

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Arenal (1436), Estado de
Jalisco***

Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CDXCII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE JALISCO							
1436	ARENAL	22.5	1.9	27.659910	12.5	0.000000	-7.059910

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subgerencia de Evaluación y

Ordenamiento de Acuíferos

**DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD
DE AGUA EN EL ACUÍFERO ARENAL (1436),
ESTADO DE JALISCO**

México, D.F., mayo de 2009

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes	2
1.1. Localización	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	10
3.1. Provincia Fisiográfica	10
3.2. Clima	11
3.3. Hidrografía	11
3.4. Geomorfología	12
4. GEOLOGÍA	12
4.1. Estratigrafía	12
4.2. Geología Estructural	15
4.3. Geología del Subsuelo	16
5. HIDROGEOLOGÍA	17
5.1. Tipo de acuífero	17
5.2. Parámetros hidráulicos	17
5.3. Piezometría	18
5.4. Comportamiento hidráulico	18
5.4.1. Profundidad al nivel estático	18
5.4.2. Elevación del nivel estático	19
5.4.3. Evolución de nivel estático	20
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	21
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS	22
7. BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA	23
7.1. Entradas	23
7.1.1. Recarga vertical	24
7.1.2. Flujo subterráneo horizontal	24
7.1.3. Recarga inducida	25
7.2. Salidas	25
7.2.1. Evapotranspiración	25
7.2.2. Bombeo	27
7.2.3. Salidas subterráneas por flujo horizontal	27
7.3. Cambio de almacenamiento	28
8. DISPONIBILIDAD	29
8.1. Recarga total	29
8.2. Descarga natural comprometida	29
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas	30
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas	30
9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	31

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 "Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa).

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Arenal, definido con la clave 1436 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza al noroeste del estado de Jalisco, entre los paralelos 20° 41' y 21° 04' de latitud norte y los meridianos 103° 22' y 103° 51' de longitud oeste. Colinda al norte con el acuífero San Martín de Bolaños, al oriente con Cuquio y Atemajac, al sur con Toluquilla y Ameca y al poniente con el acuífero Amatitlán, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco. Figura 1, cubre una superficie aproximada de 848 km² conforme a la poligonal que lo delimita.

El área del acuífero comprende en su totalidad el municipio El Arenal, una porción inferior de los municipios San Cristóbal de la Barranca, Zapopan y Amatitán y en menor proporción parte de los municipios Teuchitlán, Ahualulco de Mercado, Tala y Tequila.

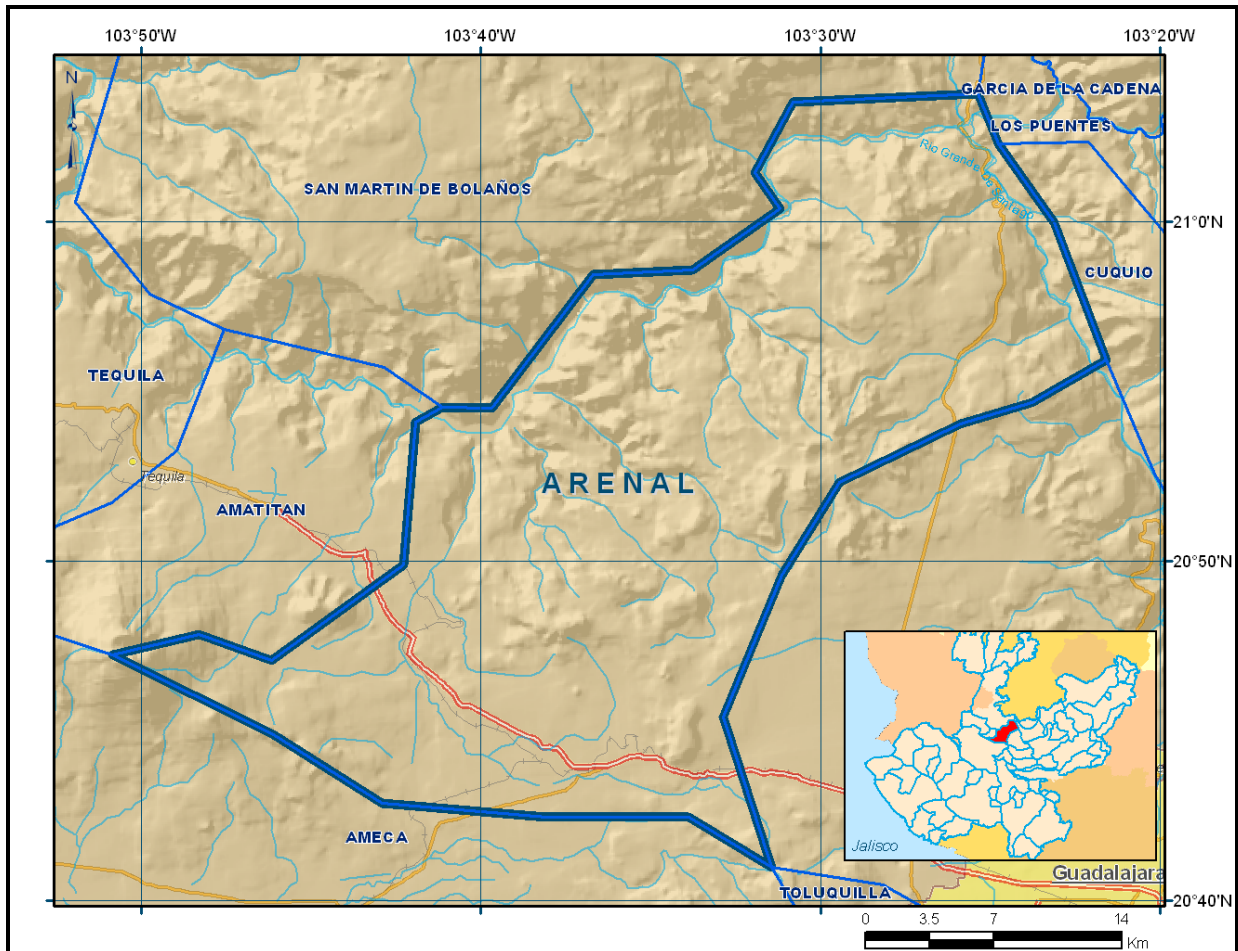


Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplifica que delimita el acuífero

ACUIFERO 1436 ARENAL

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	31	26.3	20	40	57.8
2	103	33	53.0	20	42	26.5
3	103	38	3.7	20	42	26.5
4	103	42	54.1	20	42	50.9
5	103	46	6.7	20	44	53.2
6	103	50	49.9	20	47	14.5
7	103	48	18.1	20	47	50.6
8	103	46	9.7	20	47	4.7
9	103	42	17.4	20	49	52.8
10	103	41	56.0	20	54	6.5
11	103	41	8.3	20	54	32.7
12	103	39	41.5	20	54	31.0
13	103	36	41.1	20	58	26.4
14	103	33	46.9	20	58	35.6
15	103	31	12.7	21	0	23.7
16	103	31	56.8	21	1	26.8
17	103	30	49.6	21	3	32.1
18	103	25	22.5	21	3	47.4
19	103	24	45.8	21	2	18.7
20	103	23	8.0	20	59	58.1
21	103	21	36.2	20	55	56.6
22	103	23	47.7	20	54	40.2
23	103	25	53.0	20	54	3.5
24	103	29	27.0	20	52	19.6
25	103	31	7.9	20	49	34.5
26	103	32	51.9	20	45	23.8
1	103	31	26.3	20	40	57.8

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de tres Decretos que establecen veda. El primer Decreto de tipo II, “*declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en los Municipios de Teuchitlán y Tala, estado de Jalisco, para el mejor control de las extracciones, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo en la zona mencionada*”. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de julio de 1973.

El segundo Decreto de tipo II, “*declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de la zona circunvecina a la veda de los Valles de Atemajac, Tesistán y Toluquilla, Jal.*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de abril de 1976.

El tercer Decreto de tipo III, “Resto del Estado de Jalisco”, “*declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en zonas no vedadas en diversos municipios del Estado de Jalisco y establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y*

aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios del Estado de Jalisco”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 12 de julio de 1987.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos vigente para el 2009, los principales municipios como Zapopan se ubica en zona de disponibilidad 2, El Arenal, Ahualulco de Mercado y Tala en zona 7.

El uso principal del agua es el agrícola. En el acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca (16) Río Santiago, instalado el 14 de julio de 1999. En una pequeña porción al sureste del acuífero se localiza La zona de protección forestal y refugio de la fauna silvestre “La Primavera”, creada el 6 de marzo de 1980.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

De 1973 al 2007, el acuífero Arenal ha sido estudiado en forma particular o regional incluido con otras zonas acuíferas, en diversas fechas y a diferente nivel de detalle; se describen los resultados, conclusiones y recomendaciones relevantes de estos estudios.

Servicios de Prospección Geológica y Levantamientos Geofísicos en la zona norte del estado de Jalisco, 1979. Realizado por la compañía Geólogos Consultores S.A.

El objetivo central fue determinar las condiciones geohidrológicas de la porción norte del estado, incluyendo los valles intermontanos, las áreas factibles para la perforación de pozos de agua, así como la distribución y el potencial acuífero en sedimentos lacustres del Paleógeno-Neógeno cubiertos por rocas volcánicas.

El clima es seco semiárido con valores medios anuales de 600 mm de precipitación, 21° C de temperatura y 2.0 m de evaporación potencial.

De lo antiguo al reciente el marco estratigráfico está compuesto por tobas riolíticas y derrames de basalto, riolitas e ignimbritas, areniscas, conglomerados, y aluvión; las tobas abarcan el 70% del área. El basamento regional podría corresponder al complejo metamórfico del Paleozoico.

Por sus características estructurales, litológicas y geomorfológicas las rocas descritas son poco propicias para la formación de acuíferos, la virtual existencia de éstos se limita a las rocas clásticas como conglomerados, areniscas y aglomerados de baja compacidad. El aluvión y los depósitos fluviales tienen poca extensión, reducido espesor, regular permeabilidad y limitadas propiedades

acuíferas, se circunscriben a las riberas de ríos y arroyos en las salidas de las cuencas hidrográficas.

El agua subterránea tiene 150 a 600 ppm de SDT, es apropiada para cualquier propósito incluido el consumo humano; probablemente, refleja tiempos recientes de infiltración, cortas distancias de recorrido, baja solubilidad de las rocas acuíferas y sistemas de flujo locales.

Se censaron 18 pozos, 54 norias, 136 manantiales de descarga intermitente y 2 galerías filtrantes.

El nivel estático en pozos varía entre 5 y 68 m de profundidad, en las norias el nivel freático es muy somero menor de 10 m.

La transmisividad de los acuíferos en conglomerados y materiales areno arcillosos es de $0.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, la de los aluviones, de $1.8 \text{ a } 7.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

El flujo subterráneo tiene dirección norte sur, proviene de las partes elevadas circundantes, sigue hacia las zonas de menor altitud, se asemeja al de los escurrimientos superficiales y en parte descarga por gasto base a los ríos ubicados en las partes bajas.

Los pozos tienen de 60 a 176 m de profundidad, la explotación de las aguas subterráneas es incipiente, aparentemente los acuíferos se encuentran en equilibrio.

Estudio para el plan de expansión GEUSA de los acuíferos Toluquilla, Arenal, Cajititlán y San Isidro, junio 2001. Realizado por la compañía Hidroconstrucción y Consultoría, S.A. de C.V.

El objetivo fue determinar las condiciones geohidrológicas actuales del área, identificar y describir la infraestructura hidráulica existente, investigar sobre los planes de desarrollo urbano e industrial y las vías de comunicación, evaluar las bases técnicas normativas y de ordenamiento territorial relacionadas con los proyectos de uso y destino del suelo del plan de desarrollo estatal y municipal, presentar la situación administrativa de los acuíferos en relación con decretos de veda, reserva o reglamentación que norman la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas, determinar las condiciones de explotación y comportamiento actual del agua subterránea como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que están sujetos los acuíferos, estimar la disponibilidad en cantidad y calidad de estas fuentes.

A nivel preliminar se levantó el censo de pozos, se realizaron pruebas de bombeo y el análisis hidrogeológico conceptual, en particular sobre el comportamiento del flujo de agua subterránea.

Estudio Geológico-Geoquímico por Arsénico del área del Domo sur de La Primavera, 1990. Realizado por la compañía PERMEX, S.A. de C.V.

El Objetivo fue estudiar la potencial presencia de arsénico en el agua subterránea de la subcuenca San Isidro de acuerdo al contexto geológico definido en estudios previos, colaborar con el organismo estatal de abastecimiento de agua potable (SAPAJAL) en la definición de la ubicación adecuada de perforación de baterías de pozos profundos para asegurar la calidad del agua para el abastecimiento a Guadalajara, Jal.

Se realizó monitoreo de la calidad físico química de agua subterránea y superficial para analizar la probabilidad de ocurrencia de arsénico.

La concentración de arsénico permisible es 0.05 mg/l, el 9% de muestras la rebasó, el 91% presentaron valores inferiores al de norma; los mayores contenidos se correlacionan con patrones de fracturamiento profundo regional y local que permiten el ascenso de fluidos hidrotermales.

Las fuentes del subsuelo se estimaron en cantidad suficiente para la perforación de baterías de pozos de bombeo, localizadas a suficiente distancia de las zonas contaminadas por arsénico.

Balance preliminar de la subcuenca San Isidro Mazatepec. Domo sur La Primavera. Gerencia Regional Lerma Santiago Pacífico, CNA. Clave de clasificación R12.07.2/66, 1991.

El estudio fue primordialmente de gabinete, se analizó y procesó la información climatológica e hidrogeológica disponible, incluye la configuración piezométrica de 1991.

Contiene los datos utilizados para el balance y para la evaluación de sus componentes, las secciones geoeléctricas con interpretación hidrogeológica y las secciones de entrada y salida de flujo subterráneo.

Se trata de una evaluación preliminar a partir de trabajos previos, cortes de pozos y registros hidrometeorológicos.

Actualización del estudio geohidrológico zona conurbada de Guadalajara cuencas Toluquilla, Atemajac, Cajititlán, 1996. Realizado por la empresa GEOEX, S.A. de C.V.

El Objetivos fue establecer el modelo conceptual de los acuíferos, determinar las condiciones geohidrológicas iniciales y actuales, realizar una zonificación geohidrológica evaluando la disponibilidad de agua subterránea para su aprovechamiento racional.

Se hizo el levantamiento geológico de campo para inferir la geometría, estructura y la posición de niveles de agua de los acuíferos, la nivelación de brocales y la medición de niveles piezométricos de pozos, se obtuvieron 92 muestras de agua para su análisis físico y químico.

El estudio comprende información sobre el aprovechamiento de los acuíferos de la zona conurbada de Guadalajara y sobre las componentes del balance de agua subterránea.

El modelo conceptual es de carácter estimativo así como el balance geohidrológico y la caracterización hidrodinámica de los acuíferos.

Estudio Hidrogeológico regional de la zona geotérmica La Primavera-San Marcos-Hervores de La Vega, Jalisco. Comisión Federal de Electricidad, 1982.

El acuífero relacionado con el sistema geotérmico la Primavera está contenido en rocas andesítico-basálticas, limitado por estructuras con orientación NW-SE, lo que ocasiona que el flujo subterráneo tenga dirección SE - NW, procedente de Juanacatlán.

La zona de recarga de agua subterránea se ubicó al sureste del sistema La Primavera entre los poblados Juanacatlán y Cajititlán donde afloran andesitas del Mioceno cubiertas por tobas permeables; el Río Grande Santiago, en este sector, podría estar también relacionado con la descarga del acuífero.

El acuífero Villa Corona-San Marcos con manifestaciones termales está constituido por rocas andesítico basálticas con su área de recarga en los cerros ubicados al Noroeste de Villa Corona así como en la Sierra Tapalpa, su flujo principal ocurre en dirección noroeste sureste.

Estudio Hidrológico del estado de Jalisco. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2001.

Se describen las condiciones hidráulicas del subsuelo, la dirección del flujo de agua, se detectan áreas factibles de extracción y se caracteriza el funcionamiento de los acuíferos.

Se realizó el censo y la medición de los niveles dinámico y estático de pozos así como el balance hídrico para conocer el grado de explotación y el comportamiento general de los acuíferos.

El acuífero Ameca que aloja al de San Isidro se encontró en condiciones de subexplotación, se inventariaron 390 aprovechamientos entre pozos y norias, el nivel estático varía de 1 a 60 m de profundidad, los caudales de 5 a 35 l/s y su evolución piezométrica resultó de -0.40 m/año.

La trayectoria preferencial de flujo subterráneo ocurre en dirección noreste-suroeste, la principal recarga se presenta en el volcán Tequila y en las sierras La Primavera y La Laja.

Informe climatológico de la zona geotérmica La Primavera San Marcos – Hervores de La Vega, estado de Jalisco. Informe 16 – 81. Comisión Federal de Electricidad. Oficina de Exploraciones Geotérmicas, 1981.

Se obtuvo el balance hídrico por cuenca, determinando la precipitación y temperatura media anual, el tipo de clima, la evapotranspiración potencial y real, el volumen de agua excedente, coeficiente de infiltración, volumen infiltrado y escurrimiento directo.

Geohidrología de los valles de Atemajac, Tesistán, Ameca, Ahualulco y San Marcos, Jalisco, 1973. Realizado por la Compañía Ariel Constructores, S.A.

Con base en las interdependencias entre los materiales de relleno de las planicies se agruparon unidades geohidrológicas definiéndose la de Atemajac-Tesistán-Ocotlán, Ahualulco-Ameca, San Marcos y Lago Chapala.

Se cuantifican las configuraciones piezométricas, los parámetros hidrodinámicos y posibles excedentes de agua subterránea en los valles, se concluye que es factible aumentar las extracciones actuales.

Estudio Hidrogeoquímico e Isotópico de la zona Toluquilla - Ocotlán La Barca en el estado de Jalisco. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos. Subcoordinación de Hidrología y Aprovechamientos Hidráulicos, 1993.

Se diseñó la red de monitoreo para la caracterización isotópica e hidrogeoquímica del sistema regional, se seleccionaron sitios de muestreo para análisis y se midió en campo pH, temperatura y conductividad eléctrica.

En laboratorio se determinó calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sílice, fosfatos, boro, arsénico, cadmio, flúor, sólidos totales disueltos, alcalinidad y dureza.

Los análisis isotópicos consistieron en determinaciones de deuterio, oxígeno 18, tritio ambiental, carbono 13 y carbono 14.

Del estudio se desprende que el lago Chapala no recarga a los acuíferos Toluquilla-Guadalajara, Mezcala-Jocotepec y Ocotlán, sino que sus recargas son producto de la precipitación local.

Por influencia del bombeo algunos pozos localizados cerca del perímetro oriental del lago manifiestan similitud hidrogeoquímica con el agua de éste.

Desde el punto de vista isotópico y químico no se encontró evidencia sobre la interacción entre el Lago Chapala y las Lagunas San Marcos, Atotonilco y Zacoalco.

Algunos de los pozos del SIAPA del sistema Toluquilla destinados al suministro de agua potable a la zona metropolitana de Guadalajara, podrían estar influenciados por flujos geotermales de la Caldera La Primavera.

Elaboración de los documentos de respaldo de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos (1413) Altos de Jalisco, (1436) Arenal, (1428) Chapala, (1429) Tizapán y (1447) Yahualica, en el estado de Jalisco. 2007. Realizados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para la CNA.

El objetivo fue contar con los documentos técnicos de respaldo que sirvan de consulta rápida para conocer la disponibilidad media anual de agua del Acuífero (1436) Arenal, del Estado de Jalisco, ajustándose a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia Fisiográfica

El acuífero Arenal Según el INEGI (1991), se ubica en la Faja Neo-Volcánica y Sierra Madre Occidental, subprovincias Sierras y Valles Zacatecanos. Esta provincia se caracteriza por sus sierras altas, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son a veces de pendientes suaves, pero con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago.

También se localiza dentro de la subprovincia Guadalajara; particularmente, se distingue la unidad identificada como Montañas de Bloque con altitudes de 1600 a 1800 msnm. La subprovincia se caracteriza por las notables manifestaciones de vulcanismo explosivo, que data de tiempos

relativamente recientes y cuyas huellas se observan en la ciudad de Guadalajara y en la sierra de La Primavera.

A pesar de ser una subprovincia pequeña es la menos uniforme, teniendo una gran complejidad en su panorama fisiográfico, en el que se encuentran sistemas tan distintos como sierras, mesetas, lomeríos y llanos; sin embargo, en general su litología está constituida por rocas ígneas extrusivas ácidas, vidrios volcánicos (obsidiana) basaltos y nubes ardientes.

Los aluviones de las partes bajas están constituidos por material fino, los lomeríos por conglomerados o por fragmentación de rocas preexistentes, afloran además rocas sedimentarias ricas en carbonatos que probablemente constituyen el basamento regional sobre el que descansa la Sierra Madre Occidental.

3.2. Clima

El clima en el acuífero es del tipo semi-seco en invierno y semi-cálido en primavera, en la época invernal no presenta cambio térmico definido.

La precipitación media es 894.4 mm/año, representa 758.45 hm³ de volumen anual llovido para 848 km² de superficie que tiene el acuífero. De junio a octubre es la época principal de lluvias.

La temperatura y evaporación potencial promedio en el año son 22.7° y 1921.5 mm, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la cuenca hidrográfica Lerma-Chapala-Santiago, subcuenca de los ríos Santiago, Cuisillos y Juchipila, sus escurrimientos principales son los ríos Salado y Arenal, así como los arroyos Las Tortugas, El Saucillo, El Ganado, Agua Dulce y Laguna Colorada.

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No.12, cuenta con las presas Elizondo, Playa de Santa Cruz, San Cayetano y Hurtado, siendo ésta la de mayor importancia con 22.0 hm³ de capacidad.

Los arroyos tienen régimen intermitente, las corrientes principales son de tipo perenne, el trazo de algunos cauces menores se pierde al llegar a las partes bajas o en el contacto entre éstas y las laderas.

3.4. Geomorfología

En el acuífero predominan relieves abruptos con pequeñas zonas semi-planas, rasgos geomorfológicos originados en rocas volcánicas tanto ácidas como básicas, se presentan diversas topoformas como el Domo La Primavera ubicado al oriente, los volcanes cineríticos distribuidos en diversos puntos y el pequeño valle intermontano localizado en la cabecera de la cuenca del límite sur.

4. GEOLOGÍA

En el acuífero predominan rocas volcánicas y en los valles intermontanos, materiales formados mediante procesos sedimentarios.

El marco geológico se creó en un ambiente volcánico durante el Paleógeno-Neógeno, está constituido por basaltos y basaltos andesíticos en los sectores noroeste y sureste, y por ignimbritas, riolitas y tobas ácidas en las zonas montañosas de la parte norte.

Con menor extensión se encuentran rocas paleógenas ígneas intrusivas graníticas y afloramientos de conglomerados de origen sedimentario continental.

Los depósitos cuaternarios corresponden a suelos residuales, aluviones y depósitos fluviales que rellenan los pequeños valles, se limitan a las márgenes de las corrientes superficiales.

Las rocas más antiguas pertenecen al Cretácico, están representadas por afloramientos de calizas interestratificadas con lutitas. Figura 2.

4.1. Estratigrafía

Los afloramientos más extensos corresponden a basaltos, tobas y derrames riolíticos, que se formaron durante el Oligoceno al Pleistoceno.

A profundidad se infieren potentes horizontes de rocas sedimentarias calcáreas de la Formación Morelos y areniscas de la Formación Mexcala, del Cretácico Medio y Superior; que subyacen a las rocas volcánicas.

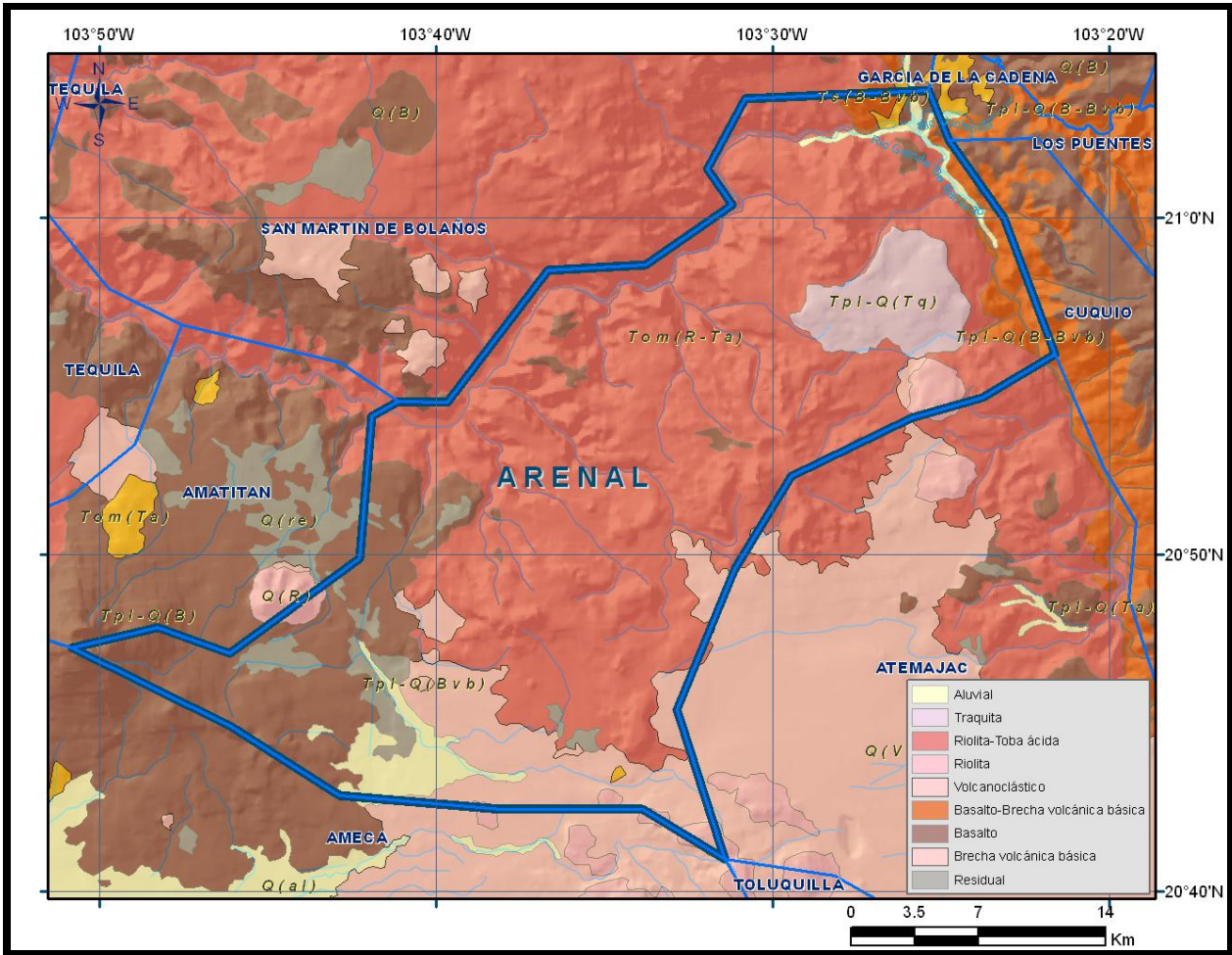


Figura 2. Mapa Geológico

Atendiendo un orden cronológico de lo antiguo al reciente se tienen rocas cretácicas de la Formación Morelos constituidas por calizas de estratificación gruesa, con espesor y contacto inferior no identificables, podrían conformar el basamento regional profundo con propiedades acuíferas si su porosidad secundaria está suficientemente desarrollada.

Formación Mexcala constituida por una alternancia de areniscas, limolitas y lutitas de color pardo a verde, con estratificación delgada, sobreyace a la Formación Morelos y subyace a los derrames volcánicos del Oligoceno, se ubica en el Cretácico Superior. Por su elevado grado de cementación en general no se reatribuye potencial acuífero.

Andesitas del Oligoceno de color pardo rojizo, gris claro o verde grisáceo, con facies piroclásticas constituidas por tobas, brechas y aglomerados, llegan a presentar alteración hidrotermal e intemperismo, por su estructura masiva funcionan como acuicludo, aunque eventualmente pueden presentar fracturas.

Derrames, tobas y brechas de composición riolítica del Mioceno tienen textura porfirítica y estructura fluidal y esferulítica, afloran en la Sierra Tapalpa, sobreyacen la secuencia de rocas sedimentarias, cubren las andesitas del Oligoceno. Dada su estructura cerrada y escaso fracturamiento se consideran con características acuíferas desfavorables.

Derrames y brechas de composición andesítica, andesítico-basáltica y basáltica del Mioceno, contienen agua subterránea únicamente en fracturas.

Tobas pumíticas, vítreas y líticas de composición intermedia del Plioceno, color gris amarillento a café grisáceo oscuro, rocas representativas de eventos explosivos con determinados atributos hidrogeológicos.

Ignimbritas de composición máfica, color negro, con fragmentos de riolita, andesita, basalto y obsidiana de matriz vítrea y color opaco, del Plioceno; sobre estas rocas yacen basaltos del Cuaternario, pero cubren las riolitas del Oligoceno. En general son impermeables, excepto cuando presentan un grado de fracturamiento desarrollado.

Riolitas fluidales de color café a rosa, del Plioceno, con fracturamiento moderado, ocasionalmente se presentan en pseudoestratos, observaciones de campo sugieren variaciones en la intensidad de su fracturamiento, pueden alcanzar propiedades acuíferas atractivas; en caso contrario son rocas impermeables.

Basaltos cuaternarios constituidos por derrames que alternan con rocas piroclásticas, en forma de conos cineríticos, a profundidad esta unidad se comporta como acuífero.

Riolitas vítreas, de color gris claro a rosado con textura holohialina a merocristalina y eventualmente estructura compacta, generalmente fracturadas, se suponen acuíferas, pertenecen al Cuaternario.

Derrames piroclásticos del Reciente, localizados en la porción norte del acuífero, bordeando la Caldera La Primavera; tienen color gris a blanquecino, dispuestos en capas gruesas masivas, con fragmentos de andesita, riolita y pómez, se comportan como acuífero o áreas de recarga de agua subterránea.

Domos riolíticos Pleistocénicos, forman la Sierra La Primavera, con menor extensión se encuentran al NE de Acatlán de Juárez, están constituidos por riolita fluidal vítrea de color gris a crema, estructura compacta a deleznable y textura afanítica, se presentan de manera anular al Domo La Primavera, sobreyacen a los piroclásticos, tienen notable fracturamiento, actúan como área de recarga de los acuíferos.

Sedimentos lacustres, se aprecian en el Domo La Primavera, representan depósitos de lago, están conformados por material bentonítico, diatomitas y acumulaciones de material pumicítico de diferente tamaño producto de eventos volcánicos subsecuentes, afloran en los flancos de algunos domos y sobreyacen a los piroclastos. Por el contenido de material bentonítico se consideran semipermeables aunque sus facies pumicíticas podrían tener buenas propiedades acuíferas a profundidad.

Tobas pumicíticas de edad cuaternaria que afloran en amplias extensiones, provienen de la actividad volcánica de tipo explosivo, se caracterizan por ser depósitos de caída libre, poseen color blanco, gris y crema, presentan estratificación media. Se observan con fragmentos de riolita, obsidiana y horizontes arcillosos producto de la alteración de cenizas volcánicas, tienen buena conductividad hidráulica, actúan como cuerpo receptor que permite la infiltración de la lluvia, a profundidad podrían constituir acuíferos de cierta importancia.

Aluviones cuaternarios, afloran en los valles, están formados por arenas pumicíticas, abanicos aluviales, depósitos de pie de monte y llanuras de inundación. Estos depósitos son producto de diferentes agentes erosivos y de transporte, su granulometría es de conglomerados, arenas, limos y arcillas. Las capas arcillosas depositadas en la parte baja del valle determinan zonas inundables que no permiten la infiltración del agua de las avenidas, se comportan como acuíferos con propiedades libres o de semiconfinamiento.

4.2. Geología Estructural

El acuífero está caracterizado por cuatro estructuras fundamentales.

Las cuencas sedimentarias, son depresiones tectónicas que representan el nivel base de la red de drenaje local.

La Montaña volcánica ácida moderna, está representada por la sierra La Primavera, se localiza al NW de Guadalajara, se trata de un complejo volcánico que define el relieve montañoso más joven de Jalisco, formado por lavas y tobas de efusiones recientes del Pleistoceno, cuyas etapas sucesivas de desarrollo dieron lugar a la formación de alineamientos de domos de piroclásticos, tobas, brechas vítreas y obsidiana, así como de numerosos aparatos volcánicos. Ecológicamente tiene alto valor como regulador del medio ambiente de la zona metropolitana de Guadalajara debido a su topografía y extensión y a la cubierta vegetal formada por bosque de pino y encino.

Los Relieves mesetiformes basálticos, corresponden a planicies basálticas formadas por erupciones del Volcán Tequila, los derrames de basalto del Plioceno Superior y Pleistoceno se depositaron sobre la planicie del plateau riolítico del Paleógeno-Neógeno conservando el relieve

de la antigua meseta. Se extienden en semicírculo desde el cerro Tequila hacia el N hasta la garganta del río Grande de Santiago, las separan los bloques elevados del plateau pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Se incluyen las mesetas basálticas de Los Altos de Jalisco ubicadas tanto en la cuenca sedimentaria del río Verde como en el plateau riolítico, son estructuras menores formadas por derrames de lavas cuaternarias ya sea a partir de fisuras de la corteza terrestre o bien a partir de aparatos volcánicos, las cuales han sufrido procesos de disección de tal modo que aparecen aisladas y desvinculadas del cuerpo volcánico que las originó, los ejemplos característicos de estas estructuras se presentan en la Mesa Redonda y Mesa Larga, al Este de San Juan de Los Lagos.

Los Bloques del plateau volcánico, son el relieve regional del W de México y en particular de este sector de la Sierra Madre Occidental, son la expresión más significativa de los movimientos de la corteza terrestre a la luz de la teoría de la Tectónica de Placas. Los grandes bloques del relieve, es decir las unidades morfológicas, corresponden a los accidentes geofísicos, la disposición de las estructuras del relieve y de la morfogénesis como consecuencia directa de la amplitud de los movimientos asociados a la compresión y a la subducción de las placas tectónicas a partir del Paleógeno-Neógeno y de los cambios climáticos que éstos provocan.

4.3. Geología del Subsuelo

En el subsuelo del acuífero predominan las rocas volcánicas básicas tales como basaltos, brechas y tobas asociadas, así como rocas ácidas formadas por riolitas, ignimbritas, tobas y brechas del mismo origen.

Según cortes litológicos de pozos, sobre estas rocas se encuentran sedimentos granulares de origen residual y aluvial continental. Asimismo, se detectan capas areno arcillosas de dimensiones importantes interdigitadas en las rocas volcánicas.

En la parte intermedia superior del subsuelo de los valles intermontanos, además, se pueden encontrar alternancias de tobas arenosas poco consolidadas, ceniza, arcilla y pumicitas con fragmentos de vidrio volcánico, arenas, escorias y trozos de roca volcánica basáltica compacta, basalto poroso y clásticos empacados en ceniza con arcillas, todas estas rocas pertenecen al Reciente.

A no más de 50 m de profundidad en unos casos, o prácticamente al nivel del terreno en otros, se encuentra el contacto entre la alternancia de rocas sedimentarias continentales del Reciente y las rocas basáltico-andesíticas y riolíticas del Paleógeno-Neógeno, esporádicamente con notable intemperismo, fracturamiento y porosidad secundaria.

En las inmediaciones de los domos volcánicos, por debajo de la capa vegetal, las rocas del subsuelo están constituidas por una alternancia de boleos, fragmentos de roca sub-redondeados, rocas volcánicas de estructura compacta de tipo basalto andesítico y riolítico, e intercalaciones de arena empacada en arcilla.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Aparentemente los depósitos granulares, gravas, gravillas y arenas gruesas, dispuestos ya sea sobreyaciendo a las rocas volcánicas o interdigitados con éstas, actúan como un acuífero de tipo libre importante, mientras las rocas volcánicas generalmente funcionan como acuitardos o formando acuíferos semiconfinados de potencial hidrológico incierto.

El acuífero volcánico es de naturaleza errática en lo que se refiere a su potencial, aportación, rendimiento y permeabilidad, dependiente del grado de desarrollo y de la interconectividad de sus fracturas.

Los acuíferos semiconfinados son más susceptibles al bombeo por su menor capacidad de almacenamiento por unidad de superficie y por descenso unitario de carga hidráulica, tienen además oportunidad de recarga más restringida.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de los trabajos realizados en el año 2007, se realizaron tres pruebas de bombeo a gasto constante y siete a gasto variable (aforos). Para su interpretación se utilizó el método de Jacob para régimen transitorio y acuíferos confinados o libres de espesor saturado mucho mayor que los descensos provocados por el bombeo.

El coeficiente de transmisividad varía entre $3.47 \cdot 10^{-5}$ y $1.0 \cdot 10^{-3}$ m²/s, el gasto específico de 0.03 a 0.43 lps/m, entre 2.5 y 20.0 lps los caudales instantáneos.

Si asumimos que los valores promedio del espesor saturado efectivo y el coeficiente de transmisividad son 73.5 m y $4.01 \cdot 10^{-4}$ m²/s, resulta un valor de $5.45 \cdot 10^{-6}$ m/s para la conductividad hidráulica equivalente horizontal. Estos valores corresponden a las pruebas de aforo.

En el caso de los ensayos a gasto constante la transmisividad fluctúa entre $2.23 \cdot 10^{-3}$ y $4.27 \cdot 10^{-2}$ con $2.31 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ de promedio, de 1.9 a 40.0 con 18.6 lps/m de promedio el gasto específico, y entre 10 y 20 con 16.7 lps de valor medio el caudal instantáneo.

Los promedios del nivel dinámico, espesor saturado y profundidad de pozos son 49.39 y 63.94 y 113.3 m respectivamente. $K_H = 3.61 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

El gasto, rendimiento y conductividad hidráulica varían en un amplio rango de valores lo que refleja la notable heterogeneidad de los materiales del acuífero.

5.3. Piezometría

Se emplea la información piezométrica obtenida del censo de pozos realizado para los documentos de respaldo de 2007, así como lecturas anteriores disponibles.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

El nivel estático varía entre 65 y 45 m de profundidad en la porción noroccidental, hacia los poblados Tesistán y La Venta del Astillero, el Campus de la Universidad de Guadalajara y ambas laderas de la porción central del acuífero. De 15 a 30 m de profundidad hacia la localidad Arenal, y a unos 50 m entre Huautla y El Zamorano, en los límites oriental y norte; hacia Amatitán, la profundidad promedio es de 15 m.

Las captaciones someras o norias tienen niveles freáticos someros, menores de 5 m de profundidad. Figura 3.

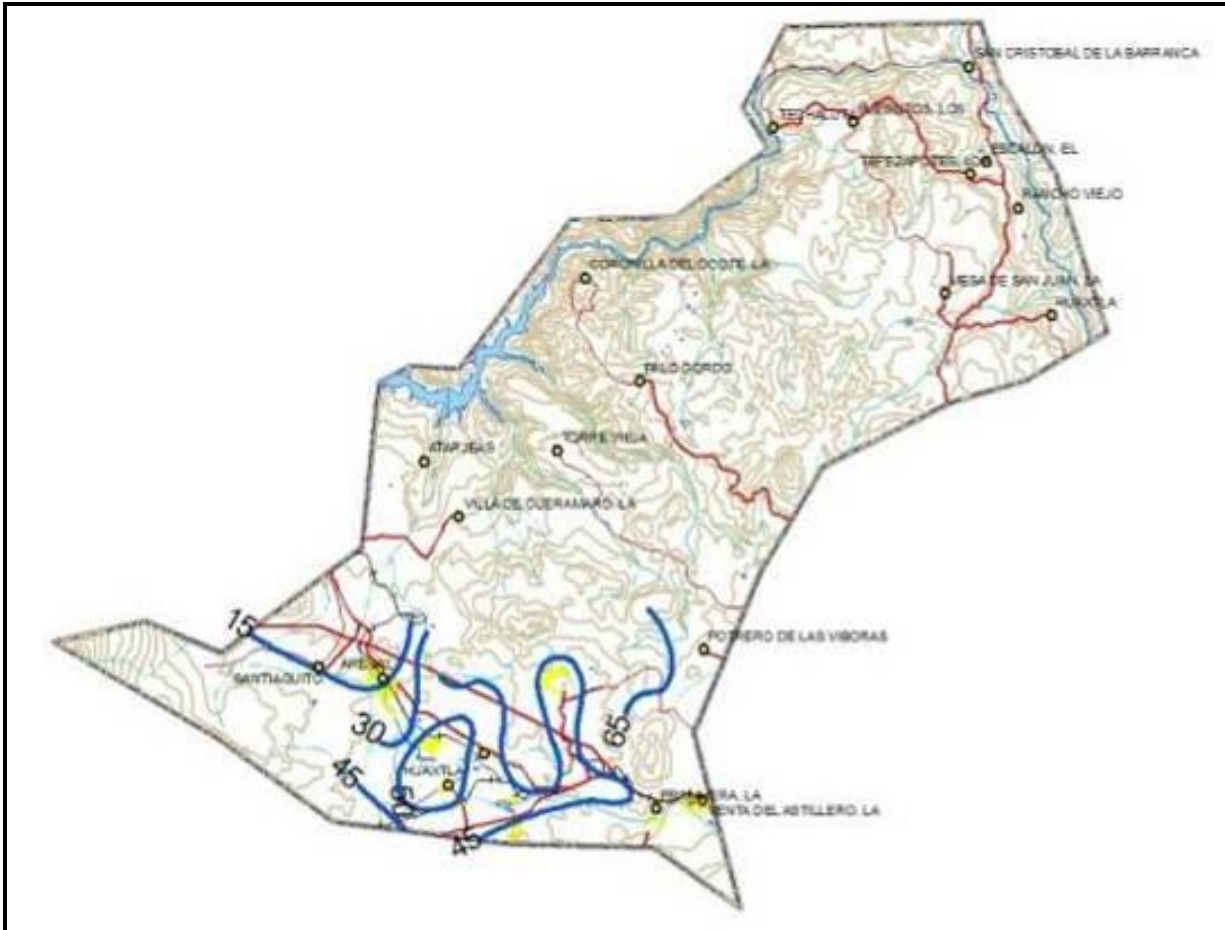


Figura 3. Profundidad al nivel estático (m) 2007

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de niveles en diciembre de 2007, Figura 4, revela que la mayor parte del escurrimiento subterráneo se presenta del extremo suroriental hacia el límite norte del área del acuífero. Existen aportes de agua procedentes de las partes montañosas colindantes, que debido al bombeo se ha provocado un ligero desfasamiento de las equipotenciales de la parte central y que, del mismo modo, se infiere recarga lateral por el extremo sur occidental.

El gradiente hidráulico horizontal en los bordes circundantes es probablemente del orden de 0.040; en las proximidades del poblado Arenal, porción central, es de 3 al millar y poco menos hacia el límite norte del acuífero.

Variaciones de gradiente significan cambios de conductividad hidráulica principalmente. La configuración no muestra síntomas de concentración de bombeo ni sobreexplotación del acuífero.

Diferencias apreciables de carga hidráulica en captaciones próximas entre sí de diferente profundidad podrían indicar componentes importantes de flujo en dirección vertical, o la virtual existencia de un sistema de flujo multicasas con potenciales piezométricos interdependientes.

La configuración de niveles no permite asegurar una clara evidencia de impermeabilidad de las formaciones rocosas volcánicas circundantes, por el contrario sugiere aportaciones de agua procedentes de las sierras limítrofes, congruente con la naturaleza fracturada permeable de las rocas que las conforman.

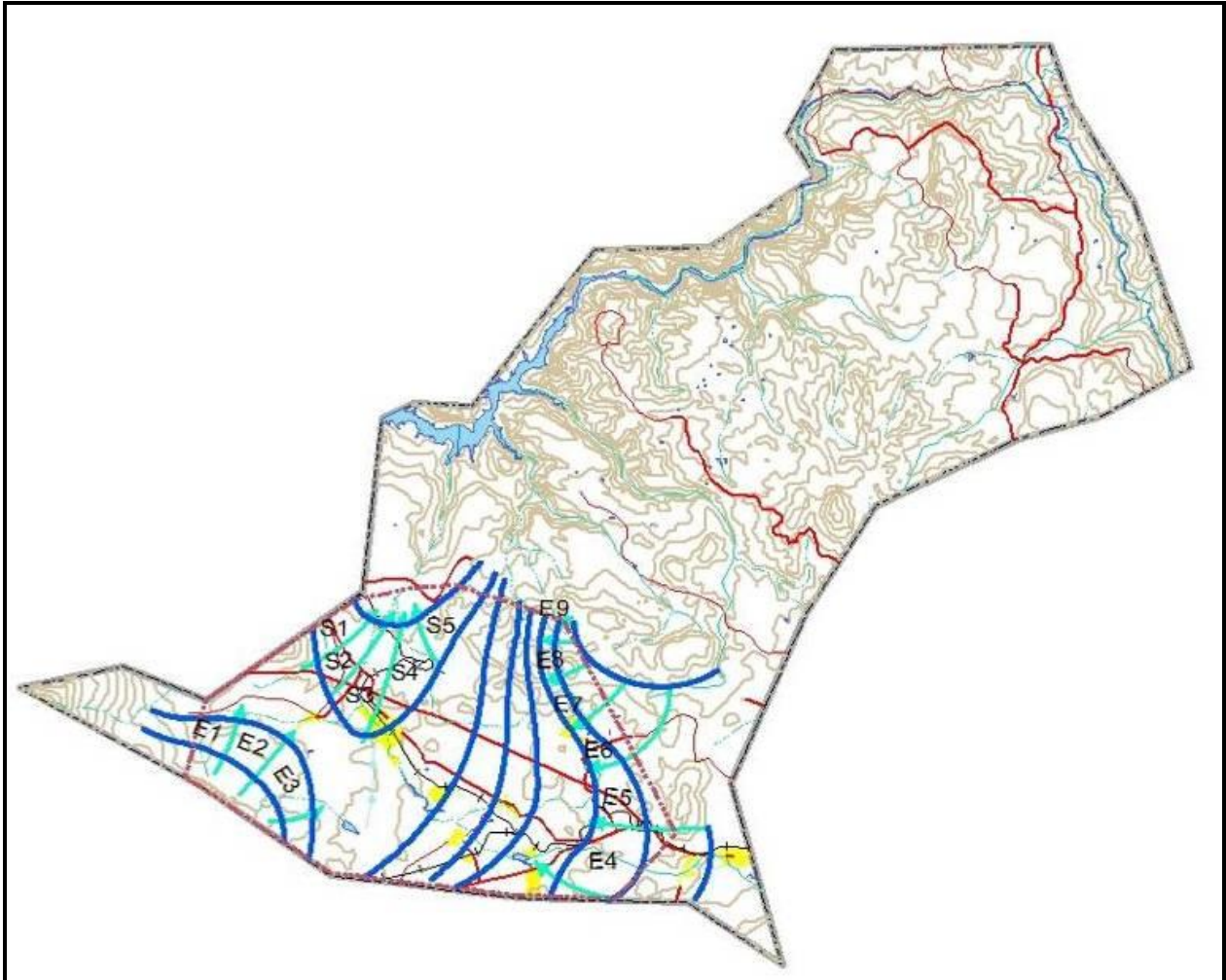


Figura 4. Elevación del nivel estático (msnm) 2007 y red de flujo

5.4.3. Evolución de nivel estático

En la Figura 5, se presenta la evolución de niveles estáticos para el periodo octubre 2005 a diciembre 2007; muestra que el nivel se abate 1 m en la parte centro oriental de la cuenca, que

El agua subterránea resultó sódica sulfatada clorurada, sódica sulfatada y cálcica magnésica sódica, ligeramente bicarbonatada, así como de baja salinidad, menor de 700 ppm de STD según se infiere de su conductividad eléctrica.

Como la cuenca aún se encuentra en desarrollo y los niveles piezométricos se mantienen relativamente al margen de lo que ocurre en la superficie, se descartan fuentes externas que modifiquen la composición química original de las aguas subterráneas.

Junto con la salinidad otro potencial peligro en el uso del agua con fines agrícolas es la presencia excesiva de sodio, éste reduce la permeabilidad e incrementa la dureza del terreno. Estos efectos son ocasionados por el intercambio iónico de calcio y magnesio por el sodio en un ambiente coloidal de los suelos arcillosos, la intensidad de la reacción se determina por el índice de adsorción de sodio.

De acuerdo con el diagrama de Wilcox, dos de las muestras se clasifican como C1S1, de bajo índice de adsorción y peligrosidad de sodio con reducido riesgo de salinidad, puede usarse para riego en cualquier tipo de cultivo y suelo sin necesidad de lavado específico porque éste se logra en condiciones normales de aplicación, exceptuando suelos poco permeables. La muestra restante es C2S1 que significa riesgo medio de salinidad y bajo índice de adsorción y peligrosidad de sodio, se puede aplicar en cultivos tolerantes a las sales y en todo tipo de suelo, con lavados moderados de éste, sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

En el 2007, como parte de los trabajos realizados para sustentar los documentos de respaldo, se censaron 90 aprovechamientos de agua subterránea, el 35% se destina a uso agrícola, el 24% a público urbano, el 20% a servicios, el 13% a fines domésticos y el por ciento restante a satisfacer diversas necesidades.

El 87% de las obras censadas corresponden a pozos, 9% a norias y 4% a manantiales.

La extracción es de 12.5 hm³/año, de los cuales el 52.7% corresponde a uso agrícola, 29.0% a público urbano, 13.8% a servicios, 0.7% se destina a la industria, 2.8% se emplea con fines domésticos y 1.0% a fines agropecuarios.

7. BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA

El balance de aguas subterráneas es un método de evaluación de la potencialidad de un acuífero. Se basa en el principio de conservación de la materia. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento del acuífero:

$$\text{Recarga total (Rt)} - \text{Descarga total (Dt)} = \text{Cambio de almacenamiento } (\pm \Delta V_s)$$

La ecuación de balance para este acuífero en particular, tiene la siguiente forma:

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(s)$$

Donde:

E_h	Entradas subterráneas por flujo horizontal
R_v	Recarga vertical
R_i	Recarga inducida
B	Bombeo
S_h	Salidas subterráneas por flujo horizontal
ETR	Evapotranspiración
$\Delta V(s)$	Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

La recarga total que recibe el acuífero está constituida por la recarga natural, integrada por la recarga vertical (R_v) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h), y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas, principalmente, y por las fugas en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje, en las poblaciones.

7.1.1. Recarga vertical

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S)$$

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + ETR + S_h - \Delta V(S) - E_h - R_i$$

7.1.2. Flujo subterráneo horizontal

No es identificable con suficiente seguridad el esquema piezométrico en los bordes del acuífero, se infiere que las rocas que ahí afloran cuentan con cierta capacidad de infiltración, permeabilidad y recarga, por tanto se podría esperar que esas zonas actúen como entradas de flujo subterráneo.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para 2007, figura 5, y de los valores de transmisividad obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo, de acuerdo a la siguiente expresión: $Q = B i T$

Para cada canal de flujo, B es el ancho, i su gradiente hidráulico horizontal definido como $i = (h_2 - h_1) / L$ donde $(h_2 - h_1)$ es la pérdida de carga y L la distancia mínima entre equipotenciales, T es el coeficiente de transmisividad que le corresponde.

En la Tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **6.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo horizontal

Canal	Longitud B [m]	Ancho a [m]	h [m]	Gradiente [mm]	Transmisividad [m ² /s]	Caudal [m ³ /s]	V [Mm ³ /año]
E1	1,238	1789.6	25	0.0202	0.0004	0.0144	0.455
E2	1,724	2323.4	25	0.0145	0.0004	0.0134	0.424
E3	1,564	1947.2	25	0.0160	0.0004	0.0124	0.392
E4	2,352	1686.8	50	0.0213	0.0004	0.0143	0.452
E5	1,555	1302.0	50	0.0322	0.0004	0.0167	0.528
E6	786	1150.1	50	0.0636	0.0004	0.0293	0.922
E7	606	1188.1	50	0.0825	0.0004	0.0392	1.235
E8	580	1276.5	50	0.0862	0.0004	0.0440	1.386
E9	543	866.38	50	0.0921	0.0004	0.0319	1.005
Total							6.8

7.1.3. Recarga inducida

Aun en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie del agua subterránea. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego.

Para este caso, se aplican a la agricultura de riego aproximadamente 6.6 hm³/año y considerando que el 10% de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, los que representa 0.66 hm³/año de recarga por retornos de riego.

El volumen destinado para el uso público-urbano es de 3.6 hm³/año, considerando que un 30% del volumen total utilizado retorna al acuífero por fugas en las redes de abastecimiento, la recarga resulta de 1.08 hm³/año. Por lo tanto el total de la Recarga inducida es de **1.7 hm³/año**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo, salidas subterráneas y evapotranspiración.

7.2.1. Evapotranspiración

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en

el suelo y la que toma en cuenta la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

La evapotranspiración tiene dos componentes: la evaporación directa del agua subterránea y la transpiración de las plantas. La primera tiene lugar, donde aflora la superficie freática, así como en las áreas adyacentes a ésta, donde la misma superficie está poco profunda. En el subsuelo, el agua puede ascender, a partir del nivel freático, hasta una altura ("la altura capilar") cuyo valor depende del tamaño de los poros o fisuras; en los materiales granulares esa altura es inversamente proporcional al tamaño de los granos, variando entre unos cuantos decímetros en las gravas, y cerca de tres metros en los materiales limo-arcillosos. Este mecanismo de descarga se presenta en la zona donde los niveles freáticos están a profundidades no mayores a 10 metros.

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.

Se aplicó la ecuación de *Turc* para calcular la lámina de Evapotranspiración real, los valores medios anuales de temperatura y precipitación son 27.7° C y 894.4 mm, ETR resulta 856.9 mm/año.

El gráfico de la Figura 6 presenta la variación lineal supuesta del % de ETR en función de la profundidad al nivel freático.

Con base en la posición de nivel freático para diciembre de 2007 se hace el producto del área obtenida entre isolíneas, el promedio del NF de estas y el % de la lámina de ETR que le corresponda; el proceso se repite de igual forma obteniendo ETR total.

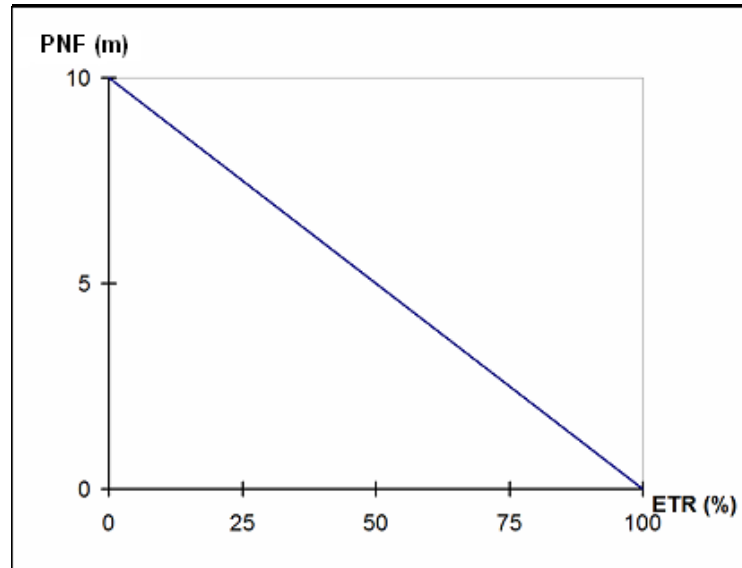


Figura 6. Relación entre el % de ETR y la PNF

El resultado de este proceso se presenta en la Tabla 3, el valor de la evapotranspiración real calculado es de **1.7 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración real.

Intervalo curvas (m)	Profundidad Considerada (m)	Area (km ²)	%	ETR (m)	Vol ETR (hm ³ /año)
0 a 1	0.5	0	95%	0.857	0.0
1 a 2	1.5	0.0	85%	0.857	0.0
2 a 3	2.5	0.2	75%	0.857	0.1
3 a 4	3.5	0.5	65%	0.857	0.3
4 a 5	4.5	1.0	55%	0.857	0.5
5	5	2.0	50%	0.857	0.9
Area Balance		3.7		ETR =	1.7

7.2.2. Bombeo

El bombeo global de las captaciones de agua subterránea es **12.5 hm³/año**, corresponde a la principal descarga del acuífero.

7.2.3. Salidas subterráneas por flujo horizontal

Las salidas subterráneas se obtuvieron como en forma similar como se evaluaron las entradas, a partir de la red de flujo presentada en la Figura 4, el valor estimado es **3.0 hm³ anuales**, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de las salidas subterráneas por flujo horizontal.

Canal	Longitud (m)	Ancho (m)	h (m)	Gradiente	Transmisividad m^2/s	Caudal m^3/s	Volumen ($hm^3/año$)
S1	2,112	904	40	0.018939394	0.00075	0.012840341	0.404470739
S2	2,952	722.52	40	0.013550136	0.00075	0.007342683	0.231294512
S3	4,096	1,115	40	0.009765625	0.00075	0.008165112	0.257201038
S4	3,374	1,408	40	0.011855365	0.00075	0.012517309	0.394295228
S5	1,186	2,154	40	0.033726813	0.00075	0.054480354	1.716131155
Total							3.0

7.3. Cambio de almacenamiento

El cambio de almacenamiento se estimó con base en la evolución de nivel estático relativa al periodo octubre de 2005 a diciembre de 2007.

Se considera 0.06 de coeficiente de almacenamiento regional para acuíferos volcánicos semiconfinados.

El cambio de almacenamiento para el ciclo 2005 – 2007 es $+5.3 \text{ hm}^3$, el signo positivo significa ganancia en el almacenamiento subterráneo.

La Tabla 5, presenta el cálculo del cambio de almacenamiento subterráneo, se conserva el signo algebraico de la evolución y se estima el área de influencia en cada caso, la evolución neta corresponde al límite del área de balance geohidrológico.

Probablemente el coeficiente de almacenamiento de los acuíferos intermedios superiores sea mayor que el considerado para el balance, en particular si hay predominancia de material granular y se trata de un sistema de flujo libre.

Tabla 5. Cálculo de la variación del almacenamiento octubre de 2005 - diciembre de 2007.

Evolución (m)	Evolución (m)	Área (km^2)	S	$\Delta V(S)$ (hm^3/a)
3.00	3.00	55.20	0.06	10.6
3.00 a 0.00	1.50	21.03	0.06	2.0
0.00 a -1.00	-0.50	31.37	0.06	-1.0
-1.00 a -0.50	-0.75	16.35	0.06	-0.8
-0.50 a 0.00	-0.25	14.20	0.06	-0.2
0.00	0.00	11.34	0.06	0.0
Área balance		149.49	Total	10.6
promedio anual, 2006 - 2007				5.3

Solución a la ecuación de balance

$$R_v = (B + Sh + ETR) - (E_h + R_i) + \Delta V_s$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = (12.5 + 3.0 + 1.7) - (6.8 + 1.7) + 5.3$$

$$R_v = 17.2 - 8.5 + 5.3; \quad \quad \quad R_v = 14.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total se compone de la recarga natural (vertical y horizontal) más la recarga inducida: $R_t = (14.0 + 6.8) + 1.7 = 22.5 \text{ hm}^3/\text{año}$.

8. DISPONIBILIDAD

La disponibilidad media anual de agua subterránea se obtiene de aplicar el procedimiento y la metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, fracción relativa a las aguas subterráneas; se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS$$

DAS	Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica
Rt	Recarga total promedio al año
DNCOM	Descarga natural comprometida
VCAS	Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1. Recarga total

La recarga total anual promedio, R_t , es la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

$$R_t = 22.5 \text{ hm}^3/\text{anuales}$$

8.2. Descarga natural comprometida

La descarga natural comprometida, en términos generales, es la suma de los volúmenes de agua concesionados de manantiales y caudal base de ríos que están comprometidos como agua

superficial pero que son alimentados por aguas subterráneas, y las descargas que se deben conservar para no afectar acuíferos adyacentes, mantener gastos ecológicos y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia fuentes próximas que están siendo aprovechadas. Para el caso del acuífero Arenal, se considera el 40% de las salidas horizontales y el 40% de la evapotranspiración.

$$\text{DNCOM} = 3.0 (40\%) + 1.7 (40\%) = 1.2 + 0.7 = \mathbf{1.9 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas

En el acuífero Arenal, Jalisco, el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), de la Subdirección General de Administración del Agua, al **31 de marzo de 2009** es de **19'782,246** metros cúbicos por año ($\text{m}^3/\text{año}$).

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas

La disponibilidad de aguas subterráneas está representada por el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro los ecosistemas.

De acuerdo con la metodología indicada para determinar la DAS hay que deducir del volumen promedio de recarga total anual el de la descarga natural comprometida y el concesionado e inscrito en el REPDa.

$$\begin{aligned}\mathbf{DAS} &= \mathbf{R_t - DNCOM - VCAS} \\ \text{DAS} &= 22.5 - 1.9 - 19.782246 \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{0.817754 \text{ hm}^3/\text{año}}\end{aligned}$$

La cifra indica que existe un volumen disponible de **817,754 m^3 por año** para otorgar nuevas concesiones en el acuífero denominado Arenal, en el estado de Jalisco.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de su disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero en la que actualmente existe información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación. Conforme se genere mayor y mejor información, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

Comisión Federal de Electricidad. Oficina de Exploraciones Geotérmicas. 1981. Informe climatológico de la zona geotérmica La Primavera San Marcos – Hervores de La Vega, estado de Jalisco.

Comisión Federal de Electricidad. 1982. Estudio Hidrogeológico regional de la zona geotérmica La Primavera-San Marcos-Hervores de La Vega, Jalisco.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Elaboración de los documentos de respaldo de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos (1413) Altos de Jalisco, (1436) Arenal, (1428) Chapala, (1429) Tizapán y (1447) Yahualica, en el estado de Jalisco. Acuífero (1436) Arenal. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Subordinación de Hidrología Subterránea. Coordinación de Hidrología.

Hidroconstrucción y Consultoría, S.A. de C.V. 2001. Estudio para el plan de expansión GEUSA de los acuíferos Toluquilla, Arenal, Cajititlán y San Isidro.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2001. Estudio hidrológico del estado de Jalisco.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos. Subcoordinación de Hidrología y Aprovechamientos Hidráulicos. 1993. Estudio Hidrogeoquímico e Isotópico de la zona Toluquilla - Ocotlán La Barca en el estado de Jalisco.

PERMEX, S.A. de C.V. 1990. Estudio Geológico-Geoquímico por Arsénico del área del Domo sur de La Primavera.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1979. Servicios de Prospección Geológica y Levantamientos Geofísicos en la zona norte del estado de Jalisco. Realizado por la Compañía Geólogos Consultores, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1973. Geohidrología de los valles de Atemajac, Tesistán, Ameca, Ahualulco y San Marcos, Jalisco. Realizado por la Compañía Ariel Constructores, S.A.

Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de la Zona Metropolitana de Guadalajara. 1996. Actualización del estudio geohidroológico zona conurbada de Guadalajara cuencas Toluquilla, Atemajac, Cajititlán. Realizado por la Compañía GEOEX, S.A. de C.V.