

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO PRIMO VERDAD (1423), ESTADO DE
JALISCO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

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.....	5
3.1 Provincia Fisiográfica	5
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	6
3.4 Geomorfología.....	6
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1 Estratigrafía.....	8
4.2 Geología Estructural.....	9
4.3 Geología del subsuelo	10
5. HIDROGEOLOGÍA.....	10
5.1 Tipo de acuífero	10
5.2 Parámetros hidráulicos.....	11
5.3 Piezometría	11
5.4 Comportamiento hidráulico.....	11
5.4.1 Profundidad al nivel estático	11
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	12
5.4.3 Evolución del nivel estático	14
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	16
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16
7.1 Entradas	16
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	17
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	17
7.2 Salidas.....	19
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	19
7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)	19
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	20
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	21
8. DISPONIBILIDAD	22
8.1 Recarga total media anual (R).....	22
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	22
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	23
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	23
9. BIBLIOGRAFÍA	24

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-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y 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 de extracción de aguas subterráneas.

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 Primo Verdad, definido con la clave 1423 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del estado de Jalisco, entre los paralelos 21° 37' y 22° 04' de latitud norte y 101° 40' y 101° 55' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 513 km². Limita al norte con el acuífero Villa García, perteneciente al estado de Zacatecas, al oeste con los acuíferos Valle de Chicalote y el Llano, pertenecientes al estado de Aguascalientes, al este con los acuíferos Ojuelos y 20 de noviembre y al oeste con el acuífero Encarnación, pertenecientes al estado de Jalisco (figura 1).

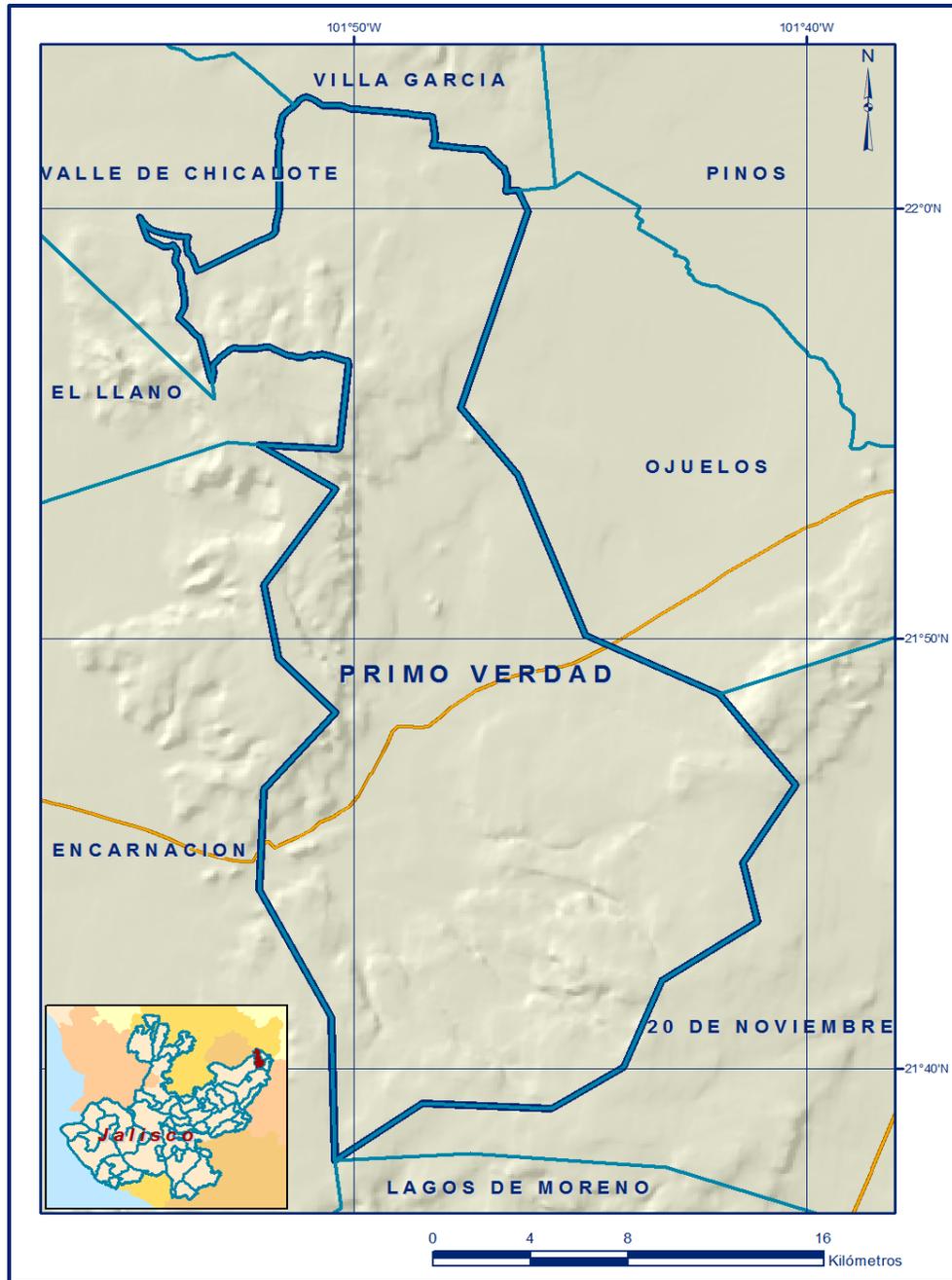


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero queda comprendido en gran parte del municipio Ojuelos de Jalisco y una porción, al suroeste, en el municipio Lagos de Moreno.

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

ACUIFERO 1423 PRIMO VERDAD							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	52	5.4	21	54	31.2	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	101	53	8.5	21	56	0.6	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	101	46	22.5	22	0	25.9	
4	101	46	9.4	21	59	56.5	
5	101	47	38.4	21	55	23.2	
6	101	46	22.1	21	53	47.9	
7	101	44	53.2	21	50	5.5	
8	101	41	55.2	21	48	42.9	
9	101	41	4.4	21	47	39.4	
10	101	40	13.6	21	46	35.8	
11	101	41	23.5	21	44	47.8	
12	101	41	4.4	21	43	25.2	
13	101	43	11.5	21	42	2.6	
14	101	44	2.3	21	40	1.8	
15	101	45	37.7	21	39	4.6	
16	101	48	29.2	21	39	11.0	
17	101	50	25.2	21	37	52.3	
18	101	50	30.0	21	41	11.7	
19	101	52	5.3	21	44	9.7	
20	101	51	58.9	21	46	29.5	
21	101	50	23.6	21	48	17.5	
22	101	51	39.9	21	49	33.7	
23	101	51	58.9	21	51	15.4	
24	101	50	23.6	21	53	28.9	
1	101	52	5.4	21	54	31.2	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Primo Verdad pertenece al Organismo de Cuenca “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en zonas no vedadas en diversos Municipios del Estado de Jalisco y se 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 (DOF) el 7 de Diciembre de 1987. Esta veda se clasifica como tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El usuario principal del agua es el agrícola.

En su territorio no existe ningún Distrito ni Unidad de Riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, de cobertura regional. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS, VALLE DE GUADALUPE, PRIMO VERDAD, LA HUERTA, MIGUEL HIDALGO, CIHUATLÁN, 20 DE NOVIEMBRE, CUQUÍO, COLOTLÁN, TECOLOTLÁN, TOMATLÁN, TEQUILA Y LA BARCA, EN EL ESTADO DE JALISCO. Elaborado por la Universidad Autónoma del Estado de México, para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 2010.

Este estudio tuvo como objetivo actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas del acuífero para determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Como parte de las actividades de campo se realizó un censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue 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

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el área del acuífero se encuentra ubicada dentro del sector occidental de la Provincia Fisiográfica Mesa Central, la cual penetra al estado de Jalisco por el noroeste ocupando el 3.44% de la superficie total estatal.

Ésta provincia fisiográfica presenta diferentes paisajes topográficos de los cuales destacan las sierras altas con mesetas lávicas, llanuras aluviales y valles, formando parte de la Subprovincia Llanos de Ojuelos – Aguascalientes. Esta Subprovincia se encuentra al noreste del estado y limita al sur con los Altos de Jalisco; inmediatamente al norte de Encarnación de Díaz. Comprende una porción pequeña de la entidad (2,310.297 km²), que cubre totalmente el municipio de Ojuelos y parte de Encarnación de Díaz y Lagos de Moreno.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes para el acuífero se encuentran en el rango de semiseco, con otoño, invierno y primavera secos; y semicálido con invierno benigno. El régimen de lluvias se registra en los meses de junio y julio. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 3 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Villa Garcia-Los Campos cuyo registro comprende un periodo de 10 años, Los Negritos y Presa La Duquesa un periodo de 26 años. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **522 mm** y **17.9° C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1835 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 12 “Lerma Santiago”, Cuencas del Río Verde Grande y la Región Hidrológica 37 “El Salado” (en una pequeña zona al este del acuífero), Cuencas de San Pablo y otras.

La cuenca del sistema Lerma-Santiago ocupa una extensión de 84,559 km² incluyendo a los estados vecinos. Sus principales cauces son arroyos intermitentes: De La Centrífuga, Amador, Colorado, Mimbre, Bocadoillo, Coronas, Lagos, La Saucedá, Bernalejo, Cuarenta, Ojo de Agua, La Presita, Negritos, El Zapote, Tampico, Tepetatillo y otros más.; algunos manantiales como: Las Lagunas y El Saucillo de la Laguna. También existen lagunas y presas como: El Enano, La Purísima, Cebolleta, Jesús María, San Juan, Juan de Vaqueros, El Tanque, Las Amapolas, El Bajío, El Saucillo y otras sin nombre.

3.4 Geomorfología

En esta zona se presentan relieves mesetiformes elevados por encima de los 2,200 y 2,400 msnm, en ellas se desarrolla un drenaje dendrítico en su gran mayoría con dirección NW-SE y una serie de sierras y lomeríos composición riolítica en las zonas que bordean el acuífero. Los sistemas de topoformas más representativos de la subprovincia, dentro del estado son: Las Llanuras de Piso Rocosó, cubiertas por suelos someros de aluvión y salpicadas de pequeñas charcas; y las Mesetas con Cañadas que se encuentran entre las llanuras.

Las Sierras Bajas y los Lomeríos probablemente se derivaron de la erosión de mesetas similares a las ya mencionadas; sus laderas son rectas y su elevación es de 2,300 y 2,250 msnm respectivamente. En general, la litología de estos sistemas de topoformas está constituida por rocas de origen volcánico, ricas en sílice.

4. GEOLOGÍA

La geología superficial muestra una presencia predominante de riolitas tobáceas intercaladas con lutitas-areniscas, al sureste de la cuenca y al norte y centro materiales aluviales (figura 2).

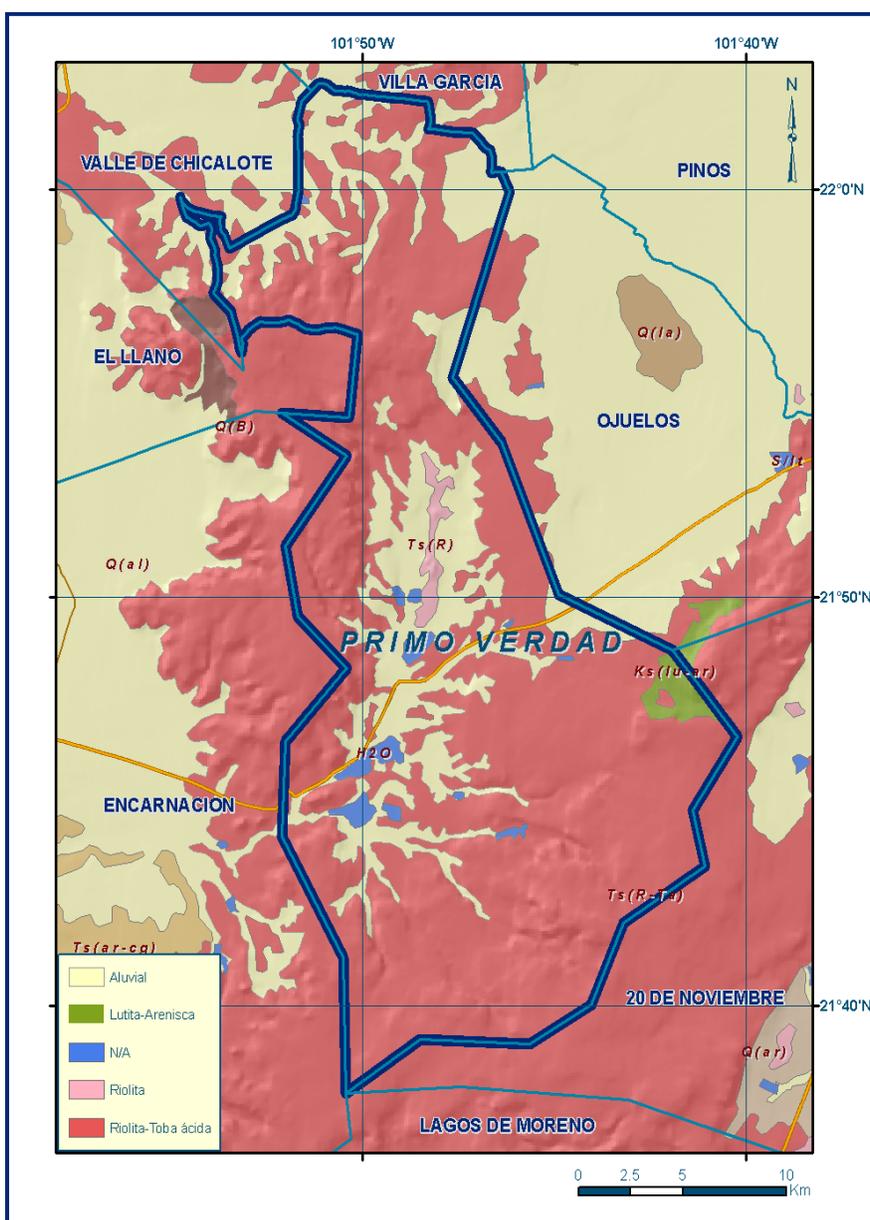


Figura 2. Geología general del acuífero

La deformación extensional cenozoica de la Mesa Central, ha sido el principal factor que ha configurado esta provincia, los grandes sistemas de fallas que se localizan en ella han jugado un papel fundamental en su evolución geológica. Los límites de la Mesa Central son, al norte el sistema Transversal de Parras de la Sierra Madre Oriental, al sur del sistema de fallas del Bajío, al este el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y al oeste el graben de Aguascalientes y el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes.

En su interior se distinguen dos sectores, el septentrional, que se encuentra en un estado de erosión más avanzado y donde no se tienen evidencias de que haya ocurrido actividad tectónica significativa en el Neógeno; y el meridional, donde tuvieron lugar eventos tectónicos extensionales importantes en el Oligoceno y de menor magnitud del Mioceno al Cuaternario.

La Mesa del Centro pertenece a los períodos Cuaternario, Paleógeno-Neógeno y Triásico. Litológicamente estos relieves están compuestos por rocas ígneas extrusivas ácidas (ignimbritas, riolitas y dacitas) posiblemente de edad Neógeno (Mioceno) y de lavas básicas (basaltos) de edad plio-pleistocénica. Las primeras reposan sobre un plateau más antiguo permotriásico (?) compuesto por rocas plutónicas y metamórficas que afloran en las montañas que se han denominado como Bloques Marginales de la Mesa Central (sierra de San Isidro y sierra de Cuatralba).

Indudablemente que el tectonismo también afectó a esta unidad geológica separándola en bloques diferencialmente elevados; así, la Mesa del Toro se encuentra a 2,500 m, la Mesa de Chinampas a 2,400 m y la Mesa de los Hoyos a 2,320 msnm.

4.1 Estratigrafía

El registro estratigráfico está conformado por rocas, ígneas y sedimentarias de origen continental, cuyas edades comprenden del Cretácico al Reciente. Las rocas más antiguas se encuentran representadas en la zona sureste de la cuenca y pertenecen a la Formación Caracol, constituida por areniscas y lutitas (Ks (lu-ar)), cuya edad corresponde al Cenomaniano (Coniaciano-Maestrichtiano).

Posteriormente el depósito de riolita (Ts(R)) y riolita tobácea (Ts (R-Ta)), producto de la intensa actividad volcánica que existió durante el Mioceno – Plioceno en la porción noroccidental de México.

Al Cuaternario corresponden los aluviones (Q(al)) de diversas granulometrías, producto erosivo de las rocas preexistentes, constituidos por horizontes mal clasificados de arenas, limos y arcillas que se han depositado principalmente en las márgenes de los arroyos antiguos o actuales.

Cuando existen depósitos adicionales en los valles, estos son de poco espesor y en general no tienen una extensión importante, por lo cual sólo aparecen en las zonas topográficamente bajas.

La formación más perturbada es la Caracol, debido a la estratificación delgada y la presencia de lutitas, lo que da a esta formación una gran competencia al ser sometida a esfuerzos, esto es evidenciado por la presencia de clivaje en dichas rocas.

Los esfuerzos que dieron origen a estos plegamientos fueron compresionales y debieron actuar con una dirección NW – SE.

4.2 Geología Estructural

El marco tectónico-estructural que se observa en el área está relacionado a dos fases: los plegamientos que perturbaron a las rocas sedimentarias de la región y las fallas y fracturas que se encuentran afectando a las rocas paleógeno-neógenas y mesozoicas. Estos fallamientos y fracturamientos fueron originados por la Orogenia Laramide en el periodo Paleógeno-Neógeno, posteriormente a la depositación de las rocas.

Los plegamientos ocurrieron a principios del Paleógeno, cuando los sedimentos marinos del Cretácico sufrieron deslizamientos submarinos dirigidos al NE. Estos movimientos orogénicos crearon extensos anticlinorios y sinclinorios.

En la porción este de la zona se observan las rocas sedimentarias afectadas por plegamientos originados por los esfuerzos tectónicos generados por la Orogenia Laramide, durante el Cretácico Tardío.

De acuerdo a los esfuerzos que estuvieron acompañados por fallas y fracturas, las cuales liberaron parte de la energía generada por los esfuerzos compresionales, posteriormente hubo un evento de relajamiento de las rocas causando su reacomodo.

4.3 Geología del subsuelo

Dentro de los límites del acuífero no se han realizado estudios para conocer su geometría, sin embargo se puede extrapolar, de acuerdo con la información geofísica obtenida en acuíferos vecinos, los cortes litológicos de pozos y las evidencias de campo, principalmente por la similitud geológica con los acuíferos Ojuelos y 20 de Noviembre, donde se han realizado sondeos de resistividad eléctrica con una profundidad teórica de 500 m, dispuestos en secciones, y donde el subsuelo parece tener un comportamiento similar.

Es posible definir que en el subsuelo se presentan riolitas y riolitas-tobáceas; sobreyacidas en algunas áreas por delgados espesores de depósitos aluviales y fluviales, así como de piedemonte hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero.

El acuífero se encuentra alojado, en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales producto de las partes altas de las sierras, que han sido transportados por escurrimientos superficiales para ser depositados en los cauces de los arroyos y en los valles. Su espesor es variable y solo alcanza algunas decenas de metros en los cauces de los arroyos ubicados en el centro y norte.

La parte inferior está conformada por rocas volcánicas (riolitas y riolitas-tobáceas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. Estas mismas rocas constituyen las barreras al flujo subterráneo y el basamento hidrogeológico, cuando desaparece su fracturamiento.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica e hidrogeológica, se tiene la presencia de un acuífero **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, conformado por una secuencia de riolitas y tobas de permeabilidad baja. Este afloramiento que funciona como zona de recarga genera un escurrimiento superficial hacia el centro del valle, compuesto por materiales aluviales, en donde se encuentran la mayoría de los aprovechamientos.

La mayoría de los materiales presenta buena permeabilidad; a profundidad se presentan horizontes semiconfinantes de arcilla o rocas volcánicas con variaciones en su permeabilidad.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se realizaron 3 pruebas de bombeo para determinar los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo, para describir satisfactoriamente el comportamiento histórico y actual del recurso subterráneo.

Para fines de comparación, también se recurrió a la información disponible de pruebas de bombeo en los pozos que fueron instalados en diferentes épocas.

Mediante un análisis comparativo de los resultados y de la estratigrafía, se establece que los valores de transmisividad varían de 1.5 a $0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, con un promedio de **$1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , en las zonas donde la estratigrafía está compuesta de una combinación de sedimentos aluviales y formaciones fracturadas de rocas ígneas.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información del estudio realizado en 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático en 2010 (figura 3), se observa que la profundidad media al nivel estático varía en un rango de 2 a 5 m, como es evidente en las poblaciones Chinampas, La Paz, La Presa y Licenciado Primo Verdad.

Los valores a profundidad al nivel estático se incrementan gradualmente, por efecto de la topografía, desde la zona aledaña a los cuerpos de agua y cauces de los arroyos hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

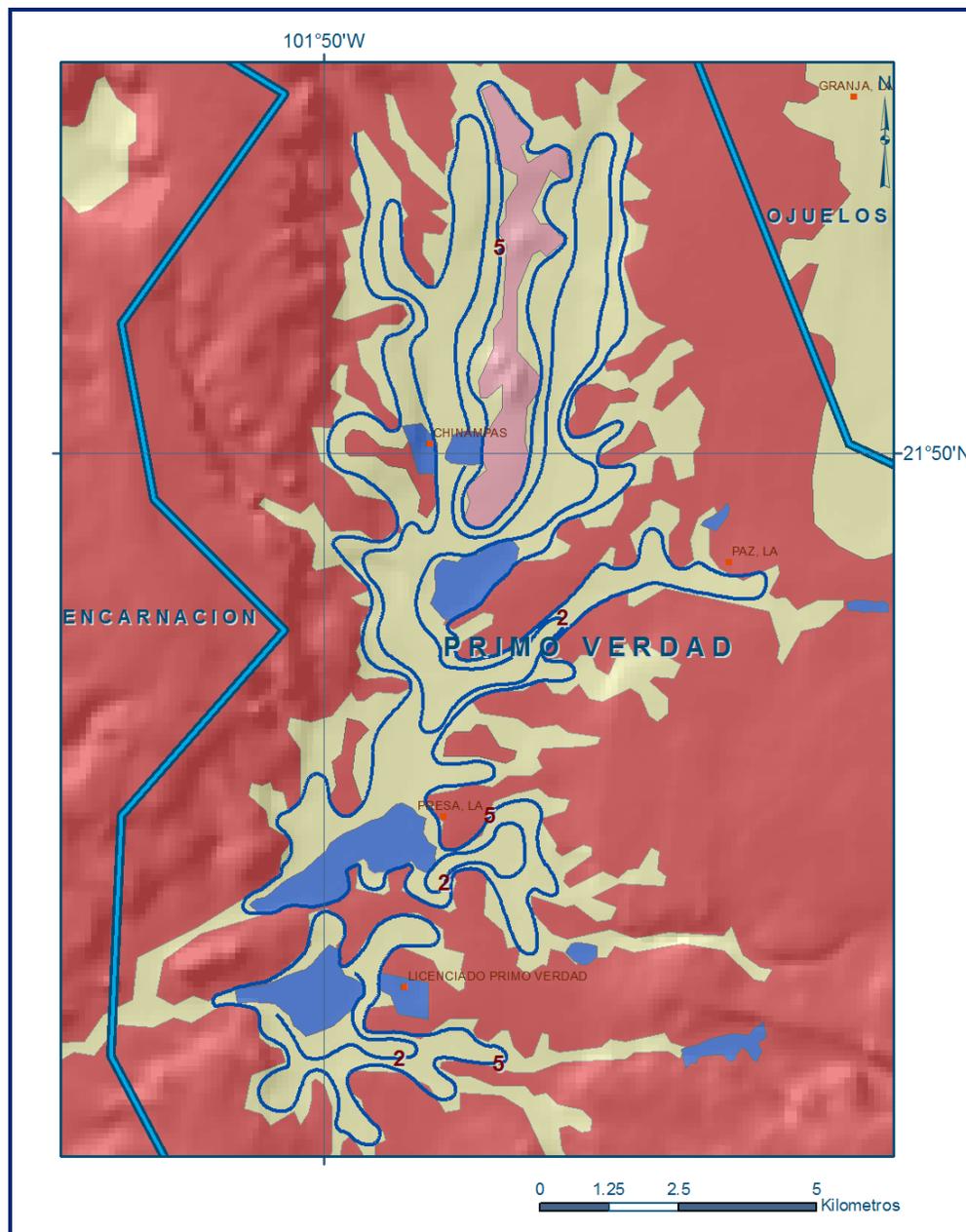


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para 2010 (figura 4), se observa que el sistema de flujo natural del acuífero tiene una dirección noroeste-sureste, con valores de 2130 msnm en las zonas topográficamente más altas, descendiendo gradualmente hasta 2080 msnm, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo.

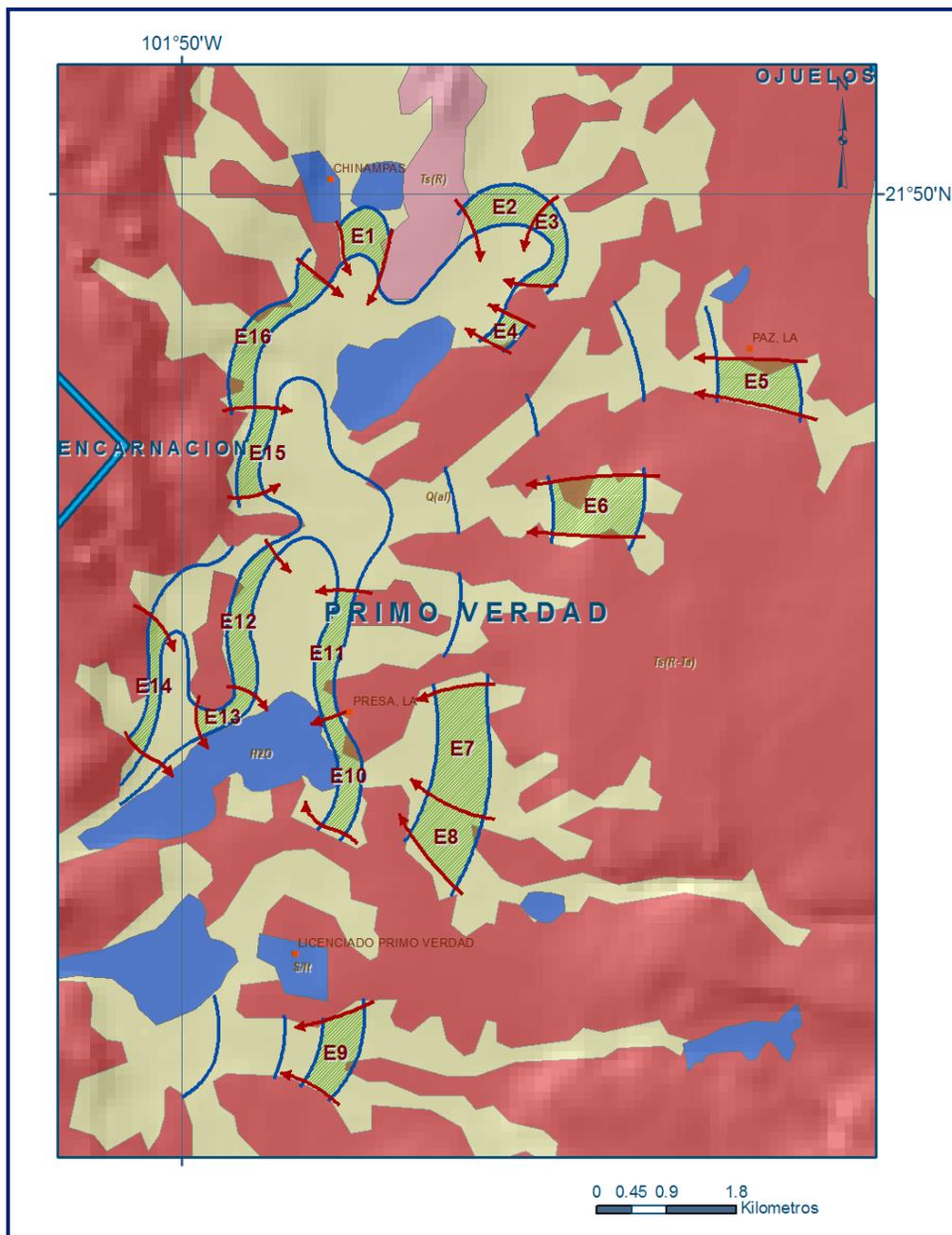


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

En el sistema de flujo no se observan conos de abatimiento en las regiones donde existen los principales asentamientos humanos, tales como Chinampas, La Presa y Licenciado Primo Verdad, ya que no existe concentración de pozos. De esta manera la configuración muestra el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Además, la configuración de elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Las mediciones realizadas en 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 12 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: parámetros fisicoquímicos Temperatura (°C), Potencial de Hidrogeno (pH), Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Sólidos Totales Disueltos (mg/l), Dureza Total (mg/l), DQO (mg/l), iones mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} y HCO_3^{-}), así como determinaciones de B^{3+} , $\text{As}^{+/-3}$ y F^{-} , para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 82 a 356 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Con respecto a la conductividad eléctrica, esta presenta valores que varían de 113 a 465 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores de temperatura varían de 16.9 a 19.9 °C, los de pH varían de 7.1 a 8.1 y los valores de dureza total varían de 20 a 82 mg/l.

De los resultados obtenidos de la elaboración de los diagramas de Piper, se identifican dos familias: la primera, denominada sulfatada sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$), con bajo contenido iónico y prevalencia del ion Na.

Esta clasificación abarca los pozos (50%, n=6) que se encuentran localizados sobre la intercalación de una litología predominantemente riolítica y aluvial, que se extiende sobre la mayor parte del acuífero, especialmente en las zonas topográficamente accidentadas.

En la parte central del acuífero, el agua es suave con dureza temporal y muy bajas concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- . Los pozos de esta clasificación (50%, n=6), denominada bicarbonatada sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), se encuentran posicionados sobre una litología predominantemente riolítica y tobácea.

En cuanto a las concentraciones de arsénico, las normas oficiales mexicanas establecen límites máximos permisibles de $\text{As}^{+/-3}$ que varían de 0.025 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para uso doméstico (NOM, 2021) a 0.100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para uso agrícola (SEDUE, 1989). El 100% (n=12) de pozos analizados se sitúa dentro del rango permisible para uso doméstico, con una concentración promedio menor de 0.001 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

En cuanto al flúor, la concentración promedio se encuentran dentro de la normatividad con un valor de 0.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (0.15 \leq F \leq 0.68).

Por otra parte, el 100% (n=12) de las muestras presenta concentraciones de boro que superan el rango permitido para uso doméstico o riego con una concentración promedio de 1.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Por último, la demanda química de oxígeno (DQO) en las 12 muestras de agua presenta concentraciones que se encuentran dentro de las normas establecidas con un valor promedio de 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0 < \text{DQO} < 22$), por lo que puede descartarse la ocurrencia de procesos naturales o de origen antropogénico que afecten su calidad.

Según el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las muestras se clasifican como C1S1, que representa contenido bajo de sales y baja proporción de sodio intercambiable, que pueden utilizarse para riego agrícola sin ninguna restricción.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró un total de 200 aprovechamientos, de los cuales 180 se encuentran activos y 20 inactivos. De ellos, 32 se destinan al uso Público Urbano para dotación de agua potable a las comunidades de la región y 148 para uso Agrícola. El volumen total de extracción asciende a **13.5 hm³/año**, de los cuales 12.5 hm³/año (92.6 %) se utilizan para uso Agrícola, y 1.0 hm³/año (7.4 %) es para uso Público Urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010, en un área total de 70 km² del acuífero que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos.

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 la siguiente:

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

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 de un acuífero:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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:

$$Rv + Eh + Ri - B - Dm - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv= Recarga vertical

Eh= Entradas por flujo subterráneo horizontal

Ri= Recarga Inducida

B= Bombeo

Dm = Descarga a través de manantiales

ETR= Evapotranspiración

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene lo siguiente

$$Rv = B + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al 2010 (figura 4); con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

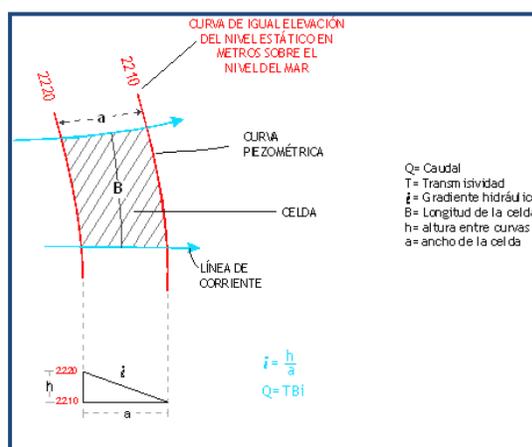
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m²/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona. La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 5 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

Tabla 5. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (2010)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	550	480	10	0.020833	0.0010	0.0115	0.4
E2	1035	380	10	0.026316	0.0015	0.0409	1.3
E3	1035	415	10	0.024096	0.0015	0.0374	1.2
E4	415	345	10	0.028986	0.0010	0.0120	0.4
E5	550	1035	5	0.004831	0.0010	0.0027	0.1
E6	550	1105	10	0.009050	0.0010	0.0050	0.2
E7	1380	690	10	0.014493	0.0010	0.0200	0.6
E8	760	760	10	0.013158	0.0010	0.0100	0.3
E9	1035	480	10	0.020833	0.0015	0.0323	1.0
E10	1380	275	10	0.036364	0.0008	0.0401	1.3
E11	1655	240	10	0.041667	0.0010	0.0690	2.2
E12	1585	275	10	0.036364	0.0015	0.0865	2.7
E13	825	206	10	0.048544	0.0010	0.0400	1.3
E14	1380	240	10	0.041667	0.0010	0.0575	1.8
E15	1105	345	10	0.028986	0.0015	0.0480	1.5
E16	1795	345	10	0.028986	0.0015	0.0780	2.5
Total entradas							18.6

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **18.6 hm³/año**.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40% del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró un 20% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea mayor y la presencia de estratos de media permeabilidad en el subsuelo. El volumen extracción de agua subterránea para uso agrícola es de 12.5 hm³ anuales, si consideramos que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero, obtenemos que el volumen de 2.5 hm³/año.

El rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución es del orden del 20 al 45%, para el cálculo de fugas en la red de distribución en el acuífero de Primo Verdad se consideró un valor conservador del 20%. De este modo, esta componente del balance se calculó del volumen de extracción para uso público-urbano que es de 1.0 hm³ anuales, obteniendo un valor de 0.2 hm³/año. Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida asciende a **Ri = 2.7 hm³/año.**

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por bombeo (B), las descargas de manantiales (Dm) y por evapotranspiración (ETR). No existen salidas subterráneas horizontales (Sh) ni descarga por flujo base de los ríos (Dfb).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a 13.5 hm³ anuales.

7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

No se dispone de un registro histórico de niveles ni de los aforos en los manantiales del acuífero, un cálculo aproximado de esta componente con base en los caudales estimados durante las visitas de campo es de **2.7 hm³/año.**

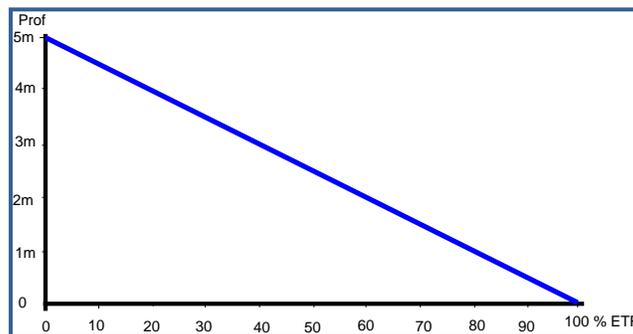
7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

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 considera 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. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.6	P ² =	272484
P(mm) =	522	L ² =	890597.624
L =	943.7148		
ETR (mm)	475.3		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 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 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta una superficie de 45 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración obtenida de 475.3 mm, se tiene que la ETR = 45 km² (0.4753 m) (0.4) = 8.5.

Por lo tanto; la **ETR = 8.5 hm³/año.**

7.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento y se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes.

Por lo que, para fines del balance de aguas subterráneas, el cambio de almacenamiento en el acuífero es nulo; es decir, **$\Delta V(S) = 0$.**

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

$$\mathbf{Rv = B + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Ri} \quad (2)$$

$$\mathbf{Rv = 13.5 + 2.7 + 8.5 + 0.0 - 18.6 - 2.7}$$

$$\mathbf{Rv = 3.4 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 3.4 + 18.6 + 2.7 \\ R &= 24.7 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **24.7 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **7.0 hm³/año** que corresponde a la descarga a través de los manantiales y al 50% de la evapotranspiración.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **9,722,870 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye 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 a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 24.7 - 7.0 - 9.722870 \\ \text{DMA} &= 7.977130 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **7,977,130 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de los acuíferos, Valle de Guadalupe, Primo Verdad, La Huerta, Miguel Hidalgo, Cihuatlán, 20 de Noviembre, Cuquío, Colotlán, Tecolotlán, Tomatlán, Tequila y La Barca, en el estado de Jalisco. Elaborado por la Universidad Autónoma del Estado de México.