *et al*, 2006 y Fernández, *et al*, 2010).



Figura 2.11 Estanque o pileta de infiltración (Fernández, *et al*, 2010).

Inundación del terreno: Es una antigua forma de gestión de los recursos hídricos muy utilizados en zonas áridas y semiáridas. Para la implementación de estos sistemas suele ser necesario disponer de extensas llanuras de fondos planos y permeables (llanuras aluviales) en las que llevar a cabo la inundación. (Figura 2.13). Es recomendable rodear las llanuras con zanjas de infiltración que eviten la inundación de zonas no deseadas. La principal ventaja es su bajo costo de construcción y mantenimiento (Díaz, *et al.*, 2006 y Fernández, *et al.*, 2010).

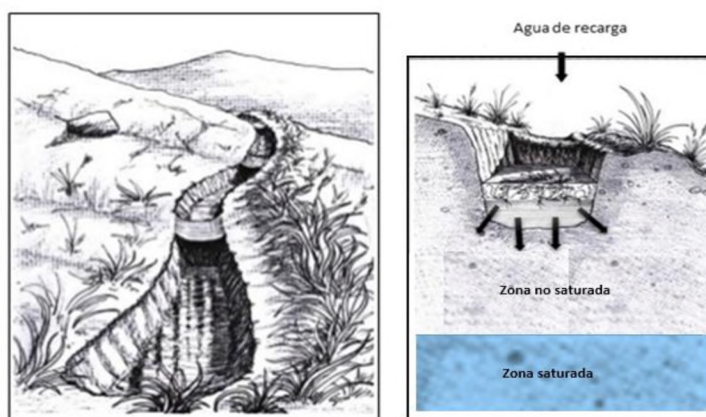


Figura 2.12 Zanjas de infiltración

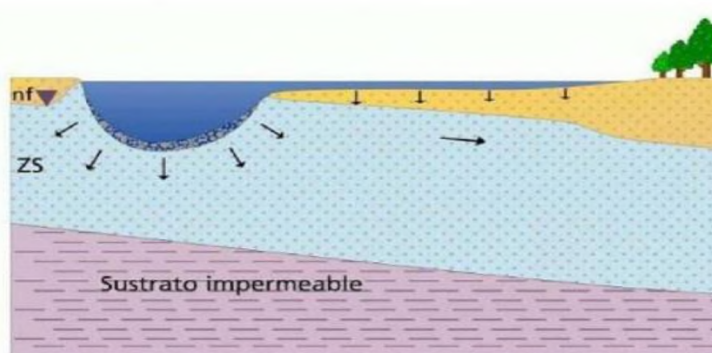


Figura 2.13 Recarga por inundación del terreno (Fernández, *et al.*, 2010)

Sobreriego: Históricamente el exceso de agua de riego en campos de cultivo ha causado numerosos problemas, sin embargo cuando este exceso de riego está controlado y gestionado correctamente puede convertirse en una técnica de recarga artificial de acuíferos (Figura 2.14) (Fernández, *et al*, 2010).

Cauces acondicionados: Consiste en una alteración en el lecho del río para disminuir la velocidad del flujo y aumentar la infiltración natural. La escarificación es un tipo de acondicionamiento de cauces donde el propósito es limpiar el lecho del río, eliminando los sedimentos finos para mejorar la infiltración (Figura 2.15) (Fernández, *et al*, 2010 y Mendoza, 2012). La filtración inducida en las márgenes de los ríos es una opción comúnmente empleada, aunque por lo general el objetivo principal es mejorar la calidad de agua, más que el almacenamiento.

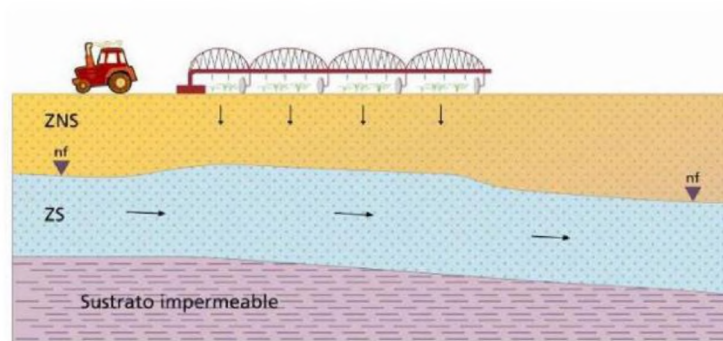


Figura 2.14 Recarga de acuíferos por sobreriego (Fernández, *et al*, 2010)



Figura 2.15 Escarificación del lecho del río (Fernández, *et al*, 2010).

Métodos subsuperficiales

Pozos secos (pozos de infiltración o absorción): Son utilizados cuando existen capas superficiales de baja permeabilidad (Figura 2.16). Su principal ventaja es su poca ocupación de terreno. Estos pozos, en algunos lugares del mundo, están diseñados para el desplazamiento temporal de agua como la que se produce en temporada de lluvias. Es aconsejable rellenar el pozo con gravillas y arenas gruesas para favorecer la infiltración y reducir los costes de mantenimiento en caso de obstrucción (Díaz, *et al.*, 2006; Fernández, *et al.*, 2010 y Mendoza, 2012). La profundidad de estos depende de la permeabilidad y del espesor de los estratos de baja permeabilidad que recubren a la formación que se pretende recargar.

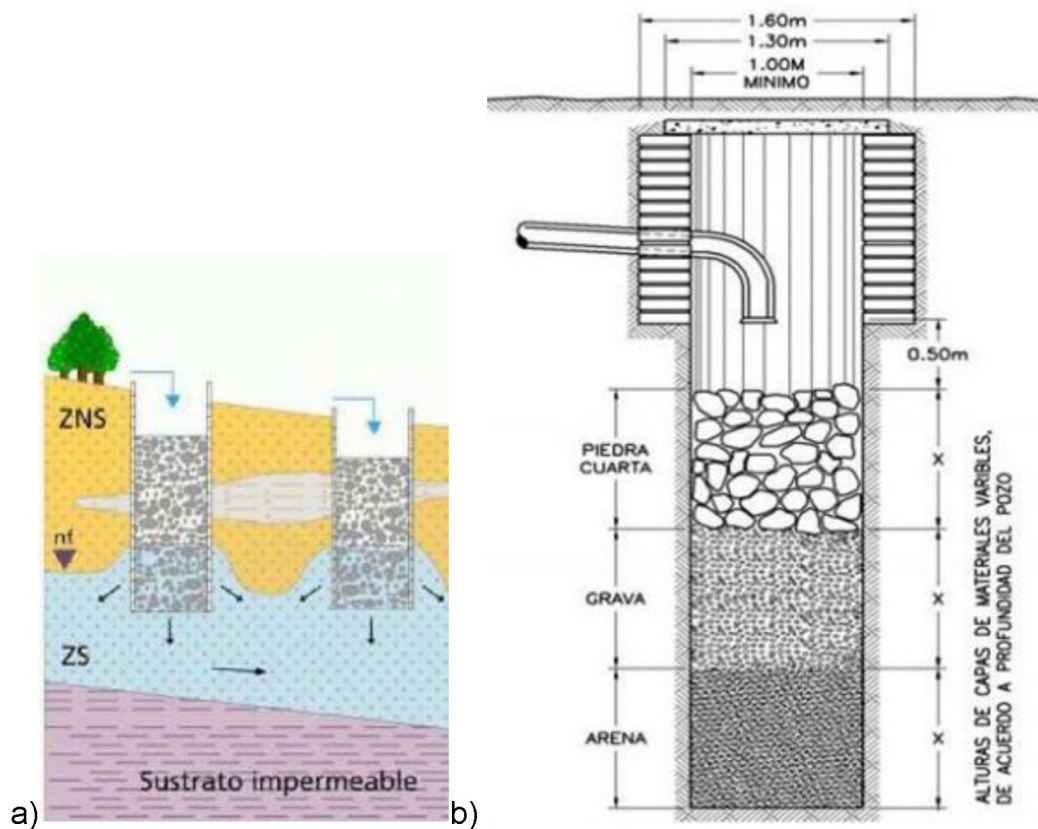


Figura 2.16. a) Esquema de un pozo absorción, b) Diseño de un pozo de absorción

Métodos de recarga directa

Pozos profundos. Son sistemas donde el objetivo es la inyección directa del agua en el acuífero, de igual manera son utilizados o recomendados en terrenos donde se dispone de poco espacio para la realización de técnicas de recarga superficial y también donde el suelo no presente las condiciones óptimas para favorecer la recarga (Figura 2.117). Al ser una inyección directa al acuífero, el factor más importante a considerar es la calidad de agua que se va a recargar (Fernández, *et al*, 2010 y Mendoza, 2012).

Para complementar la clasificación enlistada, se tienen que para los métodos de recarga artificial del tipo superficial los principales problemas que presenta son las pérdidas por evaporación del agua y la necesidad de acondicionamiento previo del terreno. En lo que se refiere a la recarga sub-superficial, ésta se utiliza especialmente cuando un nivel semipermeable separa el acuífero de la superficie del terreno. Por último la recarga directa busca combinar las ventajas de los sistemas anteriores, fácil mantenimiento, grandes áreas de infiltración, proceso de depuración durante la infiltración, con el acceso a acuíferos profundos y mínima ocupación de espacio, su principal desventaja es el alto costo de construcción (Díaz, *et al*, 2006).

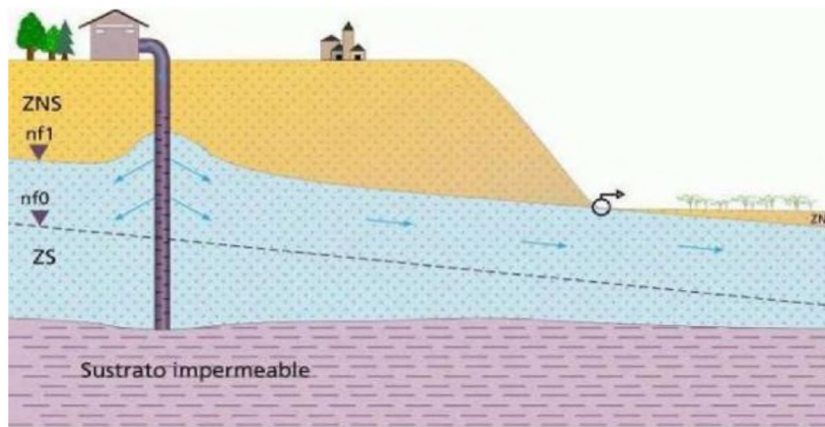


Figura 2.17 Esquema de un pozo profundo (Fernández, *et al*, 2010).

De acuerdo a la NOM-014-CONAGUA, el agua recargada como consecuencia de las actividades humanas, como riego de jardines, fugas de agua en redes de distribución y alcantarillado, descargas de fosas sépticas e infiltraciones en canales de tierra, es conocida como recarga incidental, ya que no cuenta con la infraestructura específica y en algunos casos no cuenta con las condiciones idóneas de calidad establecidas para la recarga artificial.

Autores como Carabias (2005) y Fernández (2010) mencionan que entre los objetivos de la aplicación de la recarga se encuentran la reducción de los efectos de la sobreexplotación, tales como el abatimiento de los niveles del agua, asentamientos del terreno o intrusión salina; así como dar tratamiento natural al agua en el subsuelo; manejar los acuíferos como vasos de almacenamiento y regulación, y utilizar el subsuelo como una red natural de acueductos.

En este contexto es importante destacar que la recarga artificial es solo una herramienta que funciona como ayuda para disminuir los efectos de la extracción intensiva de agua subterránea, mas no es la solución al problema (CONAGUA, 2009, Fernández, 2010 y Mendoza, 2012).

Entre las fuentes más comunes a considerar para la recarga artificial se encuentran las aguas provenientes de precipitaciones colectadas en instalaciones urbanas, los escurrimientos extraordinarios generados por lluvias torrenciales, el agua superficial regulada en presas de almacenamiento y las aguas residuales de las zonas urbanas-industriales. Según Carabias (2005) éstas últimas constituyen un cuantioso recurso potencial para recarga, por su permanencia y magnitud creciente, aunque en gran parte ya son utilizadas con fines agrícolas, en la mayoría de los casos sin tratamiento alguno.

Cada tipo o método de recarga es aplicable a una combinación de factores físicos, hidrogeológicos, ambientales y económicos, que deben ser evaluados en cada área donde se pretende realizar algún trabajo de recarga artificial (CONAGUA, 2009). Toda actuación de recarga artificial de acuíferos debe llevar su correspondiente Estudio de Impacto y Riesgo Ambiental, en el que se especifiquen

con detalle los impactos que se ocasionarán en cada una de las fases de la recarga artificial, como por ejemplo los impactos sobre la calidad las aguas subterráneas (Fernández y Cordero, 2006).

Como rasgo común de todos los proyectos de recarga, se tiene que la colmatación representa el principal problema técnico hallado a la hora de desarrollar proyectos de recarga artificial en todo el mundo (Fernández y García, 2009). La colmatación, minimiza de forma drástica la capacidad de infiltración de medios porosos en periodos de tiempo cortos (Fernández, 2013).

Los tipos de colmatación que se pueden presentar son (Perez-Paricio, 2000):

- a) Física: se traduce en la disminución de la porosidad mediante la distribución en el medio receptor de partículas coloidales intermedias o largas.
- b) Biológica: estos mecanismo de colmatación pueden ser por acumulación de celdas en los poros del acuífero, acumulación de precipitados insolubles, por producción de polímeros extracelulares.
- c) Química: en ocasiones las reacciones químicas entre el agua de recarga y el agua subterránea pueden producir la precipitación de fases minerales, ocasionando las perdida de porosidad.

2.5 La recarga artificial de acuíferos en el marco de la gestión integral de los recursos hídricos

La sustentabilidad representa un cambio de paradigma en el manejo y aplicación de los recursos. Hasta ahora se ha buscado la rentabilidad como guía de las actividades productivas, sin embargo en la sustentabilidad los proyectos no sólo deben ser rentables sino también ser incluyentes y por lo tanto se requiere repensar toda nuestra actividad económica y tecnológica (Monrroy, 2013).

De esta manera, la sustentabilidad del agua pasa por la conservación de sus fuentes, la lluvia, acuíferos, lagos y ríos, los bosques, la energía para manejarla, la agricultura, la ganadería y por tanto por la alimentación, por la urbanización y por

la industria. No se puede seguir usando el agua como si fuera un recurso renovable e inagotable pues mediante el ciclo natural ya no se renueva a la velocidad que se requiere (UNAM, 2013).

Una gestión correcta de los recursos hídricos debe equilibrar las distintas necesidades y prioridades de los diferentes ámbitos, incluyendo la participación efectiva de los distintos actores (UN-WATER, 2013).

En este contexto, la recarga artificial surge como una herramienta que ayuda al cumplimiento de los objetivos dentro de la gestión integral de los recursos hídricos, dicho enfoque debe tener una estrategia integral que incluye, entre otros aspectos: el manejo de la demanda en todos los sectores (conservación y uso eficiente), el reúso, la participación más activa de los usuarios en la gestión del agua, el diseño de estrategias para la estabilización de acuíferos sobreexplotados y la aplicación de la tecnología de la recarga artificial para preservar e incrementar la reserva de agua subterránea. Todo con la finalidad de explotar todo el potencial de la recarga artificial, para obtener un mejor resultado en su ejecución (Carabias, 2005, Fernández, 2010 y UNAM, 2013).

2.6 Factores que influyen en la recarga artificial

La aplicación de un sistema de recarga artificial en un sitio determinado depende de las condiciones geológicas, hidrológicas, ambientales, económicas e incluso sociales del sitio. Los principales factores a considerar son (Gale, 2005; Díaz, *et al*, 2006; Fernández, 2010; Mendoza, 2012):

a) Características del acuífero

En un principio, cualquier acuífero es susceptible de ser utilizado para recarga artificial. La elección del sistema de recarga artificial dependerá de si el acuífero es libre o confinado. Además están los parámetros físico-químicos como: profundidad de las aguas subterráneas, grado de confinamiento, permeabilidad, conductividad

hidráulica, capacidad de almacenamiento, gradiente hidráulica, mineralogía del acuífero y calidad del agua del acuífero.

Además, los acuíferos catalogados como sobreexplotados tendrán prioridad para la aplicación de la recarga artificial, esto con la finalidad de disminuir los efectos causados por la sobreexplotación.

b) Agua de recarga (fuente, calidad y cantidad)

Agua superficial: Si las condiciones climáticas lo permiten esta puede ser una fuente significativa. En áreas con presencia de ríos perennes, estos escurrimientos pueden ser desviados a instalaciones de recarga. También puede emplearse la infiltración directa en el lecho del río, no obstante, el agua de los ríos puede tener cantidades considerables de limo en suspensión, dicho material puede provocar obstrucciones en las instalaciones de recarga si el agua de río se utiliza directamente. Es por esto, que muchas veces se utilizan estanques de sedimentación antes de que el agua entre en los estanques de infiltración.

Respecto a los lagos, en caso de no existir contaminación por descarga de residuos o escorrentía agrícola, y eutrofización, el agua podría ser utilizada directamente sin tratamiento previo.

Escorrentía de tormenta (agua pluvial): al ser una fuente poco predecible es más recomendable para estanques de infiltración y retención de agua de tormenta, áreas con pasturas, pavimentos porosos y humedales. En las áreas urbanas al implementar sistemas de captación y posterior recarga se evitan las inundaciones generadas por las grandes cantidades escurrimientos.

La calidad de esta agua es muy variable, suelen encontrarse desde contaminantes provenientes de la atmósfera, de la acumulación de contaminantes en las calles, de las actividades antropogénicas, escorrentía industrial, desechos animales, vegetación en descomposición, materia fecal, productos químicos aplicados en césped y jardines. La carga de contaminantes más alta puede observarse en la

“primera descarga”, la cual debería ser eliminada como desecho para mejorar la calidad del agua de recarga, el agua pluvial de mejor calidad es la proveniente de los techos.

Agua reciclada: Utilizar agua reciclada para la recarga implica tener una fuente de volumen predecible y de calidad constante, pero inferior. El agua residual requiere tratamiento antes de ser considerada de calidad aceptable para la recarga de acuíferos. Los compuestos que representan un riesgo dependen del origen del agua residual (industrial o doméstica). Por lo general, con este tipo de fuente los sistemas de recarga en superficie son lo más utilizados.

Agua potable: este tipo de fuente es usado principalmente cuando se pretende mejorar la calidad del agua del acuífero.

El método de recarga elegido también está en función de la calidad del agua, ya que si se tiene una buena calidad de agua, el método utilizado podrá ser a profundidad y en el caso contrario se pueden utilizar las capas del suelo como medio filtrante. De igual manera, la calidad del agua a utilizar es un factor importante ya que puede ser un importante foco de contaminación al acuífero receptor o en su caso puede ayudar a mejorar la calidad del agua presente en el acuífero.

c) Disponibilidad y características del terreno

Son los mismos factores que se consideran para la recarga natural del acuífero, siendo los más importantes la precipitación (intensidad y duración, en caso de ser la fuente de recarga), la forma del terreno (pendientes pronunciadas), permeabilidad del terreno, la vegetación (altera el comportamiento del suelo con el agua) y las zonas urbanas (baja disponibilidad de terreno).

d) Uso del agua extraída

Implica factores como la cercanía del punto de extracción al sitio de recarga, así como el tiempo de reposo en el acuífero. Lo ideal es que el agua recargada al

momento de ser extraída pueda ser utilizada para los diversos usos (agrícola, abastecimiento público, abastecimiento industrial), sin embargo el uso que se le dé dependerá de la calidad que tenga al momento de extraerla.

2.7 La recarga artificial de acuífero en el ámbito global y local

Alrededor del mundo se han efectuado grandes proyectos de recarga artificial, tanto someras como profundas; sin embargo cada proyecto es diferente y ha tenido dificultades diferentes en su operación, por lo que se le considera único (Mendoza, 2012).

Los países que más han aplicado esta técnica para tener una mayor disponibilidad de agua subterránea y mejorar su calidad son los países europeos como Alemania, Dinamarca, Australia, Reino Unido, Francia, Holanda y Suecia.

En Japón, Irán, Kuwait, Omán, Israel, Egipto, Marruecos, Túnez, Argelia, Sudáfrica, Senegal, Australia, México, Cuba y Argentina, también se utiliza o se ha utilizado la técnica de la recarga artificial de acuíferos con el propósito de lograr una gestión más racional de la potencialidad hídrica de una determinada cuenca hidrográfica. En cada uno de estos países el método y la fuente de agua empleada en la operación de recarga artificial varía en función de las peculiaridades concretas que rodean a cada experiencia (Fernández, 2005).

En el continente americano el país que tiene un mayor avance en la AR es Estados Unidos, esto es principalmente en estados donde la disponibilidad de agua es escasa como Texas, Arizona y California (Sahuquillo, 2009).

En México, donde se tiene más antecedentes directos sobre el manejo de recarga artificial son las regiones como: San Luis Río Colorado, la Región Lagunera, San Luis Potosí, el valle de México y los valles Centrales de Oaxaca (Mendoza, 2012, UNAM, 2013).

En octubre de 1981 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, conjunto a la Comisión del Lago de Texcoco, hicieron un estudio preliminar sobre el

Tratamiento y Reúso de Agua Residual en el Área del Ex Lago de Texcoco; en el cual con base al programa “Proyecto Texcoco” elaborado por el Dr. Nabor Carrillo, con el objeto de reabastecer al acuífero por medio de un método de recarga a profundidad, lo cual implica, tener agua de una calidad aceptable para no contaminar al acuífero y que pueda permitir su posterior uso como suministro de agua potable. El experimento de recarga mediante inyección fracasó por la baja permeabilidad del suelo. (Mendoza, 2012).

Para el año 1991 la Dirección de Construcción y Operación Hidráulica–Secretaría General de Obras (ahora Sistema de Aguas de la Ciudad de México), realizó estudios geológicos y geohidrológicos del acuífero del valle de México, permitiendo la identificación de 82 pozos como sitios posibles, de ellos, se seleccionó el pozo San Luis 15 que puede permitir una recarga de 75 l/s que corresponde al gasto de operación de la planta. El agua para recarga proviene de la planta de San Luis Tlaxialtemalco, la cual se trata a nivel terciario y cumple con las normas para inyección. Además se realizaron experimentos a pequeña escala para definir el grado de colmatación o taponamiento de los pozos durante la recarga, bajo diferentes gastos de inyección y en diferentes litologías (Leyva, 2010).

En el año 2000, se puso en marcha un proyecto piloto de recarga de acuíferos en la Comarca Lagunera, una zona agrícola importante para el país. Se estima que la extracción es por lo menos tres veces mayor que la recarga, lo que resulta en una disminución significativa de la superficie piezométrica y un deterioro de la calidad del agua subterránea. El plan piloto utilizó una cuenca de recarga arenosa en las proximidades del Río Nazas, en Torreón con una capacidad de 197,000 m³. Se implementaron sistemas de abastecimiento para transportar el agua de la represa Zarco, por medio del canal de riego Sacramento, a la cuenca de recarga. De esta manera y con el monitoreo constante se observó que en las pruebas realizadas, un volumen de 5,200 m³ fue transportado e inyectado de los cuales 200 m³ de agua se evaporó y 5,000 m³ fueron infiltrados a la sub-superficie. La capacidad de

infiltración disminuyó de 2.4 m/d a 0.116 m/d debido a la colmatación producida (Gale, 2005).

En el año del 2005 se plantearon algunos proyectos, en Xochimilco (Ciudad de México) se construyeron tres pozos de absorción y 17 estructuras de captación de agua pluvial. Las características de estos pozos de absorción son: su capacidad de almacenamiento de 35 mil litros, evita los encharcamientos en las vialidades, aprovechamiento del agua para que se infiltre en el subsuelo, recargando a los acuíferos, poniéndolos en equilibrio. Los pozos de absorción se construyeron haciendo tres perforaciones entre 30 y 50 metros de profundidad (Mendoza, 2012).

En el 2011 el Instituto de Geología de la UNAM realizó una caracterización hidrogeológica para seleccionar sitios ideales para realizar recarga mediante inyección directa, dicho estudio recomienda dos lugares para llevar a cabo un experimento piloto de recarga en la zona poniente cercana al Lago Nabor Carrillo, dicho estudio también estima tiempos de avance del agua inyectada al acuífero (Álvarez et al., 2011).

El gobierno de Sonora en coordinación con el gobierno de Estados Unidos se estableció una planta de tratamiento en San Luis Rio Colorado, cuyo efluente, el agua residual tratada, se infiltra al acuífero mediante estanques o lagunas de recarga superficial a cielo abierto, para acrecentar el nivel del agua subterránea y al mismo tiempo generar la gestión sustentable de los recursos hídricos (Cháves, 2011).

El gobierno del Estado de México, a través de la Comisión del Agua del Estado de México, con la finalidad de iniciar las acciones necesarias para la recarga artificial del acuífero del valle de Toluca, construyó la planta piloto Toluca Norte que recarga 20 lt/s de manera directa al acuífero (Korenfeld y Hernández, 2011).

En junio de 2014 se realizó la entrega de permisos en el país para la perforación de pozos que serán utilizados para la prueba piloto para el proyecto de inyección de agua al acuífero del valle de Aguascalientes.

Se tiene conocimiento de la existencia de una serie de pozos de infiltración en el campus de Ciudad Universitaria de la UNAM, esta es una serie de pozos que absorben por gravedad un gran volumen de agua de origen pluvial que escurren sobre canales diseñados para tal acción. Estas acciones están bajo la dirección y supervisión de PUMAGUA (PUMAGUA, 2016)

2.8 Contexto legal en México sobre la recarga artificial

Con la creciente sobreexplotación de los acuíferos, surgió la necesidad de implementar técnicas que ayudaran en la prevención de los efectos causados, es por esto que en 2009 la Comisión Nacional del Agua (CNA, CONAGUA), establece normas que regulan la condiciones que debe tener el agua a infiltrar y la infraestructura que debe ser utilizada, en los diferentes tipos de recarga.

Parte importante para realizar trabajos de recarga artificial es el conocer la condiciones o restricciones que se tienen para realizar éstos, es por ello que es necesario llevar a cabo una descripción general sobre las normas mexicanas existentes sobre el tema.

La ley fundamental que se toma en cuenta para realizar cualquier norma sobre agua es la Ley de Aguas Nacionales, la cual en su artículo 7 IV establece que *“es de uso público el restablecimiento del equilibrio hidrológico de las aguas nacionales, superficiales o del subsuelo, incluidas las limitaciones de extracción en zonas reglamentadas, las vedas, las reservas y el cambio en el uso del agua para destinarlo al uso doméstico y al público urbano; la recarga artificial de acuíferos, así como la disposición de agua al suelo y subsuelo, acorde con la normatividad vigente”*.

Por lo tanto, la realización de estudios que se enfoquen al restablecimiento del equilibrio hidrológico está dentro de lo que se especifica en la Ley de Aguas Nacionales.

Así mismo, la CONAGUA, quien es el órgano regulador a nivel nacional de las cuestiones del agua, basada en lo anterior en 2009 emitió dos normas oficiales mexicanas (NOMs); donde se establece el porque es necesario la realización de trabajos encaminados a la recarga de acuíferos.

La NOM-015-CONAGUA-2007 establece en sus objetivos el aprovechamiento del agua pluvial y de los escurrimientos para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la recarga artificial, por su parte la NOM-014-CONAGUA-2003 establece los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, en esta los parámetros relevantes para su cumplimiento son la cantidad de nitrógeno amoniacal y el carbono orgánico total.

En ambas normas el objetivo primordial es la protección de los acuíferos y el incremento de la disponibilidad del agua subterránea de buena calidad, además de cuidar por el bienestar de la salud pública, dado que gran parte del agua extraída de los acuíferos es para consumo humano.

Las NOM 014 y 015 son de aplicación para todo el país, para todos los municipios usuarios, para los desarrolladores de zonas habitacionales, para los centros comerciales.

Las normas antes mencionadas regulan el uso de las aguas residuales en la recarga artificial de acuíferos, y consideran al suelo y subsuelo como una planta de tratamiento natural que puede ser aprovechada con una combinación adecuada de pretratamiento y/o postratamiento natural, compatible con el método de recarga y con el uso que se le pretenda dar al agua recuperada. Por lo tanto, la realización de un trabajo sobre recarga artificial de acuíferos debe considerar cada uno de los criterios establecido en las normas, con el fin de evitar el rechazo de proyectos de esta índole.

Capítulo 3.

Descripción y generalidades del acuífero del valle de Toluca

3.1 Ubicación Geográfica

El acuífero del valle de Toluca (AVT) se localiza en el Estado de México, dentro de la Cuenca Alta del río Lerma; situado al Sur del Altiplano Mexicano, limita al Norte con el acuífero Atlacomulco-Ixtlahuaca, al Sur con el Cerro de Tenango, al Sur-Poniente con el Volcán Nevado de Toluca, al Sur Oriente con el Cerro la Corona y al Oriente con la Sierra de las Cruces y Monte Alto (Figura 3.1). El AVT cubre un área total aproximada de 2,768 km², con una altitud máxima de 4,680 msnm correspondiente al Nevado de Toluca y una altitud promedio de 2600 msnm, en el resto del valle. Territorialmente pertenece a la Región Hidrológica 12 Lerma-Chapala-Santiago, subregión Alto Lerma (CONAGUA-GTZ, 2008).

Es importante mencionar que el límite utilizado para este trabajo es el límite físico o natural, dado que se tiene presente que existe una relación directa entre agua superficial y agua subterránea, lo anterior facilitará la integración de los resultados obtenidos en esta tesis a futuros trabajos de hidrología superficial.

Los municipios que tienen parte o se encuentran totalmente dentro de la región del acuífero del valle de Toluca son 32: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Huixquilucan, Ixtlahuaca, Isidro Fabela, Jiquipilco, Jilotzingo, Jalatlaco, Joquicingo (parcial), Lerma, Metepec,

Mexicalcingo, Nicolás Romero, Ocoyoacac, Ocuilan, Otzolotepec, Naucalpan de Juárez, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle (parcial), Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Villa Victoria, Xonacatlán (parcial), y Zinacantepec (Figura 3.2).

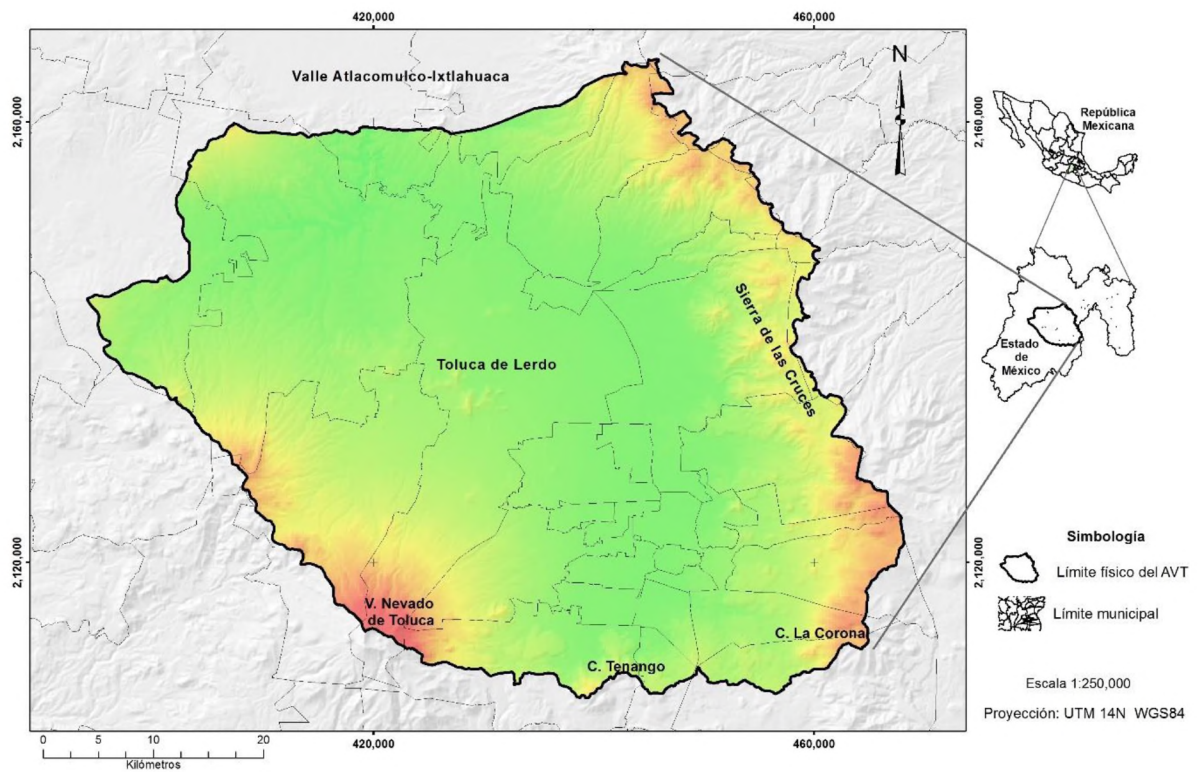


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

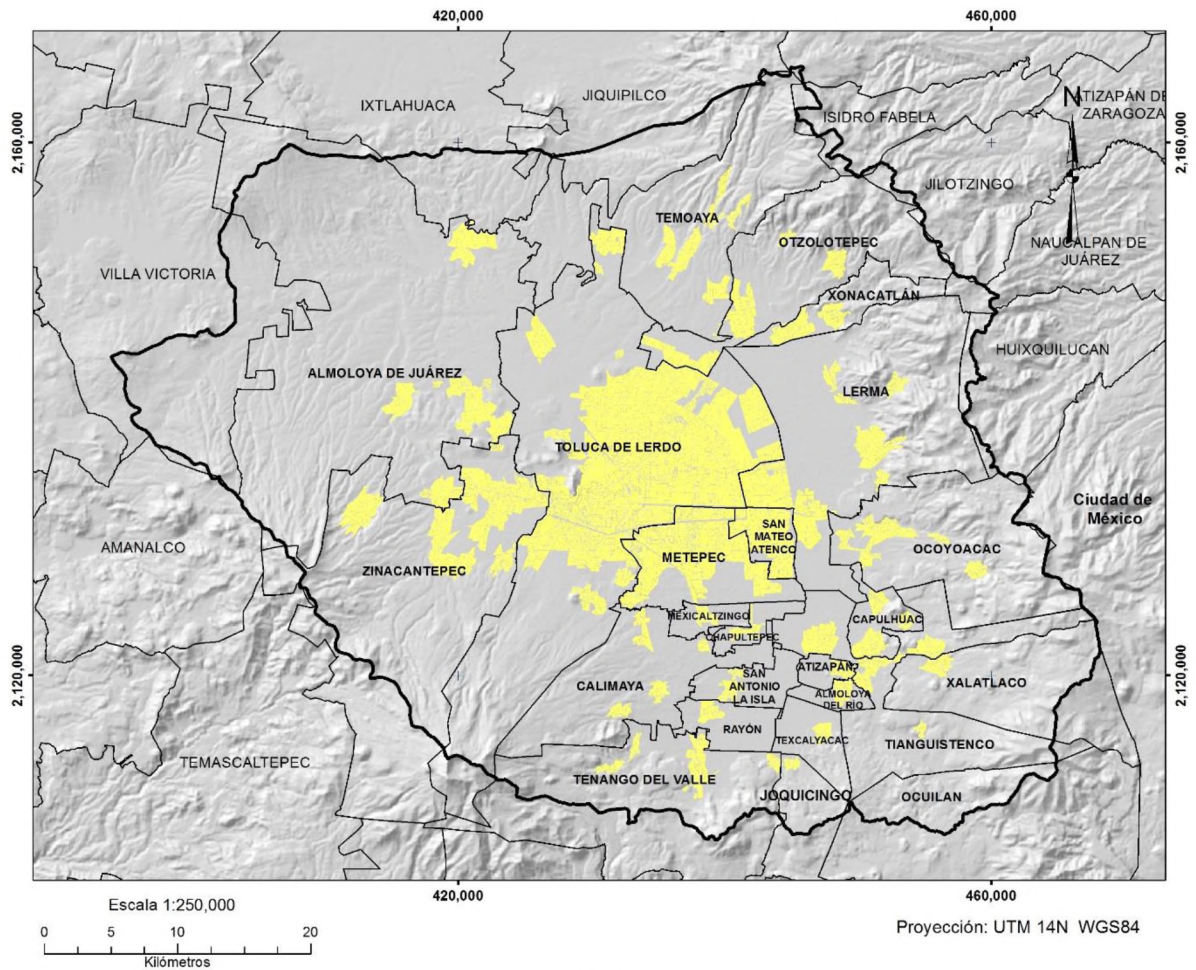


Figura 3.2. Municipios localizados en la región del acuífero del valle de Toluca.

3.2 Climatología

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1981), el clima en la región del valle de Toluca se clasifica como templado subhúmedo (C (w2) (w)), con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5 mm mensuales. En la zona noreste, que incluye las Sierra de las Cruces y las estribaciones del Nevado de Toluca se presenta un clima semifrío subhúmedo (C (E) (w2)) con lluvias de verano, con un porcentaje de precipitación invernal entre 5

mm y 10.2 mm. Mientras que en la zona más alta del área (Nevado de Toluca), se define como un clima altamente frío (E (T) H) (Figura 3.3) (CONAGUA, 2009).

La precipitación promedio de la cuenca según CONAGUA-GTZ (2008), se estima en 844 mm anuales, presentándose valores de hasta 1,200 mm anuales en las partes altas de las montañas así como un decremento hacia su porción noroccidental.

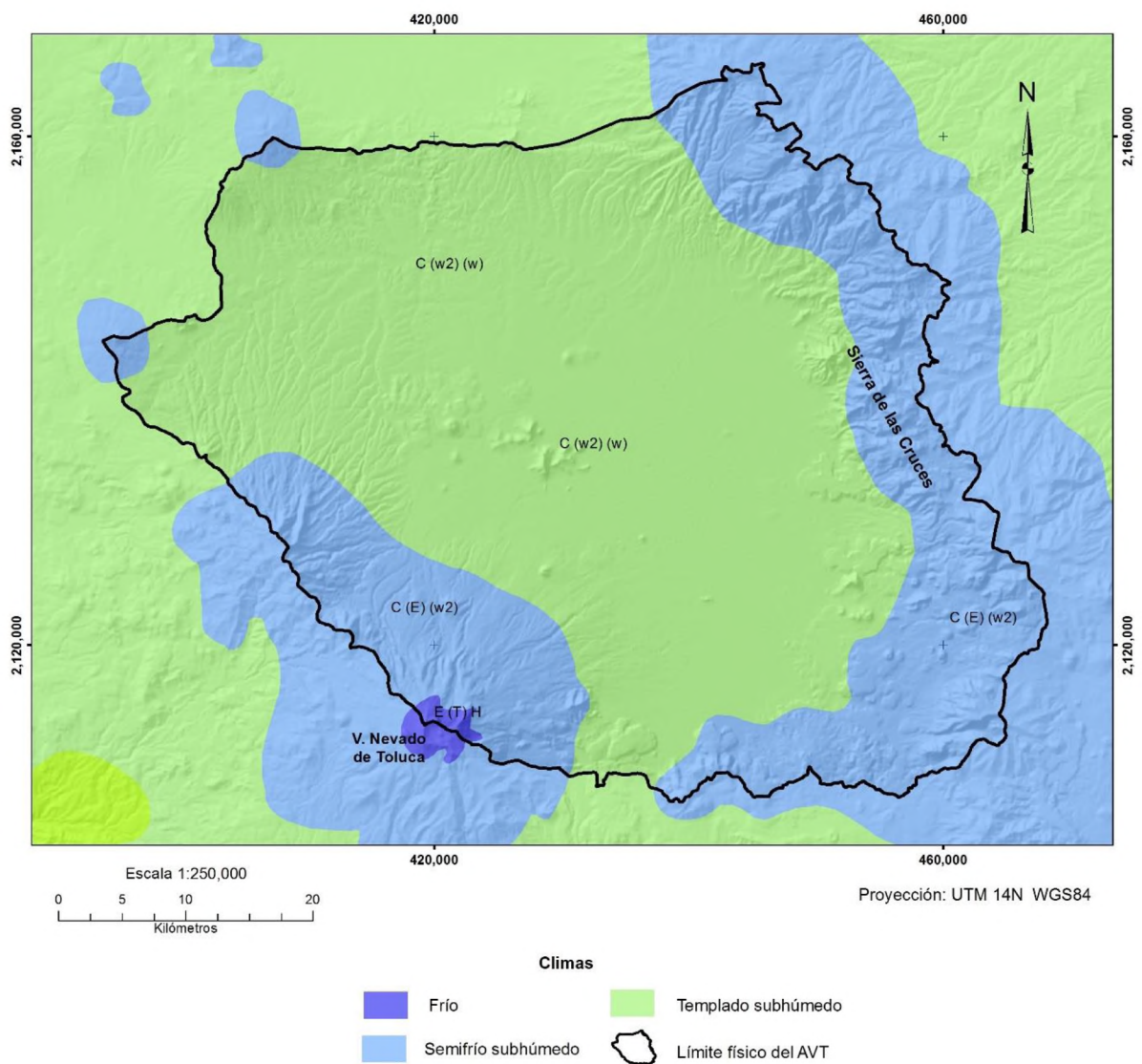


Figura 3.3. Climas de la región del acuífero del valle de Toluca.

La estación más representativa es la de Toluca, la cual registra una precipitación de 785 mm al año, con valores extremos de 1,183 y 776.4 mm/año; hacia las faldas del Nevado, la precipitación se incrementa a 1,200 y 1,400 mm/año (CONAGUA-GTZ, 2008).

La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, siendo más intensa los meses de junio a septiembre, con valores cercanos a unos 140 mm/mes. La época seca tiene lugar entre noviembre y abril, con precipitaciones del orden de 12 mm/mes (CONAGUA-GTZ, 2008).

La evaporación potencial se estima en los 1,700 mm anuales en la porción Noroeste del valle, disminuyendo hacia el Sur-Este con valores del orden de 1,500 mm/año, y hacia el Nevado se presentan valores menores de 800 mm/año (CONAGUA-GTZ, 2008).

La evaporación, factor determinante en la disponibilidad de agua debido a que gran parte del agua que se precipita es regresada a la atmósfera como vapor de agua, presenta valores máximos en el valle del acuífero, con disminuciones considerables en las partes altas. Es importante resaltar que la precipitación es la única fuente de recarga del acuífero (CONAGUA-GTZ, 2008).

3.3 Geología

La zona de estudio se ubica dentro del el Eje Neovolcánico, lo que implica una importante actividad volcánica reciente, donde las rocas aflorantes presentan edades que van del Terciario Medio (26 millones de años) al Reciente y pueden asociarse a tres grandes grupos (IFOMEGEM, 1994).

El primer grupo está representado por rocas de origen volcánico localizadas en las partes altas, constituidas por basaltos y andesitas, se encuentran en el acuífero en forma de extensos mantos de lava, expulsados por fisuras o por numerosos volcanes que se localizan en la parte sur del acuífero, presentan una gran porosidad y permeabilidad debido a las numerosas fracturas que poseen y a las

intercalaciones con capas de material escoriáceo, como ocurre en los afloramientos del Sur que marcan los límites del acuífero con la cuenca del río Balsas.

Estos afloramientos son de gran importancia además de su extensión por considerarse que son la principal zona de recarga del acuífero. Hay importantes afloramientos de rocas andesitas y dacíticas en todo el acuífero, constituyen los núcleos de las principales sierras como son; Monte Alto, Las Cruces y el Nevado de Toluca (CONAGUA-GTZ, 2008). Agrupando más a detalle las características presentes, este grupo puede dividirse en las siguientes unidades geológicas (Figura 3.4):

Qhv. Derrames de lava de composición andesítica, basáltica y dacítica con depósitos cineríticos y otras rocas piroclásticas asociadas.

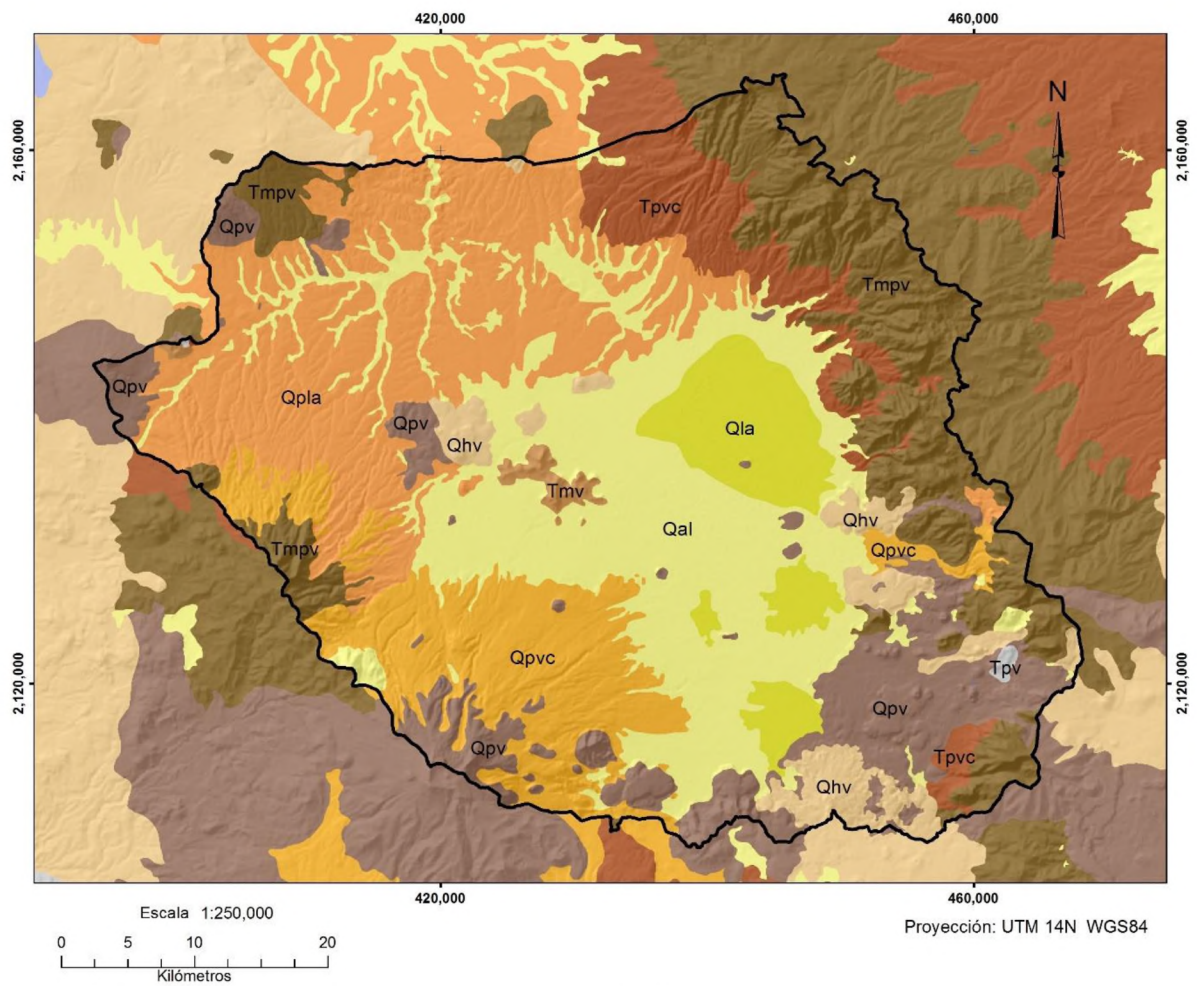
Qpv. Derrames de lava composición esencialmente basáltica y andesítica con depósitos cineríticos, aglomerado y brecha de derrame asociados. En el volcán Nevado de Toluca, predominan rocas del tipo andesíticas y dacíticas.

Tmpv. Incluye rocas volcánicas indiferenciadas predominantemente andesíticas y dacíticas de la Sierra de las Cruces.

Tmv. Incluye lavas basálticas y andesíticas indiferenciadas (andesita del área de Toluca).

Tpv. Incluye basalto y andesita al sur de la Sierra de las Cruces y en el límite poniente del acuífero.

El segundo grupo está conformado por materiales piroclásticos que se encuentran bordeando las sierras, incluyen tobas, aglomerados, brechas, cenizas volcánicas y depósitos de pie de monte.



Simbología

Holoceno	Qal	Aluvión	Plioceno	Tpv	Basalto y andesita
	Qla	Sedimentos lacustres		Tpvc	Rocas volcánicas epiclásticas
	Qhv	Derrames de lava, basalto y andesita	Mioceno	Tmpv	Rocas andesíticas y dacíticas
Pleistoceno	Qpla	Sedimentos lacustres		Tmv	Lavas basálticas y andesíticas
	Qpv	Derrames de lava, basalto y andesita			
	Qpvc	Lahar y depósitos volcanoclásticos			
					 Límite físico del AVT

Figura 3.4. Geología de la región del acuífero del valle de Toluca (IFOMEGEM, 1994).

Las rocas piroclásticas producto de erupciones volcánicas explosivas cubren extensas porciones del valle, especialmente en las partes de poca pendiente o planas, y están constituidas principalmente de tobas lacustres con intercalaciones de limo, arcilla, ceniza y horizontes de pómez; y se caracterizan por presentar un gran potencial de recarga y almacenamiento de agua, por la intercalación de materiales de diferente granulometría. Un gran porcentaje de los pozos que actualmente explotan el acuífero lo hacen en esta unidad (CONAGUA-GTZ, 2008).

De acuerdo a éstas características se pueden distinguir dos unidades geológicas que son:

Qpvc. Lahar y depósitos volcanoclásticos con menor cantidad de depósitos fluviales interestratificados, además de formaciones que consisten esencialmente de lahares, pómez y depósitos piroclásticos localizados en algunas áreas al norte de la zona de estudio

Tpvc. Principalmente rocas volcánicas epiclásticas, abanicos aluviales coalescentes, así como depósitos laháricos y de ceniza volcánica en algunos lugares.

Por último, el tercero grupo está compuesto por materiales producto de la desintegración y erosión de los dos grupos anteriores constituidos principalmente por arenas, gravas, arcillas, limos y depósitos lacustres.

Los depósitos lacustres están constituidos por sedimentos arcillosos y limosos dispuestos en capas laminares muy delgadas. Se localizan en las zonas donde existieron lagunas como las de Almoloya, Mexicalcingo, Lerma y San Bartolo. Se considera que estos depósitos dadas sus características litológicas y extensión presentan poca importancia en la recarga del acuífero (UNITECNIA S.A de C.V., 1996).

Por otra parte, los depósitos de aluvión se originan por su transporte por las corrientes de los ríos, ocupan las partes planas del valle de Toluca y cubre los

depósitos volcanoclásticos. Están constituidos por acarreos de tamaño variable, que va de arcillas, arenas, gravas hasta cantos sin consolidar, presentan una alta capacidad de infiltración y se consideran buenos acuíferos. De acuerdo a éstas características se distinguen tres unidades geológicas:

Qal. Aluvión: grava, arena y limo con interestratificación de ceniza volcánica en el valle de Toluca, y en otras depresiones pequeñas, resultado la actividad volcánica, así como a lo largo de ríos y arroyos.

Qla. Sedimentos lacustres con interestratificación de ceniza volcánica.

Qpla. Sedimentos lacustres. Incluyen: conglomerado, arenisca y limolita semiconsolidados, interestratificados con capas de toba, pómez y diatomita.

3.4 Edafología

La condición geológica, topográfica y climática que se presentan en la región del acuífero del valle de Toluca proporciona una gran variedad de suelos, los cuales están distribuidos en once grupos edáficos, (Figura 3.5). Las características principales de estos suelos son descritas a continuación con base en lo publicado por el Gobierno del Estado de México (2006).

Acrisol (AC): Se les encuentra en zonas templadas muy lluviosas, presentan horizontes arcillosos y son generalmente ácidos; se utilizan en la agricultura con rendimiento muy bajo y en la ganadería con rendimiento medio; son moderadamente susceptibles a la erosión y se encuentra al noroeste del acuífero del valle de Toluca en pequeñas superficies del terreno.

Andosol (AN): Se derivan de cenizas volcánicas, poseen gran capacidad de retención de humedad y fijación de fosforo, son susceptibles a erosionarse, son poco aptos para uso agrícola; se localizan en áreas volcánicas, y se presentan al sur-oeste en las partes altas del Nevado de Toluca y al noreste en la Sierra de las Cruces, hacia el sur-este por el Cerro la Corona que se encuentra en el municipio de Tianguistenco.

Cambisol (CM): Son suelos jóvenes, poco desarrollados; se presentan en diferentes condiciones topográficas y climáticas; son moderadamente aptos para la agricultura; en algunos casos tienen acumulación de caliche suelto (costra calcárea que se forma en las regiones de climas desérticos o semidesérticos, debido a la precipitación del carbonato cálcico y otras sales en superficies o en interior de formaciones edáficas en la que predomina la circulación ascendente del agua), se presenta en pequeñas porciones del terreno dentro de la zona noreste del acuífero.

Feozem (PH): Son suelos aptos para la agricultura en clima templado. Presentan acumulación de materia orgánica son de fácil manejo y alcanzan un alto grado de productividad agrícola son susceptibles a la erosión moderada y alta; se encuentran en zonas de poca pendiente. Este tipo de suelo se presenta en la parte centro del acuífero.

Fluvisol (FL): Son suelos depositados por el agua poco desarrollados se ubican cerca de lagos o sierras desde donde escurre el agua a los llanos pueden ser someros o profundos, arenosos o arcillosos, fértiles e infértiles en función del tipo de materiales que lo forman, se presenta al sur-este del Nevado de Toluca.

Histosol (HS): Se forman por acumulación de materia orgánica en cuencas saturadas de agua o bajo climas fríos y húmedos, posee una elevada fertilidad se presentan en poca porción dentro del acuífero del valle de Toluca.

Leptosol (LP): Están limitados en profundidad por una roca dura continua, por materiales altamente calcáreos, una capa continua cementada dentro de los 30 cm, o que tienen menos de 20% de tierra fina a una profundidad de 75 cm son poco aptos para la agricultura y se encuentran en áreas de montaña y lomeríos. Se localiza únicamente al suroeste del acuífero del valle de Toluca.

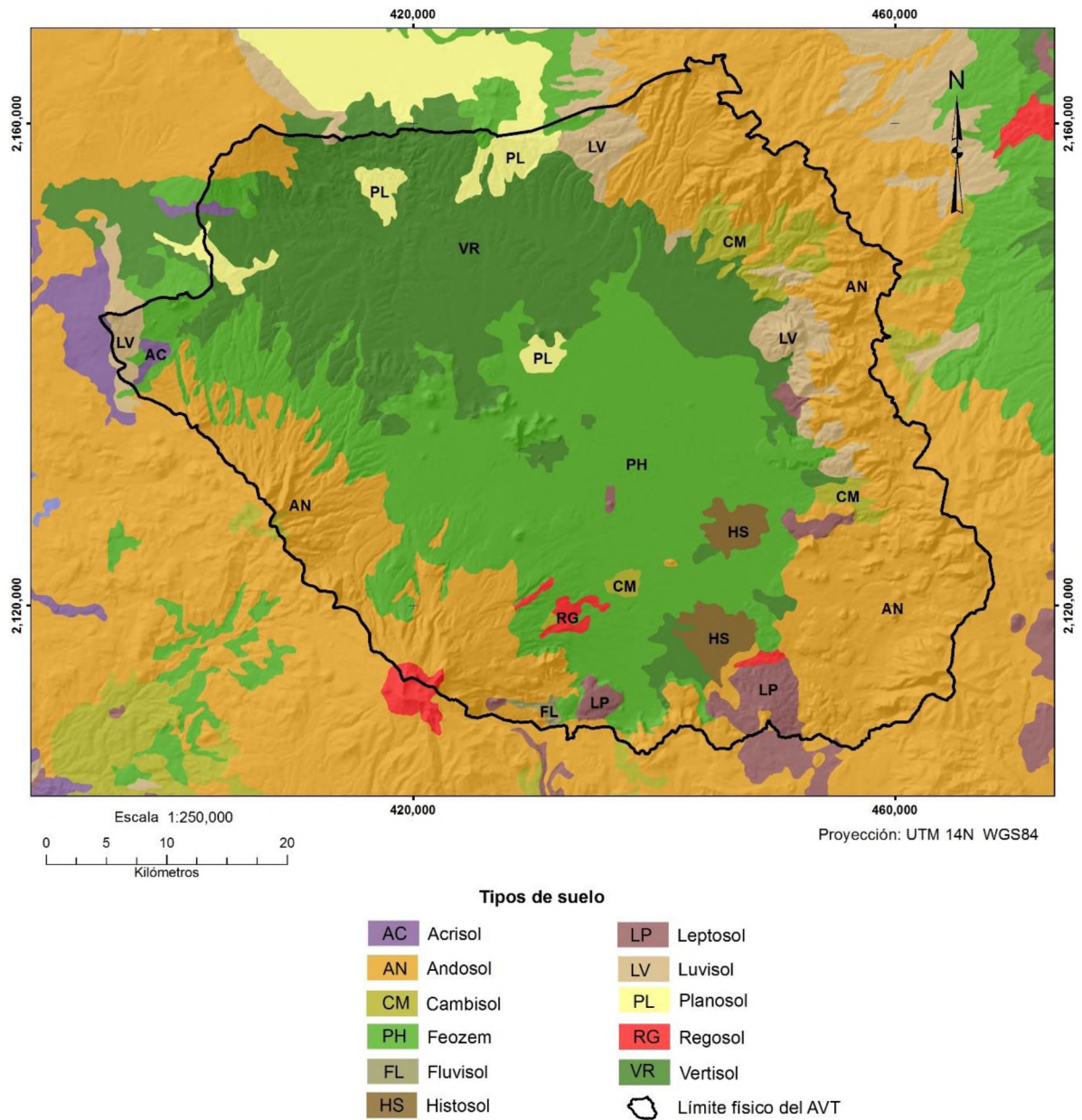


Figura 3.5. Edafología de la región del acuífero del valle de Toluca (CONABIO, 2012).

Luvisol (LV): Estos suelos contienen una gran cantidad de arcilla por lo que presentan coloración rojiza, parda o gris son característicos de zonas templadas por lo que se encuentran asociados con bosques templados su vocación natural es la forestal, sin embargo se pueden utilizar con buenos resultados en la ganadería sembrando pastizales pero su rendimiento en la agricultura es bajo. Se

encuentran ubicados en pequeñas porciones del municipio de Xonacatlán y Lerma.

Planosol (PL): Muestra una capa superficial con alto contenido de materia orgánica; tienen un drenaje deficiente debido a una capa en el subsuelo de muy baja permeabilidad son moderadamente aptos para la agricultura, se localiza en zonas bajas y son fáciles de erosionar. Se ubican al norte del acuífero del valle de Toluca en poca proporción del terreno.

Regosol (RG): Están formados por material suelto diferente del aluvial reciente, como los depósitos fluviales, dunas o cenizas volcánicas con frecuencia son someros y pedregosos su aptitud para la agricultura es moderada; se localizan en zonas de montaña y lomeríos tienen materiales calcáreos entre los 20 y 50 cm superficiales. Su presencia se restringe a la zona montañosa del volcán Nevado de Toluca.

Vertisol (VR): Presentan alto contenido de arcilla con grietas anchas y profundas en la época de secas y pegajosos con la humedad son inadecuados para la agricultura de temporal pero aptos para la de riego se encuentran en zonas bajas y lomeríos; presentan problemas de inundación y se destacan por ser expansivos.

3.5 Hidrología

3.5.1 Hidrología superficial

El acuífero del valle de Toluca pertenece a la región hidrológica 12 Lerma-Chapala-Santiago, subregión Alto Lerma (CONAGUA-GTZ, 2008).

En el área de estudio se encuentran delimitadas seis subcuencas específicas, que son: la laguna de Almoloya del Río, laguna de Tultepec, laguna de San Bartolo, afluentes del río Lerma, río Tejalpa y afluentes de la presa José Antonio Alzate (García y Jiménez, 2006).

La principal corriente superficial que atraviesa al valle de Toluca es el río Lerma, esta corriente nace prácticamente en el poblado de Almoloya del Río (Figura 3.6), a partir de este punto su cauce sigue una dirección más o menos franca hacia el norte, continuando en su trayecto atraviesa el valle de Ixtlahuaca- Atlacomulco, saliendo del Estado de México a la altura del poblado de Temascalcingo para integrarse posteriormente al estado de Michoacán (CONAGUA-GTZ, 2008).

De las tres lagunas que surgía el Lerma, hoy solamente la de Almoloya funciona como almacenamiento natural, aunque con evidentes grados de abatimiento. Las otras dos han sido impactadas de manera más agresiva, por lo que en su espacio original se aprecian llanuras de inundación y ciénagas debido a la extracción de agua subterránea realizada en la zona (GEM, 2011).

Entre 1995 y 1996, el inicio del Curso Alto se rectificó artificialmente con el propósito de drenar las lagunas, pues el gradiente del valle es apenas perceptible y el cauce del río poco definido hasta la presa José Antonio Alzate (GEM, 2011).

La presa José Antonio Alzate se terminó de construir en el año de 1962, es el primer embalse sobre el río Lerma para la irrigación de la zona y la prevención de inundaciones. Se ubica en el municipio de Temoaya hacia el noreste del acuífero del valle de Toluca, aproximadamente a 30 km aguas abajo, tiene una capacidad de almacenamiento de 35.3 km^3 (CNA, 2002).

A lo largo de su cauce, el Lerma recibe numerosas aportaciones provenientes ya de ríos con caudal considerable o de arroyos intermitentes con escurrimientos estacionales y poco definidos. Entre esos se encuentran el río Verdiguél, Santiaguito, Ojo de Agua, Agua Bendita, Santa Catarina, San Lorenzo, San Pablo, Solanos, El Gallo, Temoaya y el Arenal (GEM, 2011).

Finalmente, el río Lerma recibe los sobrantes de agua de canales de riego del valle de Toluca, al igual que aguas negras y residuales que se originan en las poblaciones asentadas en el valle y en las zonas industriales; lo anterior ha provocado la fuerte contaminación del cuerpo de agua superficial. Además a lo

largo de todo el trayecto del Lerma, en las partes elevadas existe toda una red de pequeños arroyos intermitentes y poco definidos con escurrimientos hasta el río. Por otro lado, se encuentran una serie de bordos, algunos de ellos de relativa importancia, y los cuales en su mayoría son usados para riego y abrevadero (GEM, 2006).

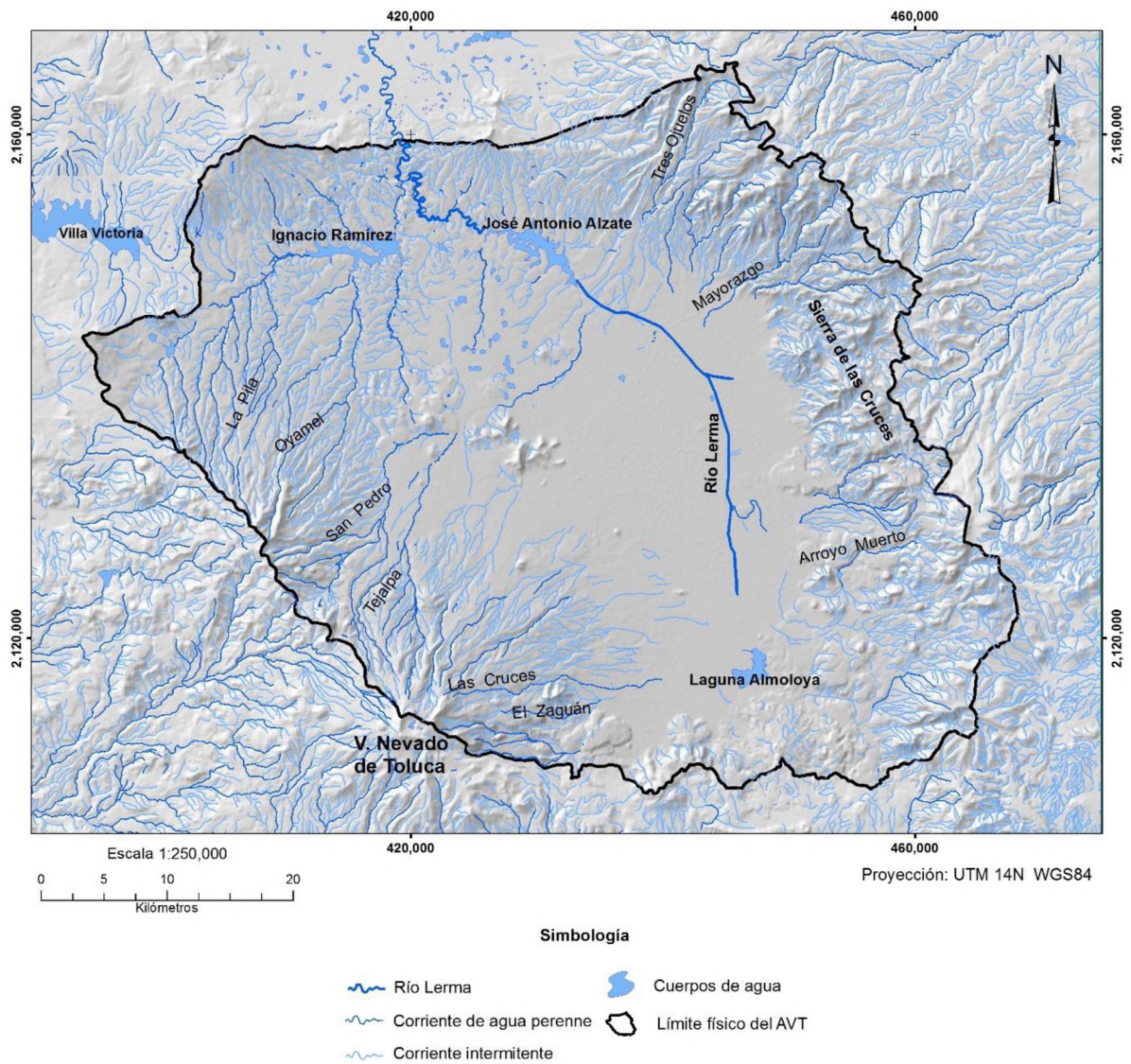


Figura 3.6. Hidrología de la región del acuífero del valle de Toluca.

3.5.2 Hidrología subterránea

En lo que se refiere a la hidrología subterránea, se tienen tres flujos subterráneos principales en el área de estudio, que son (CNA, 2002):

- Proveniente de infiltraciones del Nevado de Toluca, circulación Este – Noreste.
- Proveniente del Nevado de Toluca, dirección del Norte para salir a Ixtlahuaca.
- Proveniente de la Sierra de las Cruces, circulación Oeste - pie de la Sierra

En el acuífero del valle de Toluca, las unidades estratigráficas integran un sistema que controla el almacenamiento y movimiento del agua subterránea, además tiene como fronteras laterales a las sierras perimetrales, manifestando comunicación somera y continuidad hidráulica, únicamente a través del estrechamiento de Perales hacia el valle de Ixtlahuaca, que, aunque topográficamente sean dos valles separados, desde el punto de vista hidrogeológico no dejan de tener cierta relación, ya que se establece comunicación entre ambos valles a través del cauce labrado por los escurrimientos del río Lerma (Ariel Consultores, S.A., 1996).

Todas las unidades estratigráficas del acuífero del valle de Toluca han sido agrupadas atendiendo a su funcionamiento hidrogeológico en acuíferos, acuífugos y acuitardos; (Ariel Consultores, S.A., 1996; CONAGUA-Desarrollo y Sistemas, S.A 2005; CONAGUA-GTZ, 2008).

Sobre la base de estas características, se puede agregar que este sistema está formado por varios niveles de acuíferos superpuestos que constituyen un acuífero multicapa, pero la existencia de cierta continuidad hidráulica, permite considerarlo un sistema de flujo único, aunque existen diferencias significativas de carga hidráulica (Ariel Consultores, S.A., 1996). Sin embargo, de manera general, se distinguen dos tipos de unidades acuíferas, una relacionada con el medio poroso representado por los depósitos de clásticos no consolidados que rellenan la cuenca del valle de Toluca y otra unidad relacionada con rocas volcánicas

afectadas por tectonismo y que manifiestan permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2009; Escolero et al., 2009).

De acuerdo con Ariel Consultores, S.A. (1996), al acuífero superior le corresponde el medio poroso, mientras que el inferior es del tipo fisurado. El medio poroso que funciona como libre, descansa sobre tobas de baja permeabilidad que actúan como acuitardo, las que a su vez yacen y confinan al acuífero inferior con fracturamiento que funciona hidráulicamente como confinado o semiconfinado. Esta subdivisión no descarta cierta continuidad hidrogeológica entre ellos, lo que permite considerarlo como un sistema de flujo único.

Según los anteriores autores, los acuíferos se definen en las siguientes unidades: Tpvc, Qpvc (flujos piroclásticos del Nevado de Toluca), Qpv (basalto y andesita), Qpla (depósitos lacustres) y Qal (depósitos aluviales). Sin embargo, los flujos del Nevado (Qpvc) y la unidad Qpv funcionan más bien como zonas de recarga, debido a que su nivel topográfico se encuentra por encima del de saturación, propiciando la infiltración del agua de lluvia y de escurrimientos superficiales; sin embargo, ocasionalmente pueden funcionar como acuíferos someros, tal como lo demuestran distintas norias excavadas a 20 m de profundidad en las laderas de las elevaciones volcánicas. La unidad Tpvc también propicia infiltración en sus afloramientos que se localizan en cotas más altas que la del nivel freático, funcionando como un buen acuífero, con permeabilidad variable, de media a alta.

Como unidades acuífugas se consideran: el complejo volcánico de andesitas, basaltos antiguos (Tmv) y la unidad Tmpv, que por su baja permeabilidad se consideran impermeables. Por esta razón, representan fronteras impermeables de los acuíferos tanto laterales como de fondo. En algunas partes estas rocas presentan fracturación, lo que les confiere permeabilidad secundaria que propicia infiltración del agua de lluvia, pero no se sabe hasta que profundidad funciona de esta manera.

Como acuitardos se han considerado las tobas lacustres, que no afloran pero que están presentes en el subsuelo intercaladas en los depósitos lacustres y de

aluvión, así como los materiales finos de la unidad Qpvc, lahares de la unidad Tpvc, y las arcillas lacustres (Qla).

Los parámetros hidráulicos de estas unidades acuíferas abarcan un amplio rango de valores debido a la variabilidad litológica y geométrica de los depósitos (CONAGUA-Desarrollo y Sistemas S.A., 2005).

La principal fuente de recarga del acuífero del valle de Toluca proviene de las sierras circundantes, en particular de las faldas del Volcán Nevado de Toluca, y la Sierra de las Cruces. La recarga principal se produce sobre los abanicos aluviales de los cursos de agua que bajan de dichas sierras (CONAGUA-Desarrollo y Sistemas S.A., 2005).

3.6 Población

La dinámica poblacional y económica dentro del valle de Toluca, ha registrado transformaciones que han llevado a una modificación de patrones de aprovechamiento de los recursos naturales. Gran parte de estos cambios se deben a la industrialización a partir de la década de los cincuenta y el crecimiento del sector terciario en los ochenta (GEM, 2005).

El potencial económico de la región está en la industria, el comercio y los servicios. Este comportamiento distingue a la región del valle de Toluca del resto del país, ya que es la única que presenta un balance entre los sectores secundario y terciario. Sin embargo, el sector primario presenta un deterioro, afectando el bienestar de los campesinos de la región. (GEM, 2011).

La región presenta numerosos y significativos asentamientos, razón por la que en los últimos años ha sufrido un crecimiento demográfico significativo, según cifras oficiales del censo realizado por INEGI (2010), la región del AVT cuenta con una población total de 2, 184,857 habitantes. En la tabla 3.1 se observa cómo ha sido el crecimiento de la población en los 23 municipios que conforman el acuífero.

En la Figura 3.7 se observa la tendencia de crecimiento de los municipios, siendo Toluca, Metepec, Zinacantepec entre otros municipios conurbados, lo que significa que la población se concentra en la zona centro del acuífero, los municipios con mayor número de población, lo que puede explicarse por el crecimiento de centros comerciales, industriales y zonas habitacionales en esta áreas, y los municipios con menor número de población son Chapultepec y Texcalyacac que cuentan con poco menos de 10,000 habitantes.

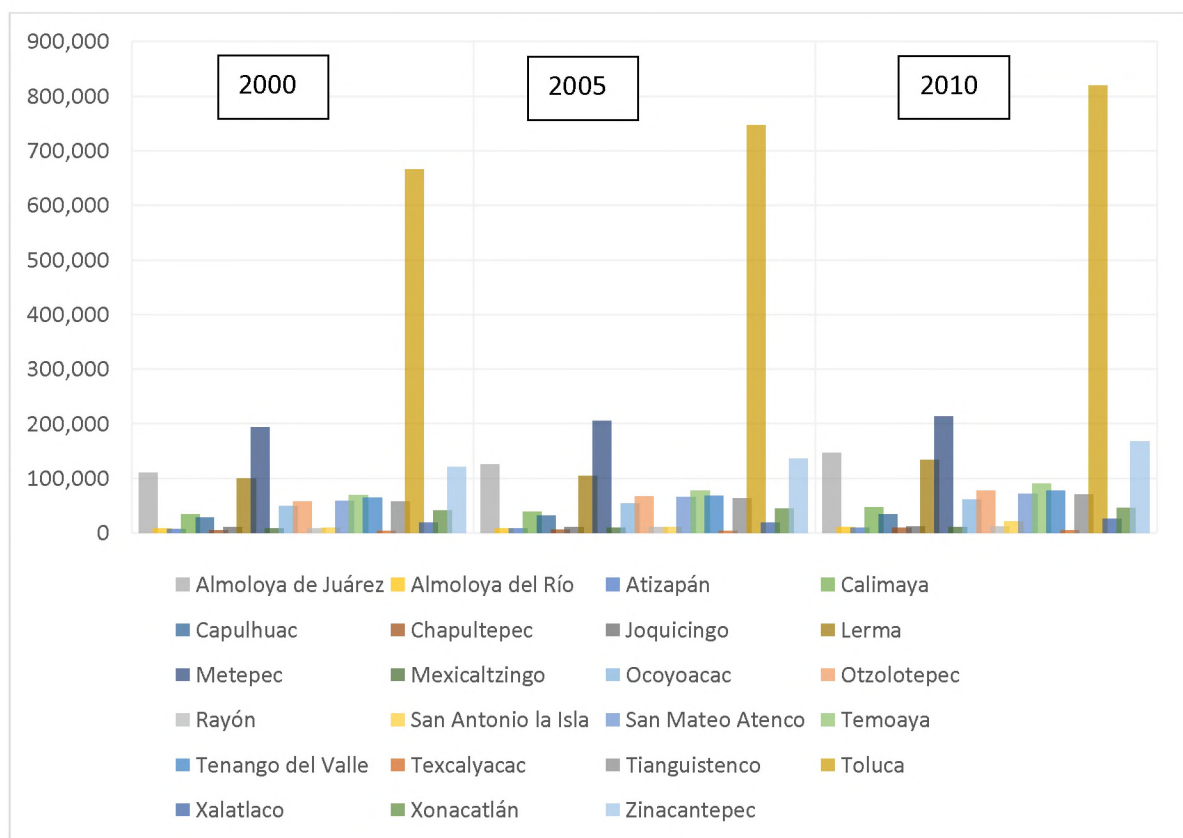


Figura 3.7. Crecimiento demográfico de los municipios comprendidos dentro de la región del acuífero del valle de Toluca (INEGI, 2000,2005 y 2010).

Tabla 3.1 Crecimiento de la población por municipio 2000-2010. (INEGI, 2000,2005 y 2010).

Municipio	Año		
	2000	2005	2010
Almoloya de Juárez	110, 591	126, 163	147, 653
Almoloya del Río	8, 873	8, 939	10, 886
Atizapán	8, 172	8, 909	10, 299
Calimaya	35, 196	38, 770	47, 033
Capulhuac	28, 808	30, 838	34, 101
Chapultepec	5, 735	6, 581	9, 676
Joquicingo	10, 720	11, 042	12, 840
Lerma	99, 870	105, 578	134, 799
Metepec	194, 463	206, 005	214, 162
Mexicaltzingo	9, 225	10, 161	11, 712
Ocoyoacac	49, 643	54, 224	61, 805
Otzolotepec	57, 583	67, 611	78, 146
Rayón	9, 024	10, 953	12, 748
San Antonio la Isla	10, 321	11, 313	22, 152
San Mateo Atenco	59, 647	66, 740	72, 579
Temoaya	69, 306	77, 714	90, 010
Tenango del Valle	65, 119	68, 669	77, 965
Texcalyacac	3, 997	4, 514	5, 111
Tianguistenco	58, 381	64, 365	70, 682
Toluca	666, 596	747, 512	819, 561
Xalatlaco	19, 182	20, 002	26, 865
Xonacatlán	41, 402	45, 274	46, 331
Zinacantepec	121, 850	136, 167	167, 759
Población total	1, 743, 704	1, 928, 044	2, 184, 875

3.7 Breve historia del uso del agua en el acuífero del valle de Toluca

La extracción del agua subterránea se ha incrementado a lo largo del tiempo, iniciándose en los años treinta con norias, e intensificándose en los años cuarenta y cincuenta con el sistema Lerma. Posteriormente, (1980-1990) se vuelve a incrementar con el establecimiento de las primeras industrias en la periferia de la ciudad de Toluca (CONAGUA-GTZ, 2008).

Para 1986, se señaló un incipiente a moderado deterioro del agua subterránea por contaminación, cuyo origen es el desarrollo urbano e industrial de Toluca y su zona industrial, donde ya se manifestaba la salinidad mayor y las concentraciones más altas de casi todos los índices químicos analizados (CONAGUA, 2009).

La consecuente escasez del agua se debe principalmente a que existe una enorme batería de pozos en el acuífero que están siendo explotados (CONAGUA, 2009). En el acuífero de Toluca se tienen registrados alrededor de 848 aprovechamientos entre pozos y norias (CONAGUA-GTZ, 2008): 403 pozos de uso público-urbano, 205 para uso agrícola, 155 industrial, 29 para servicios y 56 para otros usos. Sin embargo, en el Registro Público de Derechos de Agua del acuífero oficialmente se tienen contabilizados 705, de los cuales el sistema Lerma ocupa 240 pozos.

En los últimos años en la porción de la zona industrial y la ciudad de Toluca, el descenso del nivel piezométrico fue de 30 m en las zonas más explotadas, desde 1960 a la fecha. En este valle, el abatimiento se ha presentado a un ritmo de 0.6 m/año, con valores de hasta 1.5 m/año en la zona urbana-industrial de la Cd. de Toluca, ocasionando que el agua se localice alrededor de los 90 m de la superficie del terreno (CONAGUA-GTZ, 2008).

Esto ha transformado al acuífero en uno de los más sobreexplotados del país. Por consiguiente, la sobreexplotación del AVT ha dado lugar a la compactación de los estratos geológicos (secuencia de depósitos volcano-clásticos dacíticos andesíticos y lacustres principalmente), dando lugar a la formación de fracturas asociadas a subsidencias de tierra y en algunos casos hasta colapsamiento de suelo. En términos ecológicos la sobreexplotación del acuífero ha dado lugar a una extinción gradual de lagos y humedales ubicados al este de la cuenca; los cuales se encuentran en una de las zonas más importantes de recarga (Gárfias, *et al*, 2008).

Capítulo 4.

Metodología

Para el desarrollo de la investigación, se realizó una serie de pasos metodológicos (Figura 4.1) que fueron la base para el cumplimiento de los objetivos planteados.

4.1 Recopilación y análisis de la información

Dentro de la primera fase de investigación se realizó la búsqueda de información disponible sobre el tema de recarga artificial de acuíferos, así como las características generales del área de estudio. De la información obtenida se seleccionaron una serie de artículos, libros, revistas y bases de datos que fueron analizados para conocer los antecedentes con respecto al tema de investigación.

Algunas de las fuentes de información fueron CIRA (Centro Interamericano de Recursos del Agua), UAEM (Universidad Autónoma del Estado de México), UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), IFOMEGEM (Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México), INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía), al igual que CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) quien fue el organismo base para la recopilación de información sobre la caracterización del área de estudio y la piezometría del agua subterránea; así como organismos relacionados en el tema del agua.

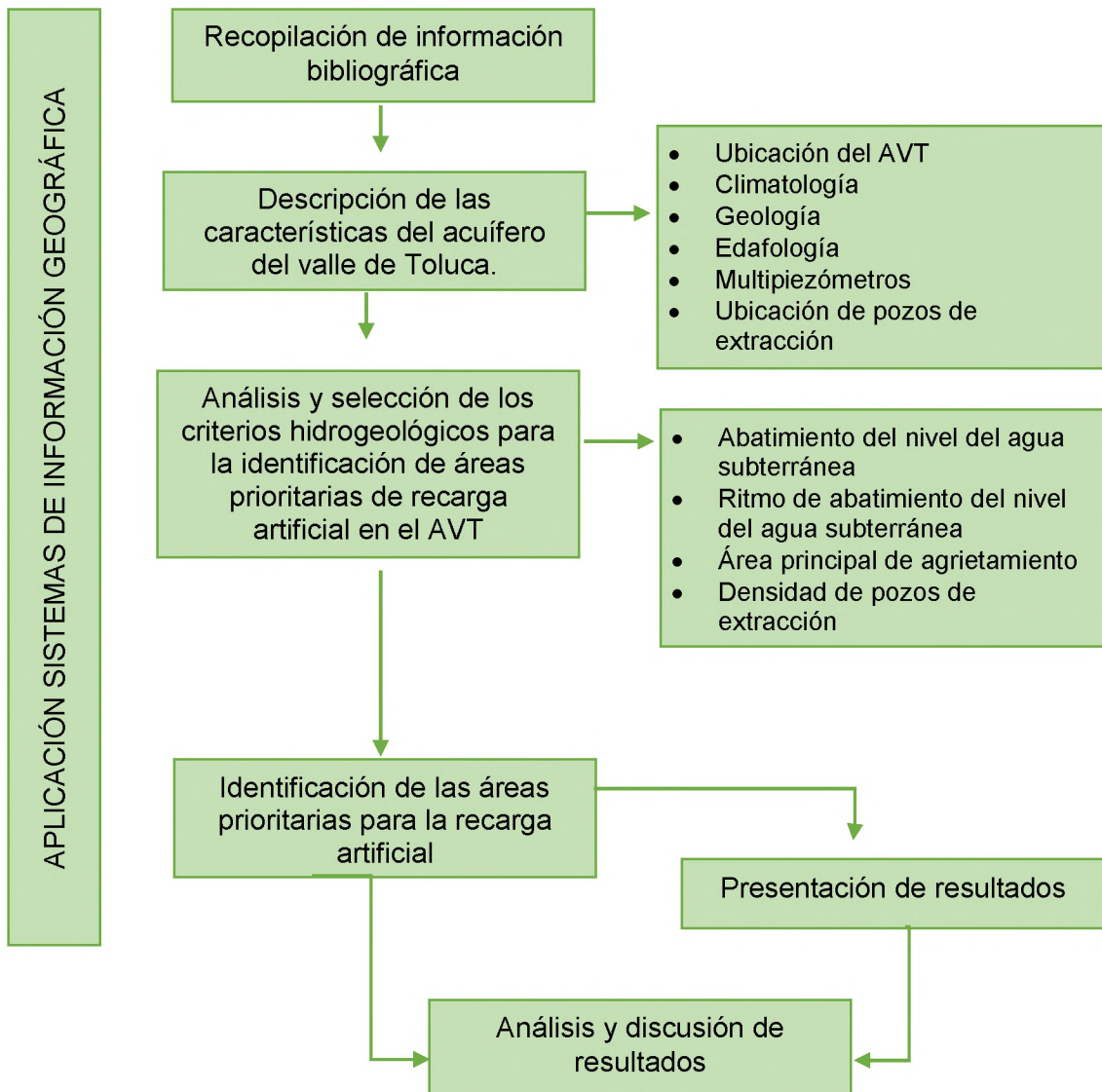


Figura 4.1 Esquema metodológico utilizado para generar los resultados de la investigación (Elaboración propia).

4.2 Descripción de las características del acuífero del valle de Toluca

Cabe resaltar que fue el límite físico el utilizado para delimitar las características físicas como: climatología y edafología, que fueron obtenidos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, (CONABIO, 2012) y la hidrología superficial obtenida a partir de las cartas topográficas digitales escala 1:50 000, con clave: E14A27, E14A28, E14A36, E14A37, E14A38, E14A47, E14A48 y E14A49 procedentes de INEGI, la geología se basó en la carta geológica del Estado de México, otorgada en medio digital y georeferenciada por el IFOMEGEM (1994), la obtención de estas capas permitió conocer las características físicas del área de estudio utilizando el programa Arc Map 10.1 para la edición de los atributos presentados.

Respecto a los datos demográficos consultados corresponden a los censos de población y vivienda de los años 2000 y 2010, y el conteo de población del año 2005, de estas bases de datos se obtuvo la población total de los municipios que comprenden el polígono del acuífero del valle de Toluca, teniendo esta información se realizaron gráficos para representar la dinámica de población que se presenta en el área de estudio.

4.3 Análisis y selección de los criterios hidrogeológicos para la identificación de áreas prioritarias de recarga artificial para la área de estudio

Al hablar de la identificación de un área prioritaria para la aplicación de la recarga artificial son varios los criterios que deben considerarse, a continuación se describen los criterios utilizados para el cumplimiento del objetivo de esta investigación, seleccionados a partir de la información disponible.

4.3.1 Áreas de abatimiento del nivel del agua subterránea

El abatimiento fue obtenido a partir de los datos históricos de los multipiezómetros localizados en el área proporcionados por CONAGUA (2015) (Figura 4.2). Un

multipiezómetro (Figura 4.3) es una perforación donde se han instalado un cierto número de piezómetros a diferentes profundidades (entre 10 y 150 m).

En total se trata de 71 piezómetros que han sido instalados en el acuífero con el objetivo de monitorearlo, después de una depuración de la tabla de registros de lecturas piezométricas se eliminaron algunos registros por no disponer de información completa (mediciones incompletas o que ya no se encuentran en funcionamiento), siendo 48 los multipiezómetros que cuentan con la información completa para el periodo 1970-2014 (Tabla 4.1), el cálculo del abatimiento se realizó mediante la ecuación 1.

$$S = PNi - PNf \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

PNi: Profundidad del nivel del agua en el año inicial (m)

PNf: Profundidad del nivel del agua en el año final (m)

S: Abatimiento del nivel de agua subterránea (m)

Ejemplificando el cálculo de la ecuación 1, se considera el número de multipiezómetro 106 que presenta una profundidad del nivel del agua subterránea en el año inicial de 15.96 m para el año 1970, y el valor de profundidad del nivel del agua final es de 17.81 m para el año 2014. El procedimiento que se muestra a continuación se realiza para cada uno de los 48 multipiezómetros que entran dentro del área de estudio.

$$S = PNi - PNf$$

$$S = 15.96 \text{ m} - 17.81 \text{ m}$$

$$S = 1.85 \text{ m}$$

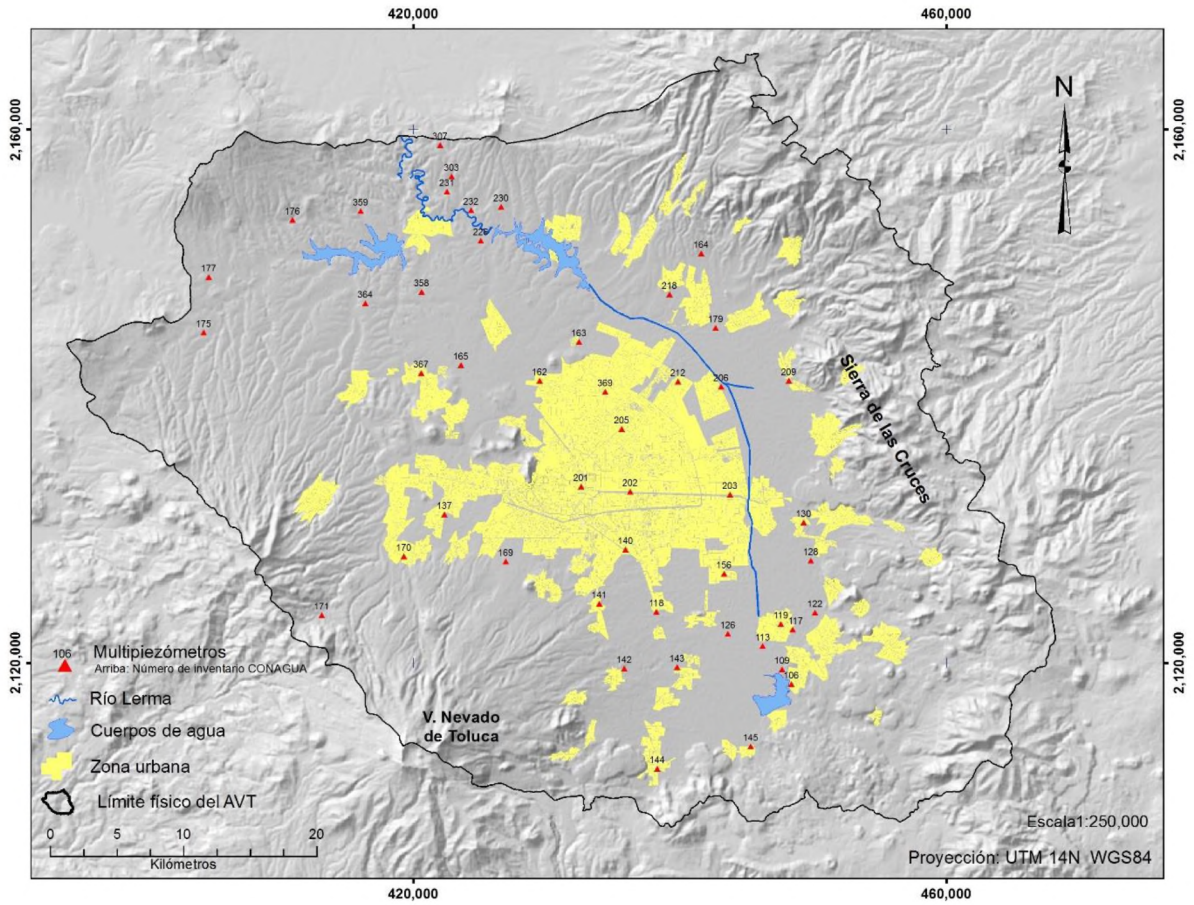


Figura 4.2 Ubicación de multipiezómetros en la región del AVT, con su número de inventarió (CONAGUA, 2015).

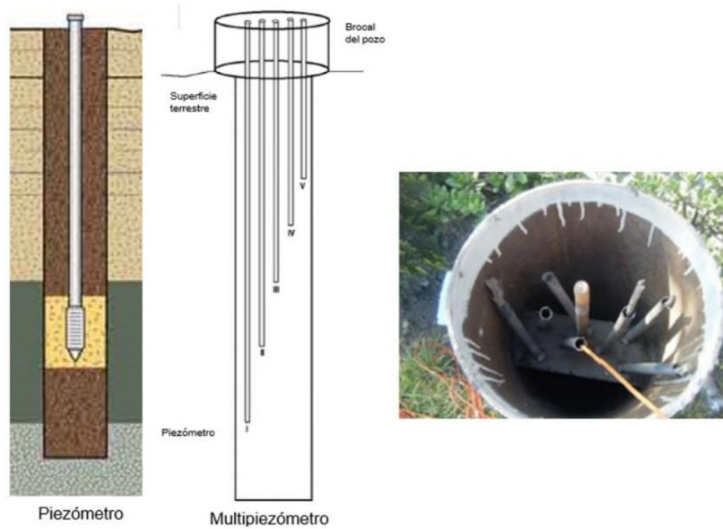


Figura 4.3 Esquema constructivo de un multipiezómetro

Tabla 4.1 Multipiezómetros localizados en el área de estudio (CONAGUA, 2015).

No. Pozo	Profundidad de la sonda (m)	Nombre
106	148.00	Almoloya del Rio
109	100.00	Rancho el Pastor o Rancho Tepozoco
113	114.00	Casco Hacienda Atenco
117	107.00	Panteón Sn. Pedro Tlaltizapan
118	135.00	San Mateo, Mexicaltzingo
119	104.00	Zócalo Sn. Pedro Tlaltizapan
122	150.00	Ejido Capulhuac
126	97.00	Ganadería Atenco Oeste de la Hacienda Atenco
128	148.00	Rancho Tabachín Hoy Rancho El Carmen
130	151.00	San Pedro Cholula
137	150.00	San Matías Transfiguración
140	110.00	Metepec
141	152.00	Sta. María Nativitas
142	162.00	Calimaya
143	160.00	San Antonio la Isla
144	128.00	Tenango de Arista
145	188.00	San Pedro Techuchulco
156	150.00	San Lucas Tunco
162	148.00	San Pablo Autopan
163	151.00	San Diego Linares
164	162.00	San Agustín de los Mimbres, Otzolotepec
165	149.00	San Isidro Km. 14.900 de la carretera, Toluca
169	197.00	Hacienda Sn. Antonio Rancho Sn. Miguel Zacango
170	149.00	Desviación a Tepejalpa, Zinacantepec
171	149.00	La Puerta, Zinacantepec
175	147.00	Ejido de la Laguna, Almoloya de Juárez
176	149.00	La Unión de Ocoyotepec, Coyotepec
177	181.00	Entrar al Valle Bajo Ejido del Hospital Villa
179	143.00	Rancho la Manga, Xonacatlán
201	79.70	Jardín Reforma Toluca, Toluca
202	150.00	AUTOMEX, Toluca
203	148.00	COLORQUIM, S.A., Toluca
205	150.00	Km. 58+500 Dos Pinos Toluca - San Bartolo
206	131.00	Margen Izquierda, Río Lerma, Otzolotepec
209	122.00	Poste 177 y Lavaderos Sn. Nicolás Peralta,
212	138.00	Carr. Naucalpan-Toluca Km. 53, México (San Bartolo)
218	55.00	Poste 414 Sta. María Tetitla Hacienda Buena
226	156.00	Rancho Rosalinda II, Temoaya
358	150.00	Santa Juana, Almoloya de Juárez
359	150.00	San Agustín Citlalli, Almoloya de Juárez
364	160.00	San Diego, Almoloya de Juárez.
367	126.00	Almoloya Poblado, Almoloya de Juárez
369	130.00	San Pedro Toltepec, Toluca
230	143.00	Sitio Presa Alzate
231	139.00	San Antonio Bonishi
232	156.00	San Lorenzo Tojico
303	137.50	Km.27.5
307	118.00	Puente del Caballo

Con respecto a los valores inicial y final, se consideraron las lecturas de los niveles de las sondas de mayor profundidad que van de los 100 m a los 150 m. Se obtuvieron las isolíneas de los niveles del agua subterránea con valores que van de 10 m a los 50 m de descenso para el periodo 1970-2014. La elección de los intervalos se basó en obtener una representación cartográfica adecuada de la variabilidad de las zonas de mayor y menor abatimiento.

4.3.2 Ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea

El ritmo de abatimiento, permite analizar la velocidad del proceso de abatimiento en un periodo de tiempo considerado.

Se elaboró con base en los registros históricos de niveles obtenidos de los multipiezómetros localizados en el área de estudio, la selección se realizó tomando en cuenta la regularidad histórica en el periodo 2010-2014. El ritmo de abatimiento de los niveles del agua subterránea se determinó dividiendo el valor del abatimiento del periodo 2010-2014 (el valor del abatimiento se obtiene mediante la ecuación 1, el valor inicial es el obtenido en el año 2010 y el valor final es el obtenido en el 2014), entre el número de años del periodo considerado, como lo indica la ecuación 2:

$$R_t = S/4 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

S: Abatimiento del periodo considerado (m)

R_t: Ritmo de abatimiento (m)

4: Número de años del periodo considerado

Ejemplificando el cálculo de la ecuación 2, se considera el número de pozo 106 que presenta una profundidad del nivel del agua subterránea en el año inicial de 17.16 m para el año 2010, y un valor de 17.81 m de profundidad del nivel del agua subterránea para el año 2014. Al igual que para el abatimiento el cálculo se realizó para cada uno de los 48 multipiezómetros disponibles.

$$S= 17.16 \text{ m} - 17.81 \text{ m}$$

$$S=0.65 \text{ m}$$

$$Rt= 0.65/4$$

$$Rt= 0.16 \text{ m/año}$$

Además, la definición de las isolíneas de ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea se realizó de manera manual y se utilizaron las líneas de isodescensos de: 1.0, 2.0 y 3.0 m/año. Esto con la finalidad de obtener una representación cartográfica de la variabilidad de las zonas de mayor y menor ritmo de abatimiento.

4.3.3 Densidad de pozos de extracción

La densidad de pozos es entendida como el número de pozos por unidad de superficie (número de pozos por km²).

Para obtener la densidad de pozos de extracción se utilizó el archivo .shp donde se localizan los pozos inventariados por el IMTA (pozos de extracción) (Figura 4.4). La sección de este factor se radica en la necesidad de identificar las áreas con una mayor densidad de pozos, ya que en estas es donde se puede presentar una mayor intensidad de explotación y por lo tanto pueden ser las áreas donde es inminente intervenir a través de la recarga artificial.

La densidad de pozos fue calculada en el software de SIG Arc Map 10.1, con la herramienta *density kernel*, la cual se basa en que los puntos (pozos de extracción) que caen en el mismo radio de búsqueda se suman, luego se dividen por el tamaño del radio de búsqueda para obtener el valor de densidad de cada celda; las celdas que estén más cerca del centro del área de búsqueda tendrán un mayor peso (mayor valor de densidad) que aquellas que estén más cerca de los bordes. El radio de búsqueda se define de acuerdo a la escala de trabajo y la

cantidad de puntos a evaluar, ya que se especifica que a mayor radio será mayor la suavidad, y a menor radio se logrará mayor detalle (Silverman, 1986).

4.3.4 Área principal de agrietamiento

El agrietamiento del terreno es un fenómeno geológico, surge como una abertura producto de la separación de dos materiales y cuyas dimensiones varían en largo y ancho. Existen diversas causas que originan el agrietamiento del terreno (Orozco y Figueroa, 1991).

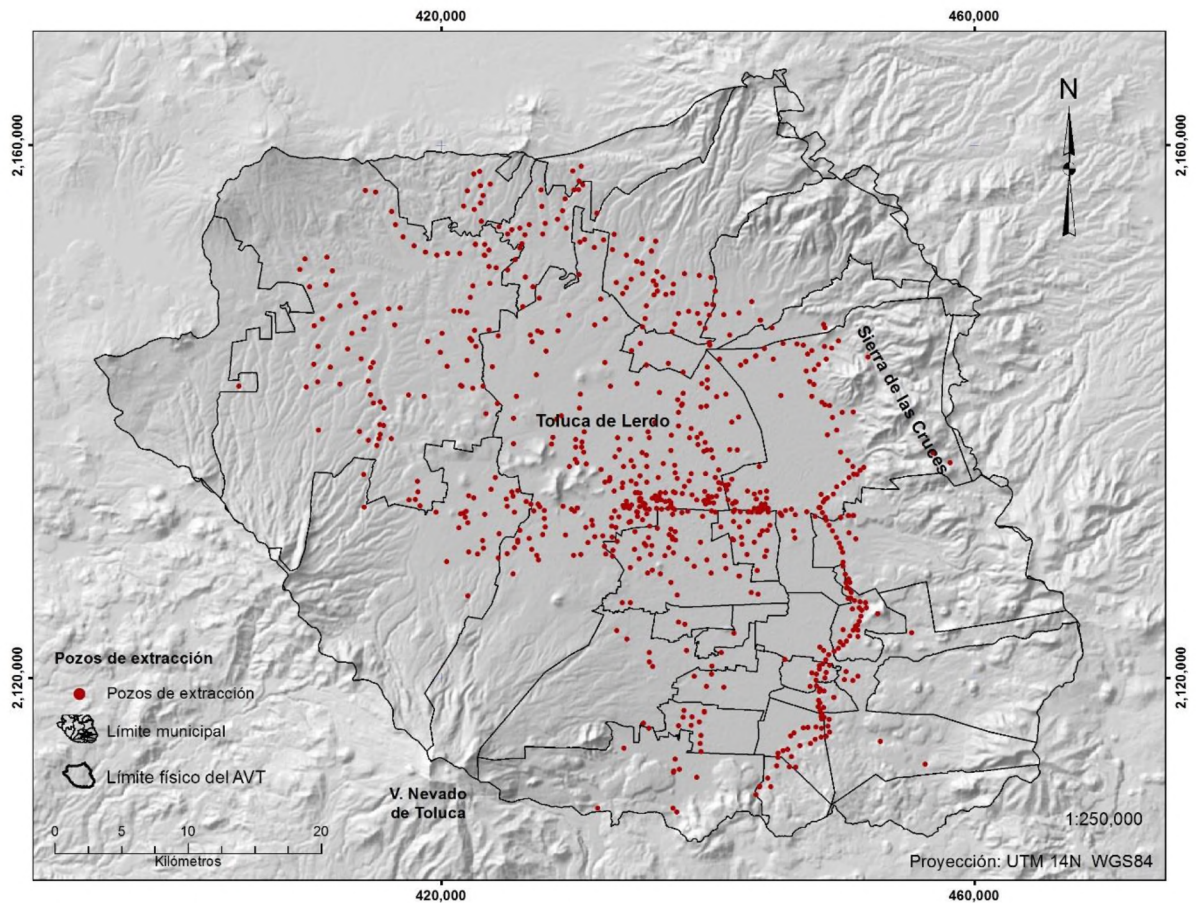


Figura 4.4. Ubicación de pozos de extracción en la región del AVT (IMTA, 2009).

Los hundimientos y grietas que se presentan como consecuencia de la sobreexplotación del agua del subsuelo (y de cualquier sólido o fluido) traen consigo problemas, no solo económicos por los daños que causan directamente sobre las propiedades de los particulares y en la infraestructura urbana, sino también sociales y legales por el riesgo que conlleva habitar en una zona donde los hundimientos provocan cada vez más frecuentes inundaciones, y donde la aparición de una nueva grieta es latente (Pacheco, 2007).

Este factor fue seleccionado, ya que, el origen del área principal de agrietamiento tiene relación con el descenso de los niveles del agua subterránea, causado por una intensa extracción de agua (Carreón et al., 2006).

El área principal de agrietamiento se identifica con base en la investigación realizada por Paredes (2010), donde se localizaron los agrietamientos de los que se tiene registro en el acuífero del valle de Toluca y se definió un área principal de afectación, en lugar de considerar las grietas de forma individual.

4.3.5 Principales zonas industriales

Parte importante para considerar como optima un área para la recarga artificial, es la presencia de una fuente para la obtención de agua a recargar, por consiguiente, la selección de este criterio se realizó considerando que las zonas industriales pueden servir como techos de captación de agua pluvial la cual posteriormente puede ser utilizada para la recarga del acuífero.

En este sentido, las zonas industriales tienen un doble beneficio pues también pueden servir como fuente de agua, a través de sus aguas residuales provenientes de las plantas de tratamiento.

La ubicación de las zonas industriales se realizó a partir de las cartas topográficas de INEGI que comprenden el área del acuífero y de la información disponible en la página del Fideicomiso para el Desarrollo de Parques y Zonas Industriales del Estado de México (FIDEPAR, 2014).

4.4 Identificación de áreas prioritarias para la recarga artificial

Considerando que el objetivo general es la identificación de áreas prioritarias para la recarga artificial en el acuífero del valle de Toluca, la selección de los criterios se basó en la disponibilidad de información.

Una vez que se obtuvieron las capas de información de cada uno de los criterios hidrogeológicos (cinco en total), se analizó cada una y dependiendo de la cantidad de elementos, se utilizó un sistema de puntaje para la valoración de la prioridad de cada uno dentro de la identificación de áreas para la recarga artificial del acuífero.

En el caso de las áreas de abatimiento del nivel del agua subterránea y ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea, se consideraron sus valores originales, debido a que estos en sí mismos reflejan su prioridad para la recarga artificial del acuífero, de esta forma los valores más altos corresponden a aquellas áreas con mayor prioridad para la recarga artificial (Tabla 4.2).

En el caso de la densidad de pozos de extracción, a partir del rango de densidad de pozos/km² se generó una tabla de prioridad para la recarga artificial, quedando con mayor valor el área con una mayor densidad de pozos (Tabla 4.3).

Tabla 4.2. Valores asignados a las áreas de abatimiento y ritmo de abatimiento

	Abatimiento del nivel del agua subterránea (m)	Ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea (m/año)	Prioridad para la recarga artificial
Valor	50	3	Alta
	40		Alta
	30	2	Media
	20	1	Baja
	10		Baja

Tabla 4.3. Reclasificación de la capa de densidad de pozos de extracción

Rango	Densidad	Valor	Prioridad
0-1	Muy baja	0	-
1-3	Baja	1	Baja
3-5	Media	2	Media
>5	Alta	3	Alta

Respecto al área principal de agrietamiento y a las principales zonas industriales se aplicó el método booleano (0 y 1). Donde “0” son áreas en que no se tiene presencia de elementos y “1” son las áreas donde están presentes el área principal de agrietamiento y las principales zonas industriales.

Finalmente se sumaron las capas resultantes, con el con el comando “*raster calculator*”, con lo cual se obtuvieron las áreas prioritarias de recarga artificial, donde los valores presentados oscilan entre 0 y 58. Con el objetivo de identificar mejor las áreas prioritarias para la recarga artificial, se clasificó la capa final en tres categorías alta, media y baja prioridad para la recarga artificial, en la tabla 4.4 se presentan los rangos considerados para la reclasificación de las áreas prioritarias de recarga artificial. El procesamiento de la información se realizó por medio del software Arc Map 10.1 (Figura 4.5).

Tabla 4.4 Rangos de clasificación para las áreas prioritarias de recarga artificial

Rango	Prioridad
1-28	Baja
28-40	Media
40-58	Alta

Para la realización de cada una de estas operaciones fue necesario la conversión de las capas a formato raster, considerando que la longitud del píxel de un archivo cartográfico en formato raster, debe ser la mitad de la longitud más pequeña que sea necesaria para representar todas las existentes en la realidad (Star y Estes, 1990), y que a este elemento se le conoce como unidad mínima cartografiable, es decir, el objeto más pequeño que el ojo humano puede distinguir en un mapa (Salitchev, 1979).

En México se ha usado de manera indistinta área mínima cartografiable de 2 x 2 mm a 6 x 6 mm, hay que señalar que las sugerencias de área mínima deben ser consideradas como una guía y no como un valor absoluto (INECC, 2010), para esta investigación se optó por el valor más pequeño.

La escala de trabajo de esta investigación fue 1:250 000, por lo tanto, partiendo de esta lógica, se tiene que:

1:250 000 = Escala de trabajo.

2 mm = 500 m = Unidad mínima cartografiable.

1 mm = 250 m = Tamaño de píxel (mitad de unidad mínima cartografiable).

Con lo anterior se determinó que el tamaño de píxel fuera de 250 metros por lado.

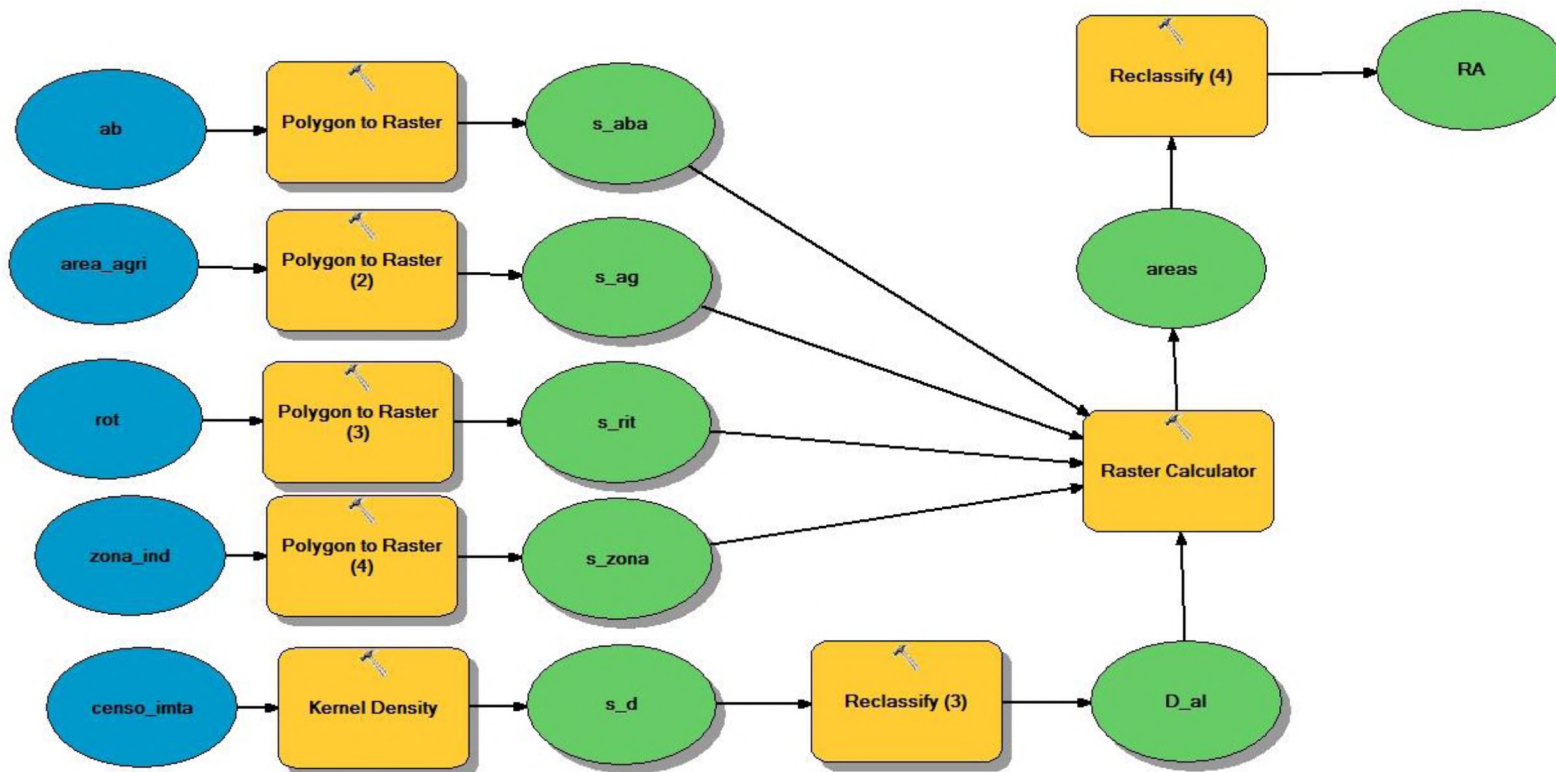


Figura 4.5. Diagrama de álgebra de mapas (elaboración propia).

Capítulo 5.

Análisis y discusión de resultados

5.1 Análisis de información disponible

Una vez que se revisó y analizó toda la información relacionada con esta investigación, se llevó a cabo la organización de la información cartográfica disponible, con el fin de poder capturar, manejar y analizar esta información en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y obtener así un resultado acorde al objetivo del estudio.

5.1.1 Áreas de abatimiento del nivel del agua subterránea

Para conocer el abatimiento generando en el acuífero del valle de Toluca se realizó el cálculo de abatimiento de los niveles de agua subterránea para el periodo 1970-2014 (Tabla 5.1), aplicando la ecuación 1, se obtuvo el abatimiento para los 48 multipiezómetros que se encuentran localizados dentro del acuífero del valle de Toluca.

El abatimiento generado en el periodo 1970-2014 alcanza el máximo abatimiento del área con 58.61 m de descenso de nivel del agua subterránea presentándose en el multipiezómetro número 202 (donde se presenta la concentración de pozos de extracción del corredor industrial Toluca-Lerma) (Figura 5.1), observándose así que el mayor abatimiento se encuentra en la parte centro del acuífero donde se ubicada la zona urbana del valle de Toluca.

Tabla 5.1 Abatimiento de los niveles del agua subterránea 1970-2014.

No. Pozo	Profundidad de la sonda (m)	Nivel 1970 (m)	Nivel 2014 (m)	Abatimiento 1970-2014 (m)
106	148.00	15.96	17.81	1.85
109	100.00	14.96	18.90	3.94
113	114.00	6.23	17.66	11.43
117	107.00	19.11	21.63	2.52
118	135.00	-0.39	15.41	15.80
119	104.00	16.74	18.82	2.08
122	150.00	17.61	11.85	+5.76
126	97.00	2.05	8.80	6.75
128	148.00	18.42	32.22	13.80
130	151.00	17.27	36.51	19.24
137	150.00	28.28	32.27	3.99
140	110.00	16.21	36.81	20.60
141	152.00	64.98	85.75	20.77
142	162.00	56.92	66.69	9.77
143	160.00	-0.84	1.81	2.65
144	128.00	17.92	33.88	15.96
145	188.00	14.09	12.37	+1.72
156	150.00	-0.40	16.84	17.24
162	148.00	18.09	44.29	26.20
163	151.00	19.35	25.31	5.96
164	162.00	43.90	68.16	24.26
165	149.00	36.65	43.26	6.61
169	197.00	46.74	56.79	10.05
170	149.00	81.64	103.01	21.42
171	149.00	FLUYE	FLUYE	FLUYE
175	147.00	FLUYE	FLUYE	FLUYE
176	149.00	FLUYE	FLUYE	FLUYE
177	181.00	4.96	7.60	2.64
179	143.00	14.18	34.99	20.81
201	79.70	24.96	70.94	45.98
202	150.00	11.99	70.51	58.61
203	148.00	8.65	10.60	1.95
205	150.00	13.25	56.53	43.28
206	131.00	5.24	19.25	14.01
209	122.00	17.14	38.10	20.96
212	138.00	4.96	21.10	16.14
218	55.00	13.01	24.61	11.60
226	156.00	31.15	45.71	14.56
358	150.00	24.36	32.29	7.93
359	150.00	19.29	23.16	3.87
364	160.00	35.50	36.33	0.83
367	126.00	15.83	19.44	3.61
369	130.00	3.31	33.81	30.50
230	143.00	29.81	65.16	35.35
231	139.00	19.36	33.21	13.85
232	156.00	11.96	38.70	26.74
303	137.50	15.32	43.69	28.37
307	118.00	2.30	42.54	40.24

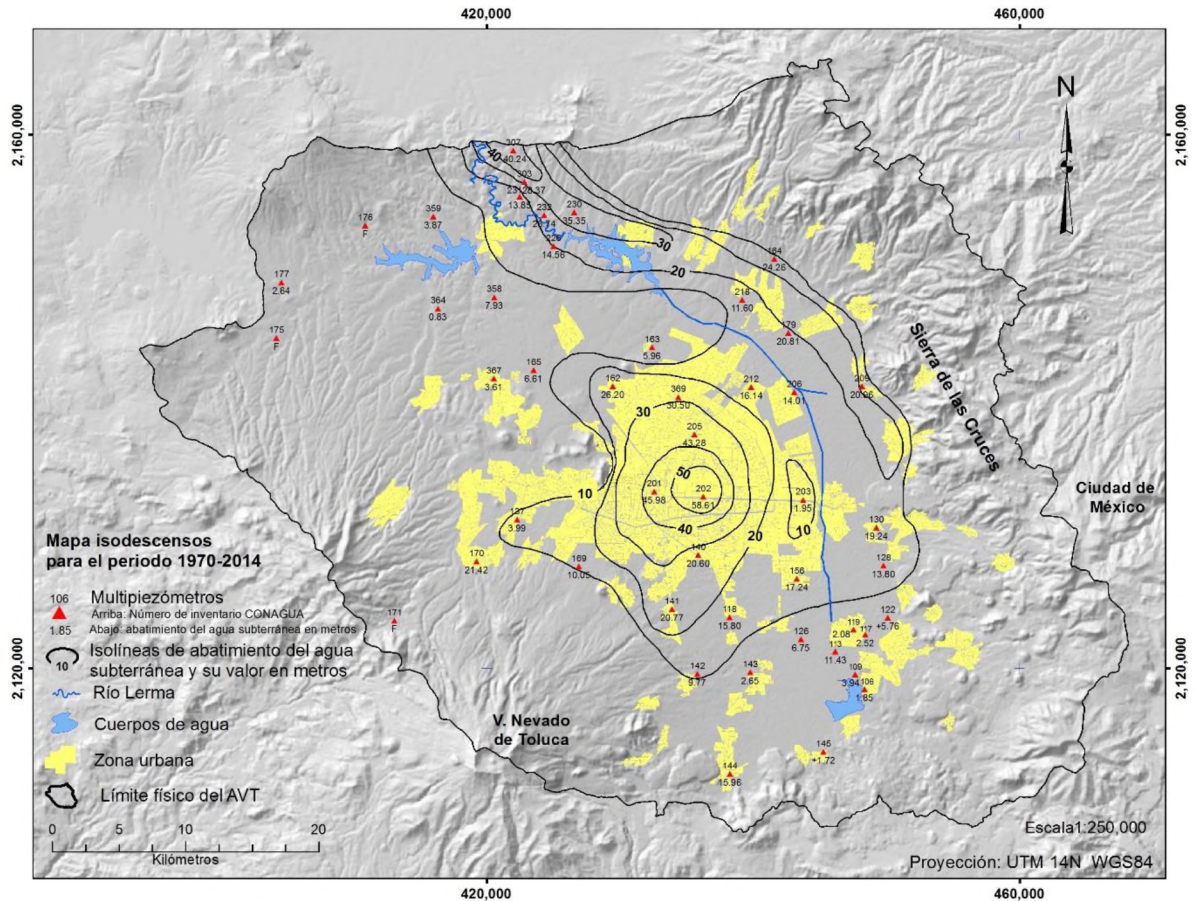


Figura 5.1 Isolíneas de abatimiento del nivel del agua subterránea para el periodo 1970-2014.

En el acuífero sobresalen dos zonas donde se registran los mayores abatimientos, siendo; la primera zona la que se visualiza sobre la zona metropolitana del valle de Toluca (abatimientos mayores a 50 m), mientras que la segunda zona se presenta en la parte norte del acuífero con abatimientos mayores a 40 m en la colindancia con el valle Atlacomulco-Ixtlahuaca.

En el área de la colindancia con el valle Atlacomulco-Ixtlahuaca, el multipiezómetro número 307 localizado en el municipio de Ixtlahuaca presenta un abatimiento acumulado con 40.24 m. En los municipios de Lerma, Toluca, Temoaya, Otzolotepec y Xonacatlán el abatimiento promedio es de 20 m. Se puede observar que esta última área coincide con la ubicación de la red de pozos

del Sistema Lerma, los cuales pueden influir de manera significativa en la modificación del nivel del agua original del acuífero. Estos valores disminuyen también de manera gradual hacia Almoloya de Juárez.

Además para el periodo 1970-2014 se observa que los multipiezómetros 122 y 145 (se localizan en la parte sureste del AVT) presentan una recuperación (+) del nivel del agua subterránea, en estos se presentan valores positivos que no superan en promedio los 4 m/año.

5.1.2 Ritmo de abatimiento del nivel del agua subterránea

El ritmo de abatimiento permite analizar la velocidad del proceso de abatimiento del nivel piezométrico para el periodo 2010-2014 (Tabla 5.2).

En este periodo de análisis, las tasas anuales de descenso del agua subterránea no superan los 0.02 m/año (multipiezómetro 177) en la parte Noroeste del acuífero. Sin embargo, en la porción centro del AVT, específicamente en la zona metropolitana del valle de Toluca sobresalen de isodescensos de: 1.0, 2.0 y 3.0 m/año (Figura 5.2).

Los ritmos de abatimiento más altos resaltan en el municipio de Toluca y Metepec con 3.0 m/año y en el municipio de Lerma con 1.0 m/año en el periodo analizado, lo que demuestra que existe una explotación intensiva extrema del recurso en el área de estudio, convirtiéndose en un zona de posibles efectos negativos en el centro de la ZMVT (Municipio de Toluca, Metepec y Zinacantepec).

También se pueden observar áreas que presentan una recuperación (+) de nivel del agua subterránea para el periodo 2010-2014, estas se localizan en la parte noroeste y sureste del AVT. En estas áreas se presentan valores positivos que no superan en promedio el 1 m/año.

El resto de los multipiezómetros no presentan niveles significativos de descensos es por eso que no se hace mención de ellos.

Tabla 5.2 Ritmo de abatimiento de los niveles del agua subterránea 2010-2014.

No. Pozo	Profundidad de la sonda (m)	Nivel 2010 (m)	Nivel 2014 (m)	Ritmo de abatimiento 2010-2014
106	148.00	17.16	17.81	0.16
109	100.00	21.54	18.90	+0.66
113	114.00	17.29	17.66	0.09
117	107.00	20.70	21.63	0.23
118	135.00	14.47	15.41	0.24
119	104.00	23.31	18.82	+1.12
122	150.00	11.90	11.85	+0.01
126	97.00	7.30	8.80	0.37
128	148.00	26.62	32.22	1.40
130	151.00	34.93	36.51	0.40
137	150.00	40.91	32.27	+2.16
140	110.00	36.53	36.81	0.07
141	152.00	86.31	85.75	+0.14
142	162.00	65.42	66.69	+0.32
143	160.00	1.68	1.81	0.03
144	128.00	38.51	33.88	+1.16
145	188.00	20.62	12.37	+2.06
156	150.00	14.31	16.84	0.63
162	148.00	37.01	44.29	1.82
163	151.00	25.28	25.31	0.01
164	162.00	69.97	68.16	+0.45
165	149.00	42.99	43.26	0.07
169	197.00	55.62	56.79	0.29
170	149.00	101.16	103.01	0.48
171	149.00	FLUYE	FLUYE	FLUYE
175	147.00	FLUYE	FLUYE	FLUYE
176	149.00	FLUYE	FLUYE	FLUYE
177	181.00	7.53	7.60	0.02
179	143.00	33.99	34.99	0.25
201	79.70	70.80	70.94	0.04
202	150.00	54.59	70.51	3.98
203	148.00	14.99	10.60	+1.10
205	150.00	56.30	56.53	0.06
206	131.00	18.87	19.25	0.09
209	122.00	37.84	38.10	0.07
212	138.00	20.25	21.10	0.21
218	55.00	24.00	24.61	0.15
226	156.00	46.97	45.71	+0.32
358	150.00	31.27	32.29	0.26
359	150.00	23.92	23.16	+0.19
364	160.00	36.46	36.33	+0.03
367	126.00	18.41	19.44	0.26
369	130.00	29.565	33.81	1.06
230	143.00	64.73	65.16	0.11
231	139.00	35.89	33.21	+0.67
232	156.00	37.99	38.70	0.18
303	137.50	43.51	43.69	0.05
307	118.00	43.46	42.54	+0.23

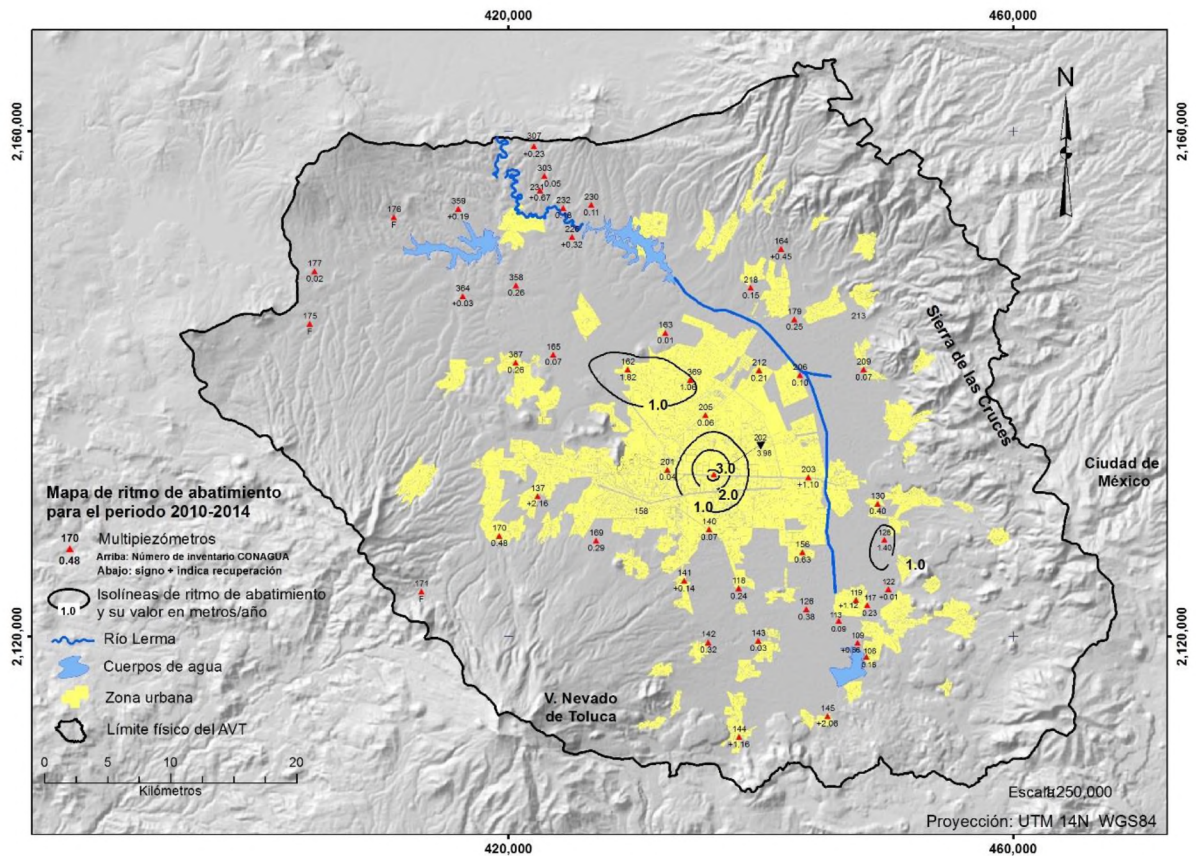


Figura 5.2 *Isolíneas de ritmo de abatimiento para el periodo 2010-2014.*

5.1.3 Densidad de pozos de extracción

La densidad de pozos es definida como el número de pozos por unidad de superficie. La base de datos de pozos de extracción elaborada por el IMTA (2009) se empleó para calcular la densidad, la cual fue estimada como el número de pozos por km².

En esta investigación la densidad obtenida fue clasificada en cuatro clases (con valores que varían de 0 a 6.5 pozos/km²), con la finalidad de visualizar y localizar las zonas con mayor densidad de pozos en el área de estudio (Tabla 5.3). Las áreas con mayor densidad de pozos (5 a 6.5 pozos/km²) sobresalen en el centro del área de estudio, en la ciudad de Toluca y la zona industrial en donde se tiene un mayor número de pozos de extracción (Figura 5.3).

Tabla 5.3. Clasificación de la densidad de pozos de extracción (pozo/km²).

Rango	Densidad
0-1	Muy baja
1-3	Baja
3-5	Media
>5	Alta

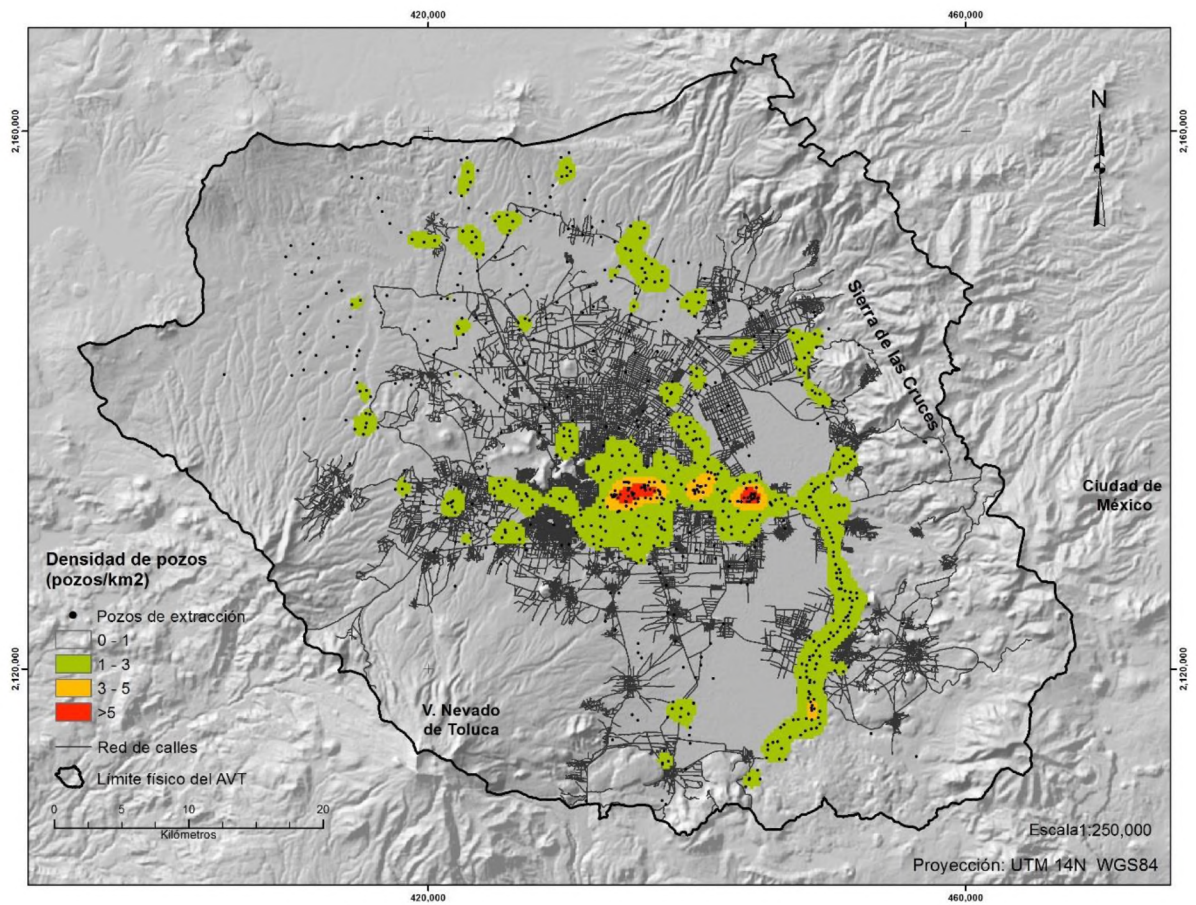


Figura 5.3. Densidad de pozos de extracción en la región del AVT.

5.1.4 Área principal de agrietamiento

En la zona de estudio, en años recientes la Unidad de Protección Civil del Ayuntamiento de Toluca se ha dado a la tarea de ubicar los agrietamientos presentes en dicho municipio, a partir de los reportes que realiza la población, sin embargo en el resto de los municipios de la región del acuífero no se han enfocado al registro y ubicación de estos fenómenos, además debido a lo difuso de este fenómeno, es complicado contar con un registro completo de las zonas afectadas (Paredes, 2010).

En las últimas décadas analizadas se observa que este fenómeno se ha acelerado en el AVT, provocando grandes daños a la infraestructura urbana (calles, viviendas, red de agua potable, red de alcantarillado, cableado, etc.). El área de agrietamiento principal sobresale en la zona metropolitana del valle de Toluca (Figura 5.4).

Este factor puede crecer en área debido a la incidencia de los descensos de los niveles del agua subterránea, en el área central.

5.1.5 Principales zonas industriales

El Estado de México ha impulsado la atracción de inversión tanto en la micro, pequeña y mediana empresa, apoyando la consolidación de la infraestructura en los parques y corredores industriales de la entidad, por lo cual cuenta con una industria manufacturera ampliamente diversificada, en industrias como:

- Automotriz
- Textil
- Sustancias Químicas
- Elaboración de Productos de Plástico
- Industria Refresquera
- Productos Alimenticios para el consumo Humano y en Ensamble
- Fabricación de Artículos Eléctricos

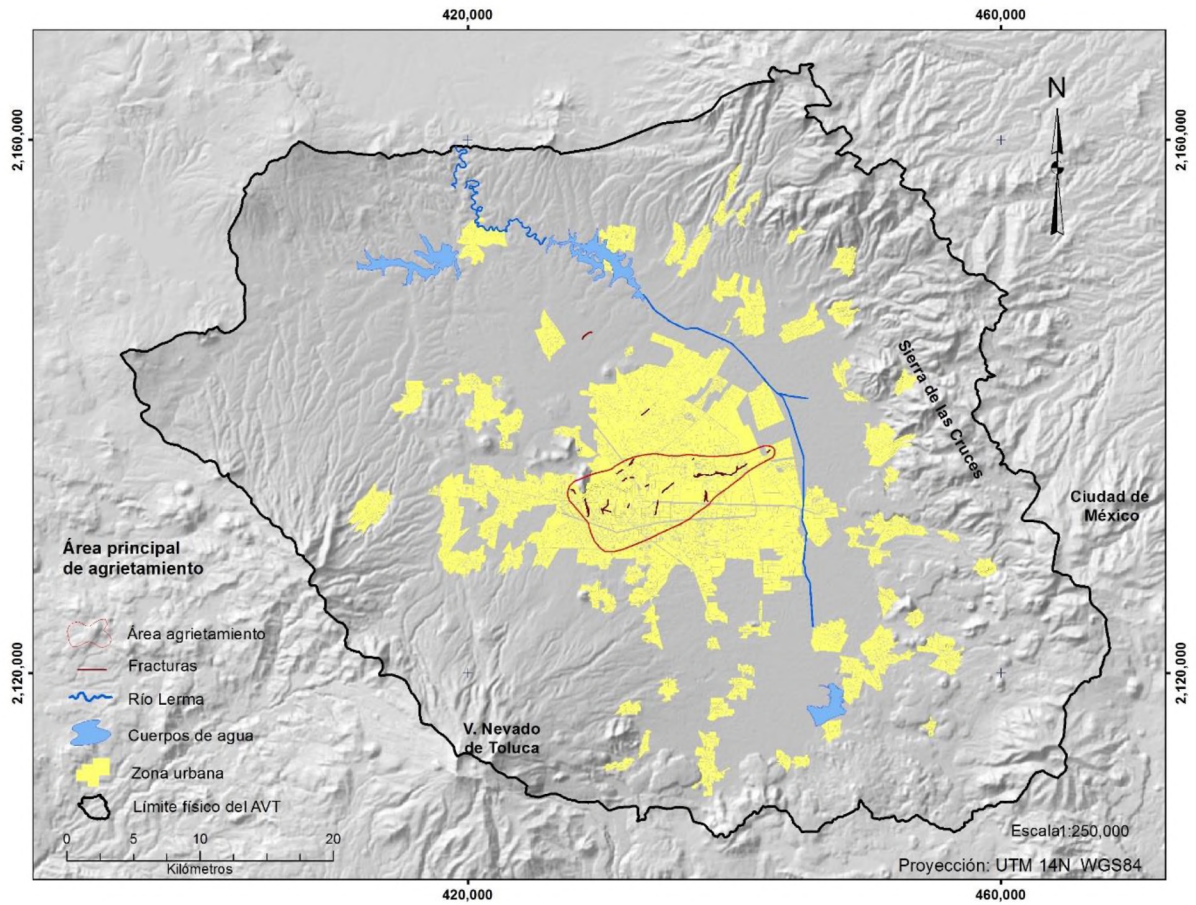


Figura 5.4 Área principal de agrietamiento en la región del AVT (Paredes, 2010).

La concentración de estas industrias requiere un fuente de agua que permita su desarrollo, es por ello que al ser dependientes de la disponibilidad del agua subterránea, estas zonas industriales son el punto principal para tomarse como centros de captación de agua pluvial para ser utilizada posteriormente un sistema de recarga artificial.

En el acuífero del valle de Toluca las zonas industriales más grandes se localizan en la zona centro, noreste, y en menor medida en el sureste de la región (Figura 5.5). Las zonas y parques industriales que se localizan en la

región del acuífero son: San Cayetano, Toluca, Toluca INN, Lerma, el Cerrillo I y II, Expotecc I y II, Toluca 2000, del Valle, Santiago Tianguistenco, San Antonio la Isla.

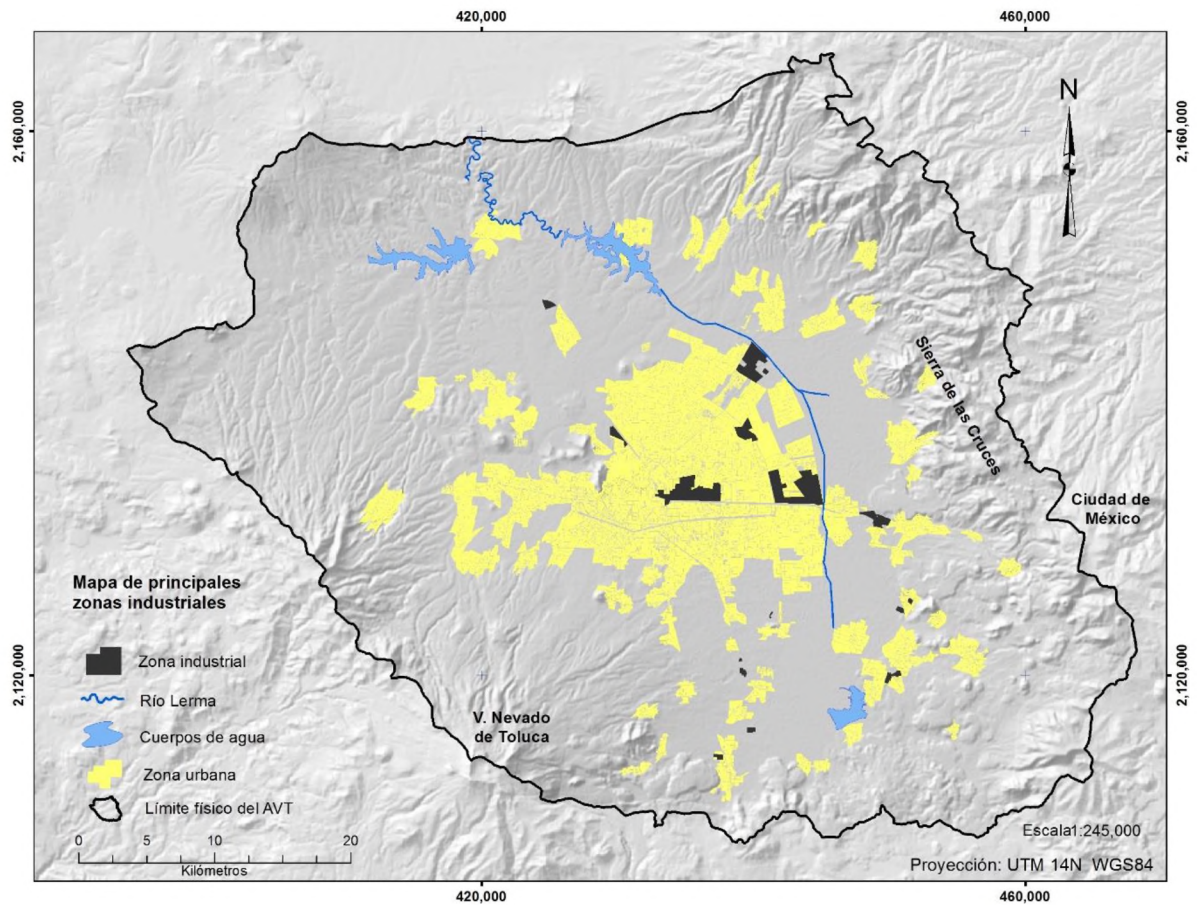


Figura 5.5 Principales zonas industriales de la región del AVT.

5.2 Identificación de las áreas prioritarias para la recarga artificial

Considerando los criterios anteriores, se elaboró la cartografía de las áreas prioritarias para la recarga artificial del acuífero del valle de Toluca, una vez que se obtuvieron las cinco capas necesarias para la identificación de las áreas se realizó la suma de mapas, obteniendo como resultado tres áreas: alta, media y baja prioridad (Figura 5.6).

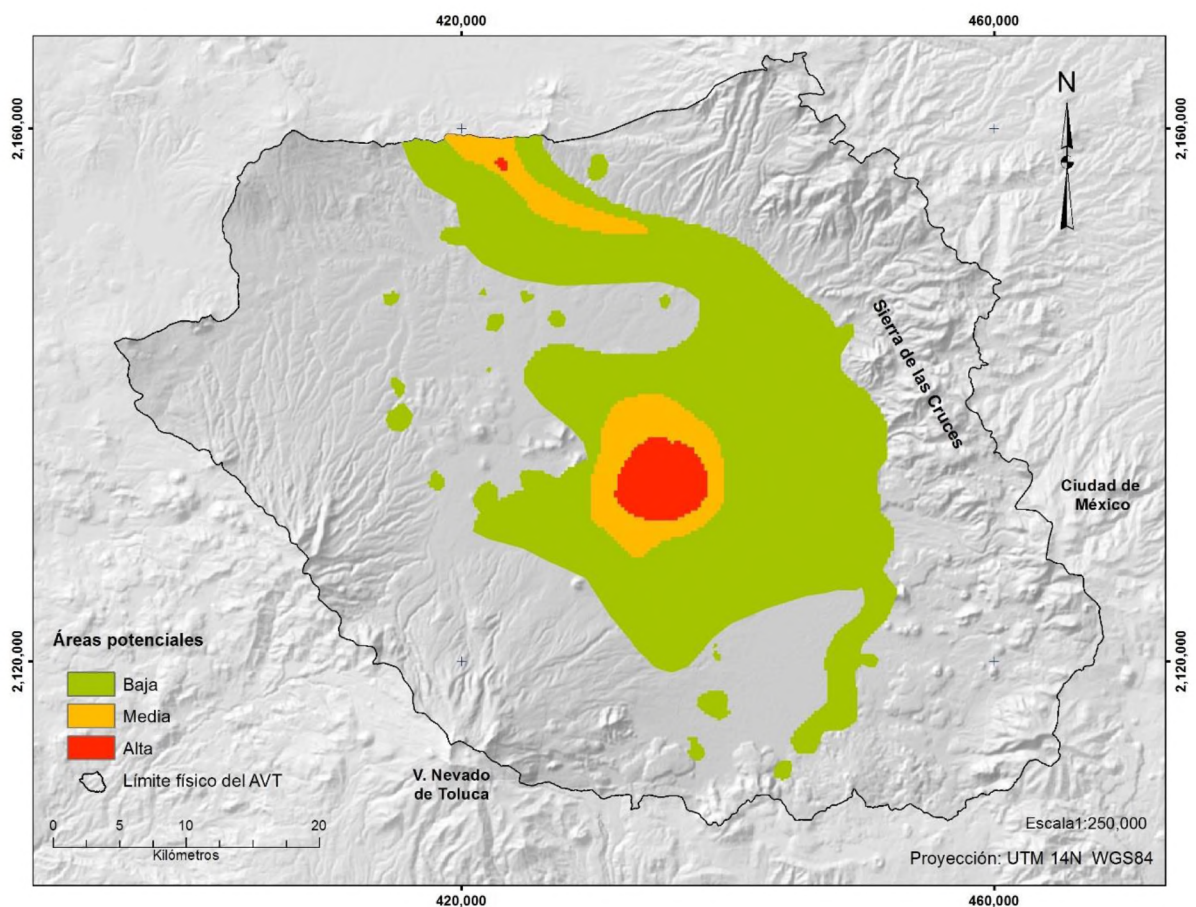


Figura 5.6 Áreas prioritarias para la recarga artificial en la región del AVT.

A continuación se hace la descripción de dichas áreas:

Áreas de alta prioridad (rojo): Son las áreas donde coinciden los cinco criterios utilizados, además es donde se presentan los mayores niveles de abatimiento (40 y 50 m), ritmo de abatimiento (3.0 m/año), densidad de pozos de extracción (>5 pozos/km²), y está el área principal de agrietamiento del acuífero. Es por ello que esta es el área de mayor prioridad para comenzar con trabajos de recarga artificial, para disminuir los efectos de la alta extracción de agua. Estas áreas se encuentran principalmente en el centro del acuífero y una pequeña área en el norte del acuífero, abarcando un área de 35 km², (representando el 1.3% del área total del acuífero). El área ubicada en el centro del acuífero abarca (parcialmente) dos municipios el de Toluca, Metepec, y coincide con la ubicación del parque industrial Zona Industrial Toluca (Figura 5.7) el área ubicada al norte del acuífero se localiza en el municipio de Ixtlahuaca.

Presentan un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, tiene una precipitación de 800 mm a 1000 mm, esta característica debe considerarse ya que el agua pluvial es una fuente potencial para abastecer el sistema de recarga que se desee implementar. El tipo de suelo presente en esta área es feozem haplico (textura gruesa). La mayor parte de la área es zona urbana, solo la pequeña porción al norte es zona agricultura de temporal. La geología del lugar es aluvión, compuesto por gravas, arenas, arcillas y limos con interestratificaciones de ceniza volcánica. La estratigrafía, obtenida de las columnas litológicas de los multipiezómetros localizados en el área, se caracteriza por intercalaciones de arena y arcillas principalmente (Multipiezómetros, 201 y 202).

La principal desventaja de esta área se debe a que se localiza en la zona urbana del acuífero, lo cual reduce el espacio para la ubicación de un sistema superficial de recarga artificial, para esto es necesario que el agua a recargar cumpla con los límites permisibles especificados en la NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, es importante considerar también que el costo de este tipo de infraestructura puede ser elevada,

asimismo, se recomienda que se realicen análisis más detallados que ayuden a determinar el lugar específico para aplicar el sistema de recarga, ya que al ser está el área con mayor densidad de pozos, es necesario vigilar el tiempo de reposo que tendrá el agua recargada garantizando su calidad antes de ser extraída nuevamente para los diversos usos.

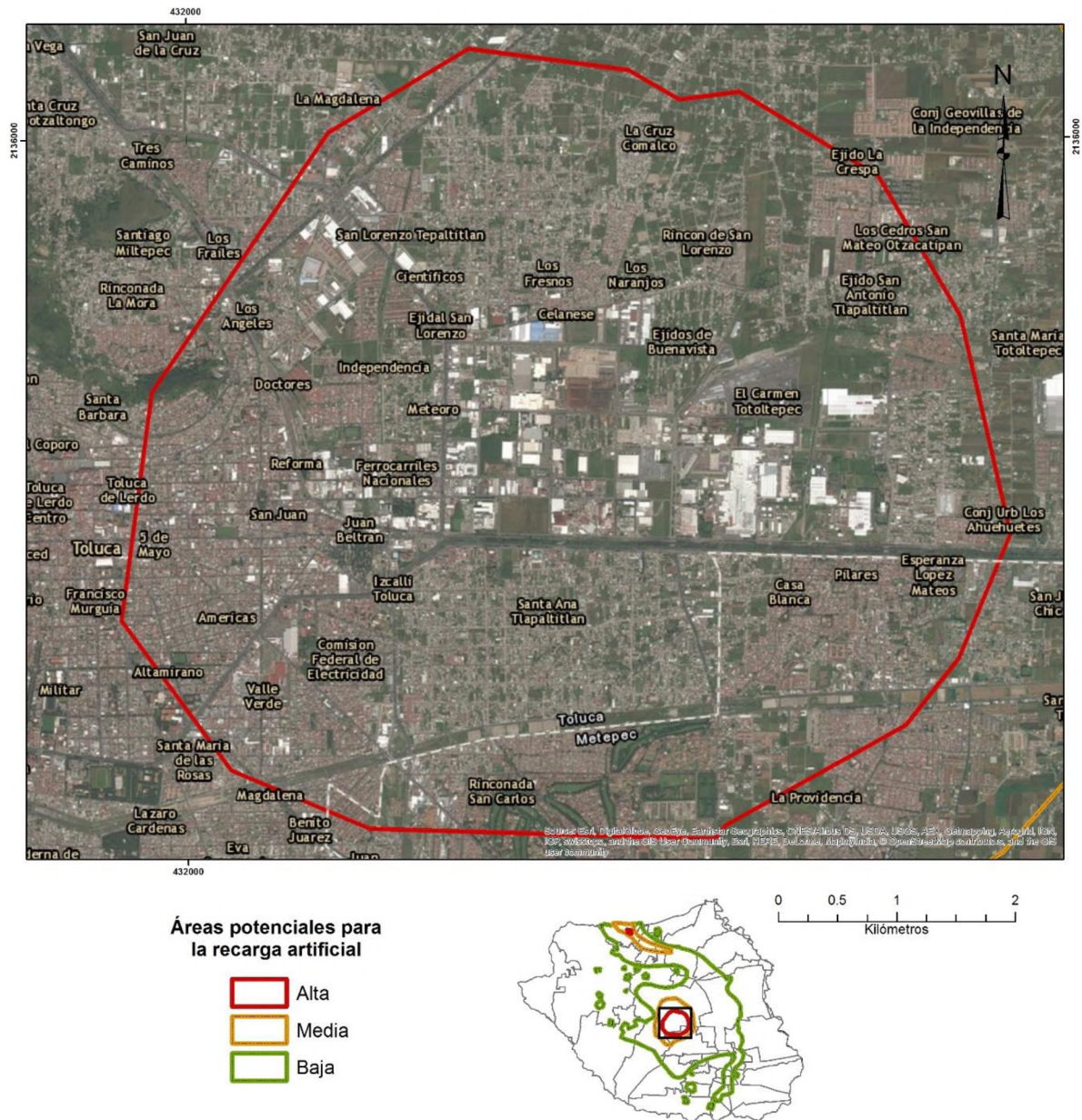


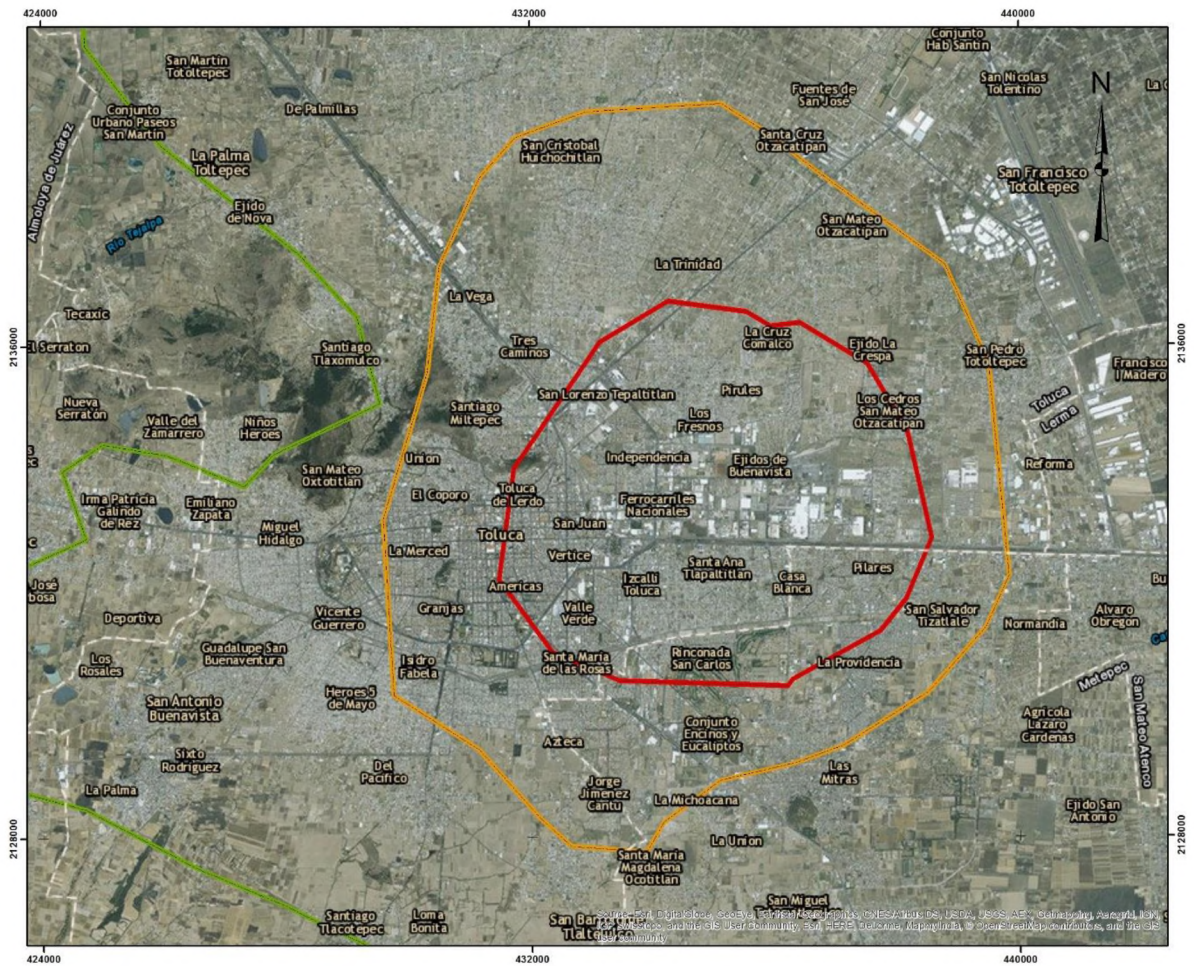
Figura 5.7 Área de alta prioridad para la recarga artificial

Áreas de media prioridad (amarillo): en estas zonas se presentan de cuatro a tres de los criterios seleccionados, en esta área los valores de abatimiento van de 20 a 30 metros, el ritmo de abatimiento es de 1.0 m/año, la densidad de pozos es de 3 a 5 pozos por km².

Estas áreas se presentan en la parte central y al norte del acuífero, rodeando a las áreas de alta prioridad, en la parte norte se encuentran en el área de colindancia con el acuífero de Ixtlahuaca-Atlacomulco, en los municipios de Ixtlahuaca y Temoaya, en total representan el 3.2% del área acuífero (88 Km²) (Figura 5.8).

Estas áreas se caracterizan por la presencia del clima templado subhúmedo con lluvias en verano, abarcando dos tipos de suelo que son el feozem y el vertizol. La geología de las áreas, que se encuentran alrededor de las zonas de alta prioridad presenta aluvión, compuesto por gravas, arenas, arcillas y limos con interestratificaciones de ceniza volcánica y sedimentos lacustres, las áreas localizadas al norte del acuífero presentan sedimentos lacustres que incluyen conglomerado, areniscas y limolita semiconsolidados, interestratificados con capas de toba, pómez y diatomita. La estratigrafía, muestra que las áreas del centro del acuífero presentan componentes más gruesos como las gravas y conglomerados (Multipiezómetros 140 y 158). El uso de suelo en estas áreas es en su mayoría agricultura de temporal y riego, seguido por la zona urbana.

Áreas de baja prioridad (verde): es el territorio dentro del acuífero en el que se presentan de uno a dos de los criterios, cuenta con valores de abatimiento de 10 m, una densidad de pozos de 1 a 3 pozos/km², pero no por eso es menos importante, ya que son las áreas que cubren mayor parte del acuífero además en estas áreas está la zona donde se localiza la batería de pozos que abastecen a la Ciudad de México, en esta zona se puede comenzar con pequeñas trabajos de recarga artificial con la finalidad de impedir que el abatimiento del agua sea mayor y con esto evitar la aparición de futuros agrietamientos en el terreno (Figura 5.9).



Áreas potenciales para la recarga artificial

- Alta
- Media
- Baja

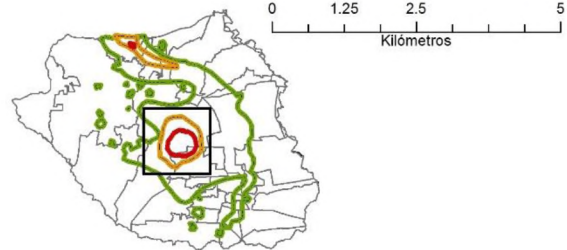


Figura 5.8 Áreas prioritarias para la recarga artificial en la ZMVT.

El municipio a resaltar en esta área es San Mateo Atenco, ya que es conocido que en temporadas de lluvia sufre de inundaciones recurrentes, la aplicación de una técnica de recarga artificial usando agua pluvial, además de brindar una disponibilidad de agua, se puede disminuir el riesgo a inundaciones.

Tienen un área total de 655 km², (representando el 23. 7% del total del acuífero). Se caracteriza por un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, presentan suelos del tipo vertizol, feozem, y planosol. La geología de las áreas es aluvión, compuesto por gravas, arenas, arcillas y limos con interestratificaciones de ceniza volcánica y sedimentos lacustres. El uso de suelo es en su mayoría agrícola (temporal y riego) y uso pecuario.

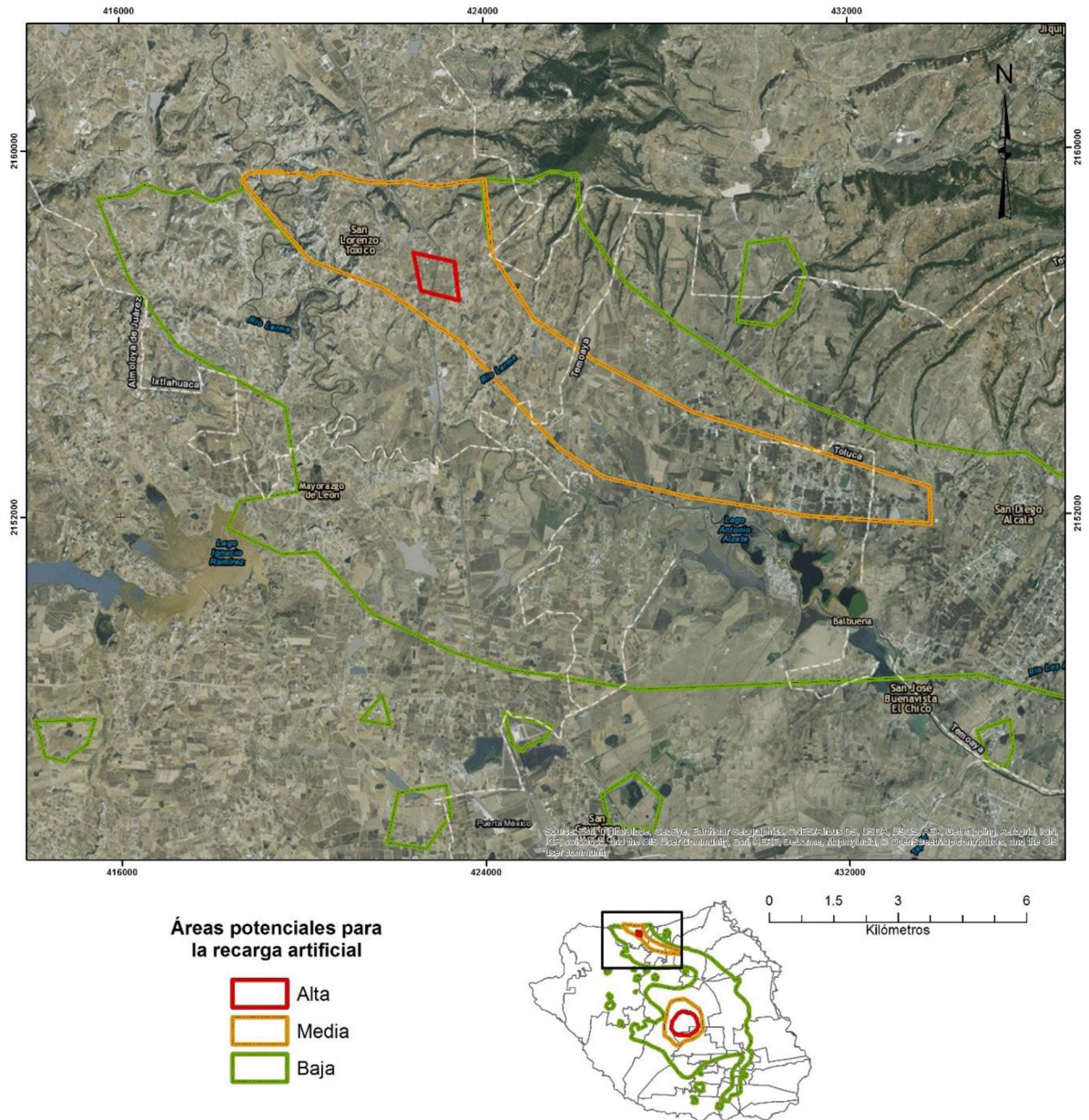


Figura 5.9 Áreas prioritarias para la recarga artificial al norte del AVT.

5.3 Propuesta de sistema de recarga artificial

De todos los sistemas de recarga, existen varios que podrían emplearse en las tres áreas identificadas, tanto superficiales (estanques, piletas o zanjas de infiltración) como profundos (pozos profundos, sondeos) o sistemas mixtos (subsuperficiales, pozos de secos o estanques profundos).

Además, que las áreas cuenten con características similares, permite que el sistema de recarga que se plantea pueda ser aplicado a todas, también el bajo costo de construcción y mantenimiento hace que los *pozos de absorción (pozos secos o de infiltración)* sean el sistema de recarga que se propone.

A pesar de ser el mismo sistema propuesto para las tres áreas, las dimensiones de cada pozo deberán estar en función de la precipitación (intensidad y duración) presente en cada área, la profundidad de la capa con mayor permeabilidad y la disponibilidad de terreno.

Se plantea la recolección de agua de lluvia (a pesar de no ser potable, posee una gran calidad, ya que contiene una concentración muy baja de contaminantes en comparación con otras fuentes de suministro) como fuente de abastecimiento del sistema de recarga. Además, que el aprovechamiento de esta puede evitar que en meses con tormentas se generen inundaciones principalmente en las zonas urbanas. Con esto se cumple con los rubros que tienen que ver con el origen del agua, la calidad química y distancia entre la fuente y sitio de recarga.

La calidad del agua pluvial cosechada depende principalmente de dos factores: las condiciones atmosféricas (partículas suspendidas, metales pesados, microorganismos y sustancias orgánicas) y las características de la superficie de captación (contaminación fecal de aves, pequeños mamíferos y reptiles que son barridos durante la precipitación, el material con el que esté fabricada la superficie de captación también tiene gran influencia en la calidad del agua de lluvia cosechada) (Helmreich y Horn, 2009; Farreny et al., 2011).

Entonces, los techos fabricados con acero galvanizado son los más adecuados para su aplicación como superficies de captación de agua pluvial, mostrando una buena calidad fisicoquímica, en este caso al ser los techos de las zonas industriales se espera que estén hechos de este material. Su principal inconveniente es una potencial contaminación por metales. En cuanto a la calidad microbiológica del agua cosechada, los techos fabricados en acero galvanizado y tejas de barro presentan los mejores rendimientos (Mendez et al., 2011).

Considerando lo anterior, para garantizar la calidad del agua que va a ser infiltrada se requiere un proceso de tratamiento primario que retire estos contaminantes; además de retener residuos sólidos, arenas gruesas, grasas y aceites, lo cual a su vez, ampliará la vida útil del pozo al evitar la colmatación de los poros de infiltración; así como sus periodos de mantenimiento, reduciendo los costos que esto podría llegar a implicar.

El número de filtros variara conforme al caudal que se pretende recolectar para su posterior recarga, una vez que el agua ha pasado por estos filtros ira finalmente al pozo de absorción. Ya que la calidad de agua pluvial es aceptable y además se puede aprovechar las características el terreno para mejorar la calidad del agua, algunos de los filtros por los que debe pasar son:

1. Separador de “primera lluvia”: Dentro del sistema de captación debe de contarse con una válvula que sirva para desviar esta al sistema de drenaje urbano, ya que esta al ser la primera lluvia puede contener un mayor número de contaminantes, además que sirve como limpieza de la superficie de captación, evitando la infiltración de esta agua, se aumenta la calidad del agua recargada.

2. Cisterna de almacenamiento: Este elemento tiene la función de retener el agua captada y al mismo tiempo fungir como superficie de sedimentación. Las dimensiones dependerán de los datos de precipitación y (en el caso que no se cuente con suficiente espacio, el agua captada se dirigiría directamente al filtro de retención de basura) de la capacidad del siguiente filtro. Por medio de un orificio o

una válvula de regulación, el agua pasará de forma dosificada de la cisterna al filtro.

3. Filtro de retención de basuras: La función de este es filtrar el agua retirando residuos sólidos, esto se puede realizar por medio de mallas, donde las medidas dependerán del tipo de residuos que se encuentren en la zona de captación.

4. Filtro de captura grasas. En este filtro el paso a la siguiente etapa debe de efectuarse mediante tubos cuya entrada se encuentre por debajo del nivel del agua (30 cm aprox.), con lo que se evita el paso de grasas, mismas que quedaran flotando sin poder pasar a la siguiente etapa.

5. Desinfección: Este filtro está en función de la calidad del agua, es por ello que primero es necesario realizar un análisis del agua captada para determinar, si este filtro es requerido. En el caso de que sea necesario, la desinfección servirá para eliminar todos los coliformes fecales y así cumplir con lo estipulado en la NOM-015-CONAGUA-2007. La desinfección se puede realizar por diversos medios que puede ser desde cloración hasta de radiación UV, entre los más sencillos.

Posteriormente, el agua pasa al pozo de absorción, que debe estar conformado con una tubería de hormigón y asentada sobre una base de material grueso (gravillas y arenas gruesas) favoreciendo la infiltración y disminuyendo los costos de mantenimiento en caso de obstrucción.

Como es conocido el principal problema que afecta a los sistemas de recarga disminuyendo la capacidad de infiltración es la colmatación del terreno, es por esto que para poder retrasar lo más posible o en el mejor de los casos evitar el este problema en los pozos de absorción, es necesario la vigilancia y el mantenimiento periódico con el fin de mejorar la vida útil del pozo.

Ya que el agua a utilizar es la pluvial, las principales acciones que deben tomarse es la reducción de solidos suspendidos, a través de la creación de un tanque de

sedimentación, además de aplicar la desinfección con cloro para disminuir la actividad biológica.

Asimismo dependiendo de la profundidad de del pozo, un método que puede ser útil para contrarrestar este problema, es dejar que el pozo se seque y posteriormente retirar la capa que impide la infiltración del agua, en este caso la época de estiaje, puede tomarse como periodo de mantenimiento, para que al comenzar la época de lluvias los pozos tengan la mayor capacidad de infiltración posible.

Si bien estas medidas, pueden aplicarse de forma generalizada, es importante que se realice una prueba piloto para que a partir de los resultados obtenidos se puedan tomar medidas personalizadas para contrarrestar los problemas ocasionados por la colmatación, lo que mejorara el éxito del sistema de recarga.

Aunque hay que tener en cuenta que siempre se presentara este problema por muchas medidas que se tomen. Se trata, por tanto, de reducirlo en la medida de lo posible.

Conclusiones y recomendaciones

Si bien es cierto que la recarga artificial es una técnica que se ha utilizado desde la antigüedad, el desarrollo científico y tecnológico brinda un nuevo enfoque a esta técnica, ya que con el uso de nuevas herramientas como los sistemas de información geográfica, la implementación de la recarga artificial puede estar planificada desde el comienzo generando un índice alto de éxito en los proyectos emprendidos. Ya que, el conocer los aciertos y errores de otros sistemas de recarga efectuados, permite un avance significativo, y entre más proyectos sean implementados mayor será el área de conocimiento, creando un mayor beneficio en cuanto a la recarga de acuíferos favoreciendo la disponibilidad de agua para los diversos usos.

A partir del análisis de la información recabada sobre la recarga artificial, se tiene que es una técnica de gestión integral del agua con gran potencial, y su utilización ha ido en crecimiento en la última década en México. Aunque deben emplearse mayores esfuerzos por parte de las autoridades hídricas para explotar todo el potencial de esta técnica y hacer que la población conozca y favorezca su aplicación.

Con la información cartográfica del área de estudio se conformó una base de datos manipulable por medio de un sistema de información geográfica, esta información se relaciona con la geología, hidrología, agrietamientos del área de estudio. También se cuenta con la base de datos correspondiente a la evolución histórica de los niveles piezométricos del agua subterránea.

En esta investigación se realizó la descripción de las características geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, edafológicas, climatológicas y socioeconómicas del AVT, lo cual permitió conocer más el modelo conceptual del acuífero, esto facilitó

realizar la selección de los criterios hidrogeológicos que sirvieron para la identificación de las áreas prioritarias para la recarga artificial en el acuífero.

Los criterios utilizados en esta investigación fueron: abatimiento de los niveles del agua subterránea, el ritmo de abatimiento, densidad de pozos, área principal de agrietamiento, y principales zonas industriales. Dichos criterios no son los únicos que pueden utilizarse, ya que dependiendo de la información disponible se pueden considerar criterios como: pendiente del terreno, tipo de vegetación, tipo de suelo, permeabilidad del terreno.

Una vez obtenidos todos los criterios hidrogeológicos, se realizó la aplicación del álgebra de mapas con ayuda de un SIG, obteniendo las áreas prioritarias para la recarga artificial en el acuífero del valle de Toluca, clasificando las áreas en tres categorías alta, media, baja prioridad para la recarga artificial.

Las áreas de alta prioridad sobresalen en la porción centro del acuífero, específicamente en la Ciudad de Toluca, que es donde se tienen los mayores niveles de abatimiento del agua subterránea, así como una pequeña parte en la parte norte en la colindancia con el acuífero del valle de Atlacomulco-Ixtlahuaca.

Posteriormente, una vez obtenidas las áreas prioritarias de recarga artificial, se realizó la descripción de cada una de ellas, identificando similitudes entre estas, permitiendo la realización de una propuesta de sistema de recarga, el cual consiste en pozos de absorción, siendo el agua pluvial la fuente de abastecimiento que se propone para el sistema de recarga.

Por último, la metodología permitió identificar áreas prioritarias para la recarga artificial, y actuó como un primer filtro sobre el cual se debe recabar más información.

A partir de los resultados obtenidos se presentan las siguientes recomendaciones:

Aplicar un análisis más detallado de las áreas que se obtuvieron con una alta prioridad para la recarga artificial, incorporando trabajos de campo.

Realizar una serie de perforaciones de exploración profunda para poder determinar con mayor exactitud la litología y su posición estratigráfica.

Realizar la estimación del volumen total disponible de agua para la recarga artificial, considerando la duración e intensidad de la precipitación, además de las pérdidas por evaporación.

Implementar los multipiezómetros de control, lo recomendable es que sean cinco multipiezómetros por cada pozo, zanja, laguna o el sistema que se desee implementar, esto con la finalidad de monitorear, cada uno de los puntos cardinales y además el quinto multipiezómetro se localizara a 50 m en dirección del flujo subterráneo.

Efectuar un análisis costo-beneficio que permita determinar la factibilidad de la recarga artificial, donde se incluyan aspectos económicos, sociales y ambientales.

Llevar a cabo la inclusión de todos los sectores que utilizan el agua para sus diversos usos, asimismo se el sector industrial es agente clave que debe considerarse en la implantación de un sistema de recarga, ya que puede ser parte importante del financiamiento.

Considerar la recarga artificial dentro del pago de servicios ambientales-hidrológicos, siendo un incentivo que favorecerá la aceptación y aplicación de la recarga en la población.

Para cumplir con las normas que regulan la recarga artificial, es necesario realizar primero una prueba piloto, utilizando infraestructura pequeña y volúmenes de agua bajos pero que sean los suficientes para considerar de manera adecuada todos

los factores involucrados en la recarga, permitiendo detectar los errores que pueden llevar al fracaso el sistema de recarga.

En caso, de contar con una fuente con buena calidad del agua, pueden comenzarse trabajos en campo para identificar pozos de extracción, que estén fuera de uso, para poder aprovechar la infraestructura y utilizarlos como pozos de recarga.

Bibliografía

Academia Nacional de Ciencias (ANC). 2008. "El agua potable segura es esencial. México". [En línea] <<http://www.drinking-water.org/html/es/Sources/Artificial-Recharge.html>> [Consulta: enero, 2015]

Álvarez R, Mendoza E. Espinoza J. M. 2011. "Proyecto de recarga artificial del acuífero con agua tratada del módulo experimental de tratamiento terciario en la zona federal del Lago de Texcoco". Instituto de Geología, UNAM

Anaya, G. M., 2011. Captación del agua de lluvia. Solución caída del cielo. México: Colegio de Postgraduados

Angeles-Serranoi, G., Perevochtchikova, M. y Carrillo-Rivera, J. J. 2008. "Posibles controles hidrogeológicos de impacto ambiental por la extracción de agua subterránea en Xochimilco, México". *Journal of Latin American Geography*. 7 (1): 39-56

Ariel Consultores, S.A. 1996. "Estudio de simulación hidrodinámica y diseño de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca". Gerencia de Aguas Subterráneas, CNA. Reporte interno

Carabias, J., Landa, R., Collado J., y Martínez P. 2005. "Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México". México, D.F: Universidad Nacional Autónoma de México: Colegio de México: Fundación Gonzalo Río Arronte

Carreón, D.C., Hidalgo, C.M., y Hernández, M. 2006. Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número especial de Geología Urbana, 58(2), 237-250.

Cháves, R. 2011. "Casos de recarga artificial en México". Jornadas técnicas de recarga artificial y reusó de agua". CONAGUA; México.

Chenini, I. y Ben, A. 2010. Ground water recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. *Computers & Geosciences*, 36, 801–817.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2002. "Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero del valle de Toluca, Estado de México". Subdirección general técnica, gerencia de evaluación y modelación hidrogeológica. México, D.F.

CONABIO. 2012. "Sistema nacional de información sobre biodiversidad: Portal de geo-información". [En línea] <<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>> [Consulta: enero, 2015]

CONAGUA. 2009. "Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (1501) valle de Toluca, Estado de México". Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.

CONAGUA. 2014. "Sistema Nacional de Información del Agua (SINA): Glosario". [En línea] <<http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=89>> [Consultado: marzo, 2015]

CONAGUA. 2014b. "Agua Subterránea". [En línea] <<http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=62&n3=62>> [Consulta: diciembre, 2014]

CONAGUA. 2015. "Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea en el acuífero valle de Toluca (1501), Estado de México". Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos

CONAGUA-Desarrollo y Sistemas, S.A. 2005. "Zonas de reserva de agua potable para la ciudad de Toluca". Reporte interno. México

CONAGUA-GTZ. 2008. "Plan de Manejo de la cuenca del río Lerma en el acuífero del valle de Toluca. Informe final". México. [En línea] <<http://www2.gtz.de/dokumente/gut/gtz2008-13990es-cuenca-rio-lerma.pdf>> [Consulta: julio, 2015].

CONAGUA-SEMARNAT. 2015. "Estadísticas del Agua en México, edición 2014". Comisión Nacional del Agua. México.

Díaz, C., Esteller, M.V. y López-Vera, F. 2006. "Recursos hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica". Pariguazú ediciones, CIRA-UAEMéx. Montevideo-Toluca.

Escolero, O.A., Martínez, S.E., Kralisch, S., y Perevochtchikova, M. 2009. "Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático". Informe final, UNAM. [En línea] <<http://www.cvcccm->

atmosfera.unam.mx/sis_admin/archivos/agua_escolero__inffinal_org.pdf>
[Consulta: julio, 2015]

Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J. y Gabarrell, X. 2011. Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessment in Spain. *Water Research*, 45, 3245-3254

Fernández A. 2005. "Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia)". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid

Fernández E., Minaya. J y W. Senent del Alamo. 2010. "Inventario de tipologías de dispositivos de gestión de la recarga a nivel internacional. Aportaciones al estado del arte y nuevas propuestas". En: Fernández E. (coordinador), La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico DINA-MAR (131-253) Madrid: GRAFINAT

Fernández, A. y Cordero, R. 2006. "Esbozo de una estrategia para acercar la recarga artificial de acuíferos a la población mediante la educación ambiental". *Revista Ecosistemas*. 15 (1): 101-108

Fernández, A. y García M. 2009. "Gestión de la recarga artificial de acuíferos". *Hidrología de Hoy*. Segunda edición. Madrid: GRAFINAT

Fernández, E. 2013. "Los procesos colmatantes en dispositivos de gestión de la recarga de acuíferos y empleo de la termografía para su detección y estudio. Un ensayo metodológico en el acuífero "Los Arenales", España". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 65 (1):51-69

Fernández. A. (coordinador). 2010. "La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible." Desarrollo tecnológico. DINA-MAR Madrid: GRAFINAT

Fideicomiso para el Desarrollo de Parques y Zonas industriales del Estado de México. FIDEPAR. 2014. http://fidepar.edomex.gob.mx/desarrollos_industriales

Gale I. 2005. "Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas." UNESCO [En línea] <
<http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001438/143819s.pdf>> [Consultado: febrero, 2015]

García L., y Jiménez R. 2006. "Estratigrafía de la Zona Metropolitana del valle de Toluca." Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería. Toluca, México.

- García, E. 1981. "Atlas Nacional del Medio Físico", SPP.3
- García, J.M., Bibiano, L. y Llanos, H. 2008. "Uso racional y Sostenible de los Recursos Hídricos del Acuífero del Valle de Toluca". *Ciencia Ergo Sum*. 15 (1): 61-72
- GEM. 2005. "Plan Regional de Desarrollo Urbano Del Valle De Toluca". Gobierno del Estado de México. México
- GEM. 2011. "Atlas de la cuenca del río Lerma en el Estado de México". Compendio. Gobierno del Estado de México. México
- Gleick P. (ed.). 1993. "Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources". Oxford University Press, New York.
- Gobierno del Estado de México. 2006. "Plan de desarrollo 2006-2012. Gobierno del Estado de México". México.
- Gobierno del Estado de México-Secretaría de Medio Ambiente (GEM-SMA). 2010. "Diagnóstico Ecosistémico: Plan Maestro para la Restauración Ambiental de la Cuenca Alta del Río Lerma". México
- Gutiérrez C. y Becerra L. 2014. "Estado del arte de la remediación de acuíferos contaminados". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.
- Helmreich, B. y Horn, H. 2009. Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248, 118-124.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2010. "Procedimiento para el levantamiento y cartografía de las unidades superiores de los paisajes a escalas 1:50,000–1:250,000" [En línea] < <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/633/procedimiento.pdf> >
- INEGI. 2000. "XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Estado de México". Principales resultados por localidad. México.
- INEGI. 2005. "II Conteo de Población y Vivienda 2005, Estado de México". Principales resultados por localidad. México.
- INEGI. 2010. "XIII Censo General de Población y Vivienda 2010, Estado de México". Principales resultados por localidad, México.
- Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM). 1994. "Carta geológica del Estado de México". México

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. "Agua subterránea". México. [En línea] <http://www.imta.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=181:agua-subterranea&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80> [Consultado: marzo, 2015]

Korenfeld D., y Hernández O. 2011. "Proyecto de Planta Piloto de tratamiento avanzado para la recarga artificial del acuífero". Revista Digital Universitaria. UNAM [En línea] < <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art13/art13.pdf> > [Consultado: mayo, 2015]

Leyva E. 2010. "Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México". Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma México.

Maderey, L., y Jiménez, A. 2005. "Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico". México: Geografía para el siglo XXI, UNAM

Mendez, C., Klenzendorf, J., Afshar, B., Simmons, M., Barrett, M., Kinney, K. y Kirisits, M. 2011. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. Water Research, 45, 2049-2059.

Mendoza, E. 2012. "Caracterización hidrogeológica de la porción suroeste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero". México, D.F. Tesis de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Autónoma de México.

Monrroy, O. 2013. "Manejo sustentable del agua en México". Revista Digital Universitaria. UNAM. [En línea] < <http://www.revista.unam.mx/vol.14/num10/art37/#> > [Consultado: mayo, 2015]

Morrell I, Bandenay L., Renau, A., Renau A., 2006. "Recarga artificial de acuíferos con aguas residuales urbanas regeneradas". España. Fundación Dávalos-Fletcher.

NOM-014-CONAGUA-2003. "Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada". Diario Oficial de la Federación, 18 de agosto del 2009.

NOM-015-CONAGUA-2007. "Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua". Diario Oficial de la Federación, 18 de agosto del 2009.

OMS. 2014. "Temas de salud: AGUA". Organización mundial de la salud. [En línea] < <http://www.who.int/topics/water/es/>> [Consulta: diciembre, 2014]

Orozco, J.M., y Figueroa, G. 1991. Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre el agrietamiento de terrenos. Agrietamiento de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C. 1-12.

Pacheco, J. 2007. Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Tesis de doctorado en Ciencias de la Tierra. Centro de Geociencias, UNAM, México.

Paredes, J. 2010. Determinación del índice de vulnerabilidad de contaminación del Acuífero del Valle de Toluca mediante la adecuación del método SINTACS. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Facultad de Ingeniería, CIRA-UAEM. Estado de México, México.

Pérez-Paricio, A. 2000. "Integrated modelling of clogging of artificial recharge systems." Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España

PNUMA. 2008. "¿Dónde se encuentra el agua?". TUNZA, Revista del PNUMA para jóvenes. 6 (3): 12-13

PUMAGUA. 2016. "Programa de manejo, uso y reusó del agua en la UNAM". [En línea] <<http://www.pumagua.unam.mx/>> [Consultado: febrero, 2016]

Sahuquillo, A. 2009. "Importancia de las aguas subterráneas". Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 103 (1): 97-114

Salitchev, K. 1979. Cartografía. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.

Silverman, B. W. 1986. Density estimation for statistics and data analysis. Londres: Chapman and Hall.

Star, J., Estes, J. 1990. Geographical Information Systems: An Introduction. Englewoods Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.

Tarbutck, E. y Lutgens F. 2005. "Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física". 8ª edición. Madrid, España. Pearson Educación S. A.

Tuinhof, A., Dumars C., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., y Nanni M. 2006. "Gestión Sustentable del Agua Subterránea Conceptos y Herramientas". Serie de notas informativas. Banco Mundial, Washington D.C., EEUU. [En línea] <http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources/4602122-1210186362590/GWM_Briefing_1_sp.pdf> [Consulta: julio, 2015]

UNAM. 2013. "Jornadas del agua UNAM. Gestión integral de recarga de acuíferos". [En línea] <<http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/acuíferos.html>> [Consulta: diciembre, 2014]

UNITECNIA S.A de C.V. 1996. "Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Toluca y Atlacomulco Ixtlahuaca, en el Estado de México". Reporte final. Comisión Nacional del agua. Planos y anexos.

UN-WATER. 2013. "Día mundial del agua". UNESCO. [En línea] <<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/world-water-day/>> [Consulta: enero, 2015]

UN-WATER. 2014. "Agua y Energía. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2014". [En línea] <<http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226962s.pdf>> [Consulta: marzo, 2015]