

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LA HUERTA (1430), 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.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA	9
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo	11
5. HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Tipo de acuífero	12
5.2 Parámetros hidráulicos.....	13
5.3 Piezometría	13
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	14
5.4.3 Evolución del nivel estático	15
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	16
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	17
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
7.1 Entradas	17
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	18
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	18
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	20
7.2 Salidas.....	20
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	20
7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)	20
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	21
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	22
8 DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	24
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	24
9 BIBLIOGRAFÍA	26

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 La Huerta, definido con la clave 1430 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción Suroeste del estado de Jalisco, entre las coordenadas geográficas 19°24' y 19°51' de latitud norte y 104°18' y 104°50' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,519 km². Limita al norte con los acuíferos Tomatlán y Unión de Tula, al sur con Cihuatlán, al este con Autlán y Cuautitlán y al oeste con Miguel Hidalgo, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco (figura 1). Geopolíticamente el acuífero queda comprendido parcialmente en los municipios de Autlán de Navarro, Villa Purificación, Casimiro Castillo, Cuautitlán de García Barragán y La Huerta.

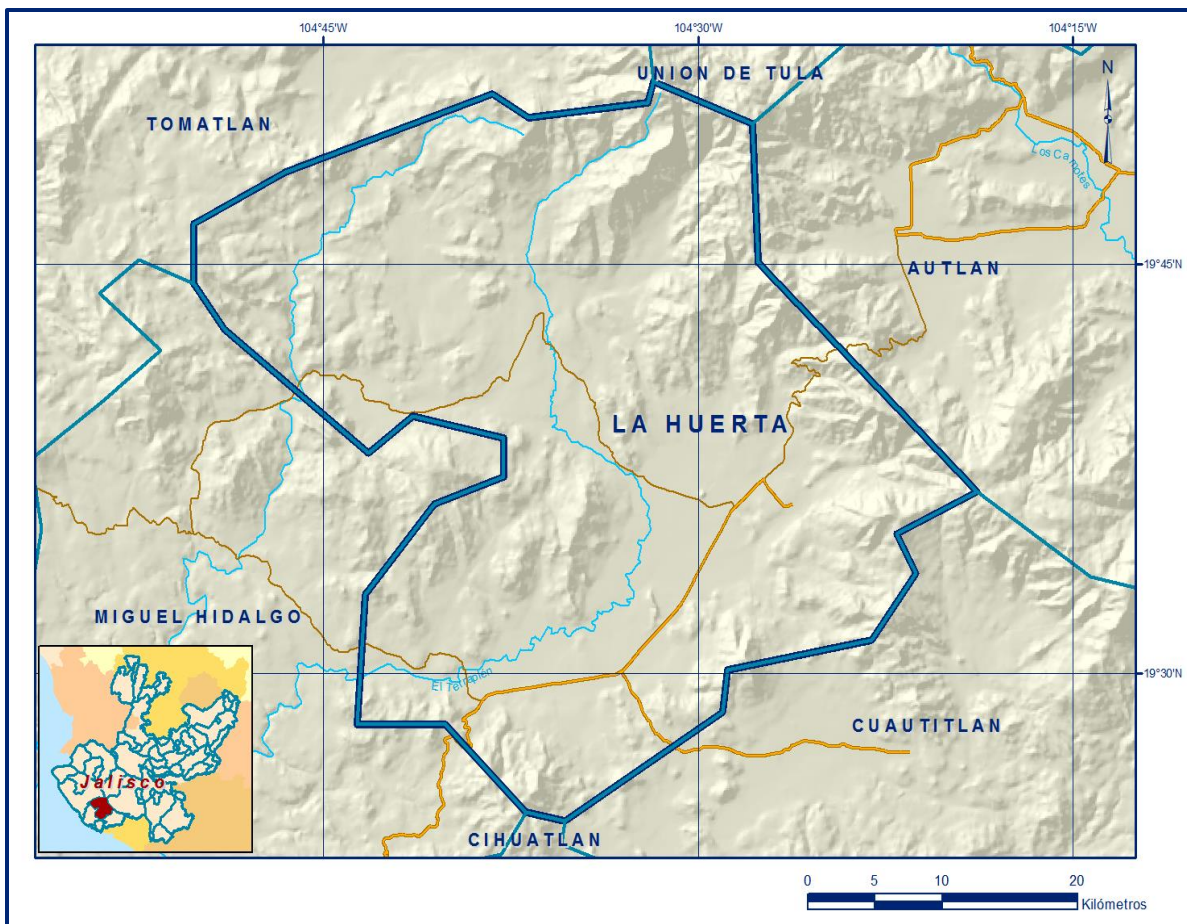


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 1430 LA HUERTA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	104	31	48.8	19	51	42.5
2	104	27	49.9	19	50	9.6
3	104	27	36.6	19	45	4.2
4	104	18	52.1	19	36	39.7
5	104	22	4.7	19	35	6.7
6	104	21	18.2	19	33	40.4
7	104	23	4.4	19	31	14.4
8	104	28	49.6	19	30	8.0
9	104	29	2.9	19	28	35.1
10	104	35	21.3	19	24	36.1
11	104	36	54.2	19	24	56.0
12	104	40	6.7	19	28	8.5
13	104	43	39.2	19	28	8.5
14	104	43	19.3	19	32	54.0
15	104	40	33.3	19	36	13.1
16	104	37	47.3	19	37	12.9
17	104	37	47.3	19	38	39.2
18	104	41	26.4	19	39	25.6
19	104	43	12.6	19	38	6.0
20	104	48	57.8	19	42	38.1
21	104	50	10.8	19	44	17.7
22	104	50	10.8	19	46	30.5
23	104	46	31.8	19	48	23.3
24	104	38	13.9	19	51	15.9
25	104	36	47.6	19	50	22.8
26	104	32	2.1	19	50	56.0
1	104	31	48.8	19	51	42.5

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero La Huerta pertenece al Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. Cronológicamente, el primer decreto está vigente en la parte suroeste y es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la parte que corresponde a los Municipios del Estado de Jalisco y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento del agua”*, publicado en el DOF, el 21 de noviembre de 1984. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

El segundo decreto que rige en la mayor parte del acuífero es el *“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 del agua”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el 07 de noviembre de 1987.

Esta veda es 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 2. El principal uso del agua es el agrícola.

En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No se han realizado estudios geohidrológicos de evaluación en el territorio que comprende el acuífero, el único que abarca su superficie es el estudio denominado:

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 Nacional Autónoma de México para la Comisión Nacional del Agua en 2010.

El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el análisis de la evolución de los niveles del agua; obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el área que cubre el acuífero La Huerta se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincia Sierras de la Costa de Jalisco y Colima. El tipo de topoformas que presenta son variables, y están representadas principalmente por sierras altas alargadas y mesas orientadas noroeste-sureste.

La Provincia Sierra Madre del Sur inicia en la frontera entre los estados de Jalisco y Nayarit hasta el estado de Oaxaca cubriendo un área de 258, 274 km², aunque dentro del territorio jalisciense su extensión es aproximadamente de 246 km de longitud. Limita al norte con la Faja Volcánica Transmexicana; al sur, con el Océano Pacífico y al oriente, con las provincias de Sierras y Valles del Sureste y la parte sur de la Planicie Costera del Golfo (Velázquez y Ordaz, 1992). Su parte más prominente es muy angosta, formando un espinazo montañoso marginal hacia la costa.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en el acuífero La Huerta se encuentra en el rango del semicálido subhúmedo con lluvias en verano, al cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 24.3° C.

La climatología de la cuenca es heterogénea, sus variaciones anuales van del predominantemente semiseco al húmedo, con otoño y primavera secos, e invierno de seco a húmedo, hasta el cálido, sin cambio térmico invernal bien definido.

Las categorías A (w1) y A (w2), del tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano, predominan en casi la totalidad de la cuenca; este clima es el más cálido de los que se distribuyen en la entidad, llegando a prevalecer sobre la cuarta parte de su territorio. Estas condiciones se extienden sobre los municipios de Villa Purificación, La Huerta y Casimiro Castillo.

Para esta zona la máxima ocurrencia de heladas en el año es de 1 o 2 días. Los vientos son variables, en el municipio de Villa Purificación tienen una dirección preferente hacia el oeste, sobre el municipio de Casimiro Castillo hacia el norte y en La Huerta en dirección sureste y noreste, con una intensidad media de 4 km·h⁻¹.

En las regiones situadas al noreste y sureste de la cuenca, sobre al área de los municipios de Ayutla y Autlán de Navarro, respectivamente, predomina la categoría (A)C(w1), del tipo semicálido subhúmedo del grupo C, con lluvias en verano.

Este clima es el que se extiende con mayor amplitud sobre la porción central del estado, que corresponde a la parte plana y menos montañosa del relieve. Para esta zona sólo se registran 24 días con heladas hacia el municipio de Ayutla. Los vientos son variables, para el municipio de Ayutla van en dirección del sur y en Autlán hacia el oeste.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de las estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1,101 mm y 24.3 °C** respectivamente.

De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2,055.5 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno en verano de junio a octubre, cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias que abarca de febrero a abril, con precipitaciones menos significativas. En el mes de septiembre se tiene la mayor lámina de precipitación; mientras que en el mes de marzo se registra la menor.

En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, mayo es el mes más cálido, con una temperatura media de 31.5°C, en tanto que el mes de enero registra la menor temperatura media, 17 °C.

3.3 Hidrografía

El acuífero La Huerta se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 9 “Costa de Jalisco”, que cubre gran parte de la entidad; en ella se encuentran las cuencas: Chacala-Purificación (que representa un 60%), Río San Nicolás-Cuitzmala (que representa un 20%), Río Armería (que representa un 10%) y Río San Nicolás (que representa un 10%). Los ríos más importantes para el acuífero La Huerta son El Terraplén, que divide al municipio de Villa Purificación en dos partes, de norte a sur extendiéndose hacia los municipios de Casimiro Castillo y La Huerta.

El Remidadero es el río que nace en Villa Purificación y se extiende hacia el municipio de la Huerta, además de estos dos ríos principales, también es importante mencionar la presencia del río Chacala, ubicado sobre el municipio de Cuautitlán que funciona como límite estatal entre Colima y Jalisco.

3.4 Geomorfología

El relieve montañoso de la Sierra Madre del Sur (SMS) muestra varias etapas de deformación, siendo más evidente la intrusión de cuerpos graníticos en las rocas metasedimentarias (Ferrari et al., 1997), sedimentarias, ígneas preexistentes y secuencias volcanosedimentarias.

Los procesos sedimentarios constituyen sierras plegadas y bloques colgados, mientras que el relieve de las rocas volcanosedimentarias e ígneas es de sierras complejas con pendientes escarpadas.

Para los cuerpos intrusivos, el relieve es abrupto en zonas poco erosionadas y se exhibe como cerros de topografía suave en zonas erosionadas, llegando a presentar un intemperismo esferoidal. La región se encuentra en una etapa de madurez avanzada dentro del ciclo geomorfológico (INEGI, 2001).

La mayor parte del territorio de la cuenca de La Huerta posee una topografía muy accidentada, especialmente hacia el extremo oriental. Sobre el municipio de Villa Purificación pasan las estribaciones de la Sierra de Cacoma, ocupando menos de la mitad de su superficie con elevaciones que van de los 800 a los 1,800 m.

En la parte central de la cuenca, sobre el municipio de Casimiro Castillo, tiene menor presencia una topografía semiplana compuesta por laderas de la sierra y lomas, en esta zona termina la sierra de Cacoma; sin embargo, se registran elevaciones entre los 650 a 800 m, entre los que se encuentran el cerro de La Yerba, cerro de Mata de Tule, La Lagunilla, Chagavilancillo y Las Enramadas.

La parte suroccidental de la cuenca, sobre el municipio de la Huerta, es muy accidentada, aunque la mayor parte de sus elevaciones oscilan entre los 400, 500 y hasta 800 msnm. La mayor elevación es de 1,200 msnm y corresponde al Cerro Plazola que se encuentra al este del municipio. Así mismo, cuenta también con algunas planicies localizadas en la parte central, así como otras hacia el este.

4. GEOLOGÍA

La geología general emplazada en la región que comprende el acuífero está integrada por un basamento de rocas metamórficas desplazadas durante el Jurásico, así también rocas volcánicas y vulcanoclásticas del Cretácico temprano y del Cenozoico, así como formaciones impermeables compuestas por dolomías, calizas recristalizadas y lechos de arcilla, arena y limo del Paleozoico, Triásico y Jurásico.

Sobre la cuenca de La Huerta incide la subregión geomorfológica denominada Sierras Transversales, constituida por una serie de cadenas montañosas y valles de calizas y dolomías del Cretácico altamente karstificadas, mesetas y valles altos de rocas sedimentarias continentales del Cenozoico, aluvión del Holoceno y grandes depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario (figura 2).

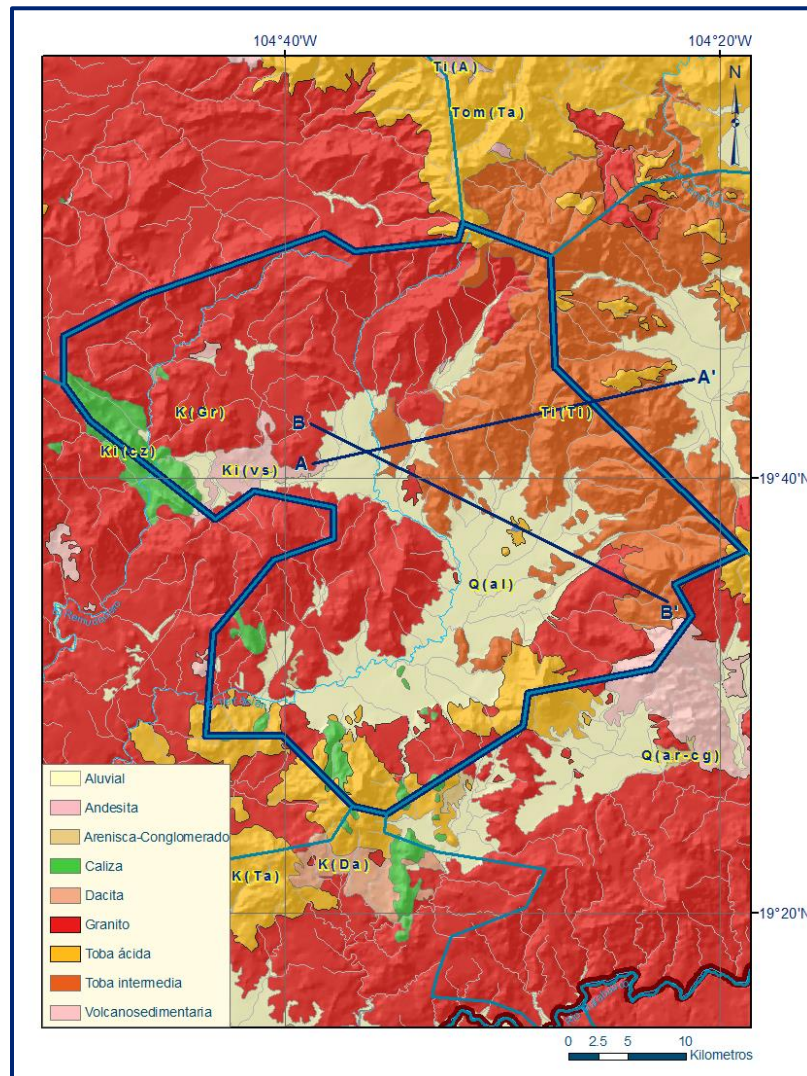


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en esta región está constituida por sedimentos cuya edad varía del Cretácico Inferior al Reciente de tipo granito, toba, andesita, conglomerado, así como sedimentos aluviales.

Con base en la información geológica superficial del Servicio Geológico Mexicano, se identifican nueve unidades litológicas, de las cuales en el acuífero afloran granito, arenisca conglomerado, tobas intermedias, caliza, arenisca y depósitos aluviales.

Las unidades estratigráficas más antiguas del estado son las rocas sedimentarias, en particular calizas de plataforma de textura micrítica que aflora al sur del poblado Purificación y en el arroyo del mismo nombre, así como en pequeños afloramientos de caliza recristalizada que aflora en el cerro El Altítle.

Estas rocas son correlacionables a la Formación Morelos del Cretácico inferior. Sobreyaciendo a esta unidad, se encuentra expuesta una secuencia volcanosedimentaria, que comprende al grupo Volcánico Inferior de la sierra Madre Occidental del Cretácico superior (Mc Dowell y Keiser, 1977), constituida por una alternancia de lutitas y areniscas con intercalaciones de tobas y derrames riolíticos con estratos de caliza recristalizada, por la edad se infiere un contacto discordante.

Esta secuencia subyace discordantemente a dos paquetes de rocas volcánicas que constituyen la provincia geológica de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Keiser, 1977). El primero está constituido por un paquete ácido, representado por riolitas, ignimbritas, tobas riolíticas y dacitas, con texturas afaníticas y tobácea, con estructura compacta. Por su posición estratigráfica se atribuye una edad del Oligoceno al Mioceno, por lo que se le puede correlacionar con la Serie Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental.

Sobreyaciendo a esta unidad se observa una acumulación volcánica de composición intermedia, constituida por andesitas y tobas andesíticas, su textura varía de afanítica a fanerítica y estructura compacta. Hacia la cima de la secuencia volcánica se presentan sedimentos de tipo continental, representados por un conglomerado polimíctico mal clasificado, constituido por fragmentos de granito-granodiorita, riolita, andesita y tobas. Por su posición estratigráfica se le atribuye una edad del Plioceno superior.

Durante el Cuaternario se depositaron limos, arcillas, arenas y boleos, producto de la disgregación de las rocas existentes, originando acumulaciones al pie de las formaciones serranas, dando origen a los depósitos de aluvión existentes. La columna estratigráfica, fue intrusionada por troncos y apófisis de composición granítica-granodiorítica, emplazados durante el Cretácico Superior-Cenozoico inferior (Paleógeno) (Negendank, 1986). Estas rocas presentan una textura fanerítica y equigranular, su estructura es compacta con porciones deleznable por efectos de alteración. Estas rocas se observan caolinizadas y oxidadas principalmente.

4.2 Geología estructural

Los principales lineamientos estructurales, caracterizados por fallas normales y fracturamientos interpretados, adoptan tendencias preferenciales NW-SE y N-S (Arroyos Barajas y La Palma), con una dirección N50°-60°W, que se prolonga hacia el Rancho Purificación; al sur de éste se presentan escalonamientos y fosas bien definidas. Los curvilineamientos están asociados a estructuras volcánicas, domos, posibles calderas, o bien, a emplazamientos plutónicos sepultados.

Las estructuras anulares de mayor magnitud, se encuentran en el Cerro Majoma, al N70°W de Purificación; así como en los alrededores de los Cerros Santa Rosa, Prieto, Las Habas y al oriente de la localidad de Piedra Pesada.

Existen otras estructuras anulares que se pueden relacionar con domos riolíticos, como en el caso de los Cerros Pelón y El Nance; otro curvilineamiento que podría corresponder a un cono volcánico, se localiza en la Laguna El Capulín. Las fases de deformación de la región, se relaciona con eventos compresivos, ocurridos durante el Jurásico-Cretácico y fases distensivas, evidenciadas por el fallamiento normal y el emplazamiento plutónico Cretácico-Cenozoico, así como el vulcanismo Cenozoico.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de los cortes litológicos de pozos, como parte del estudio realizado en 2010 y las evidencias de la geología superficial, es posible definir qué el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, que en algunos pozos se interdigitan con limos y arcillas o aglomerados en matriz arcillosa lo que sugiere un grado de confinamiento y en el conglomerado polimíctico. Su espesor es reducido.

La porción inferior se aoja en una secuencia de rocas ígneas, principalmente volcánicas acidas y granito, que presenta permeabilidad secundaria por fracturamiento, este medio presenta resistividades por lo general altas y es explotado por pozos profundos.

A mayor profundidad, las calizas del Cretácico representan una fuente potencial de agua subterránea que aún no ha sido explorada, siendo estas mismas el basamento hidrogeológico del acuífero, cuando desaparece su fracturamiento a profundidad, además de presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 8 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Theis y Jacob-Cooper, tanto en etapa de abatimiento como recuperación.

De los resultados de su interpretación, por los métodos analíticos mencionados, en función de la distribución espacial de los pozos y los mecanismos de recarga, además de la geología que caracteriza los estratos del sistema acuífero, se pueden distinguir dos zonas de transmisividad, una en los pozos que se ubican en los límites de los sedimentos aluviales y otra en las rocas ígneas, en los pozos próximos a Villa Purificación, Casimiro Castillo y Tecomates, determinando los valores de transmisividad que varía de **9 a $35 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** (778 y 3,024 $\text{m}^2/\text{día}$) y en la otra zona se tienen los pozos localizados en los depósitos de sedimentos aluviales con valores de transmisividad varían entre **4.45 a $0.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** (6,480 y 385 $\text{m}^2/\text{día}$).

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada como parte de las actividades 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 para 2010 (figura 4), se observa en el acuífero La Huerta la profundidad media del nivel estático es de 10 m.

En las estribaciones de la cuenca, en las regiones norte y noroeste, la profundidad del nivel estático es proporcionalmente mayor debido a las formaciones montañosas que circundan el acuífero. En tal sentido, la profundidad del nivel estático disminuye en dirección suroeste, hacia la costa, donde el acuífero de La Huerta se asocia con el acuífero de Miguel Hidalgo.

En la zona que circunda a la población de La Huerta, la profundidad del nivel estático es mayor, producto de la extracción de agua subterránea para el abastecimiento de dicho núcleo poblacional. En gran parte de la región norte del acuífero, excepto el área de Villa Purificación, no se cuenta con datos confiables de los niveles estáticos para la delineación de las isopiezas.

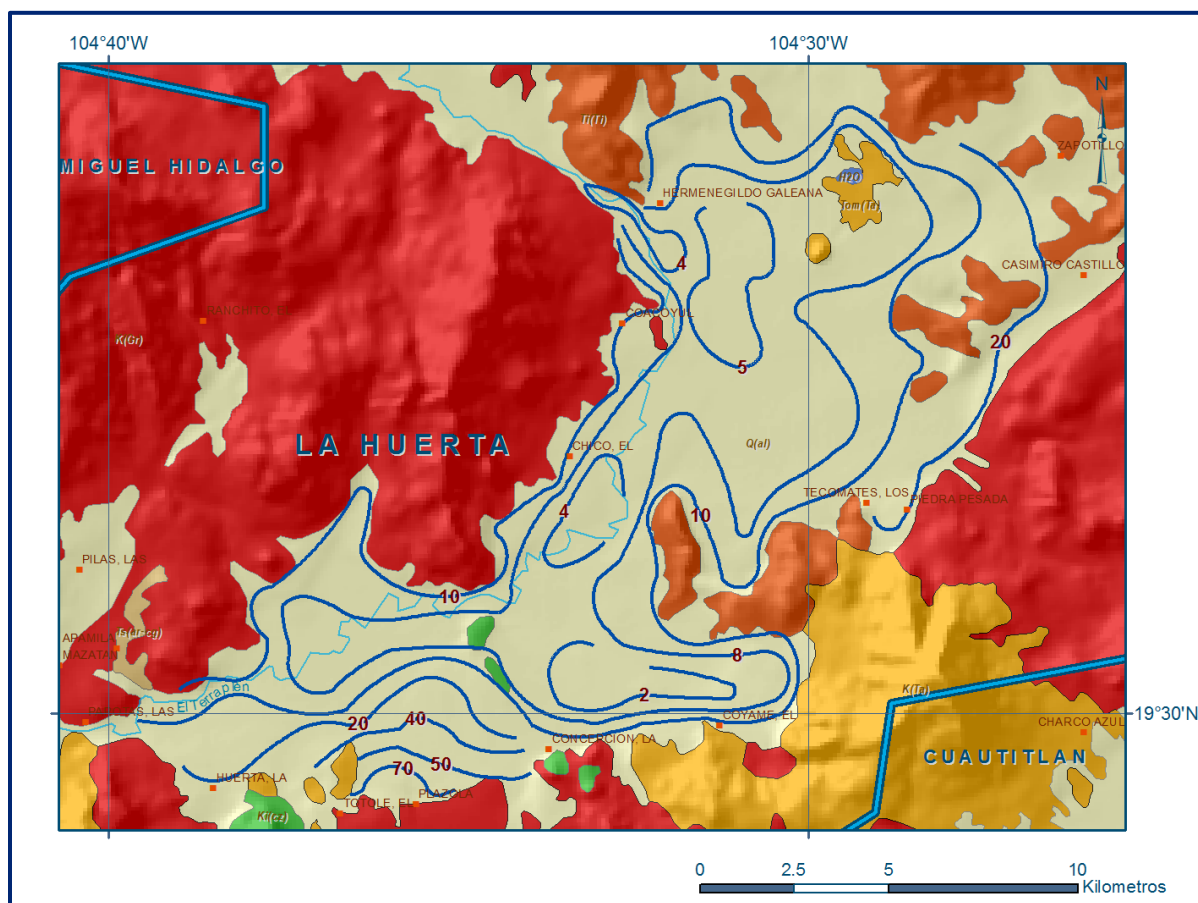


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para 2010 (figura 5), se observa que los valores varían de 230 a 440 msnm, los valores más altos se localizan hacia las partes topográficamente más altas al oriente del poblado de Purificación y

en la zona circundante a los poblados de Los Naranjos, Benito Juárez y Zapotillo, producto de la extracción de agua subterránea para el abastecimiento de dicha población, descendiendo gradualmente por efecto de la topografía hasta los valores más bajos que se registran al sureste de la costa, hacia los poblados de La Huerta, Plazola y El Totole.

A pesar del gran volumen de extracción que existe no se tiene la presencia de conos de abatimiento claros en la zona del valle donde se tiene el mayor número de aprovechamientos. La dirección preferencial del flujo subterráneo presenta una trayectoria noreste-sureste, con alimentaciones provenientes del flanco oriental.

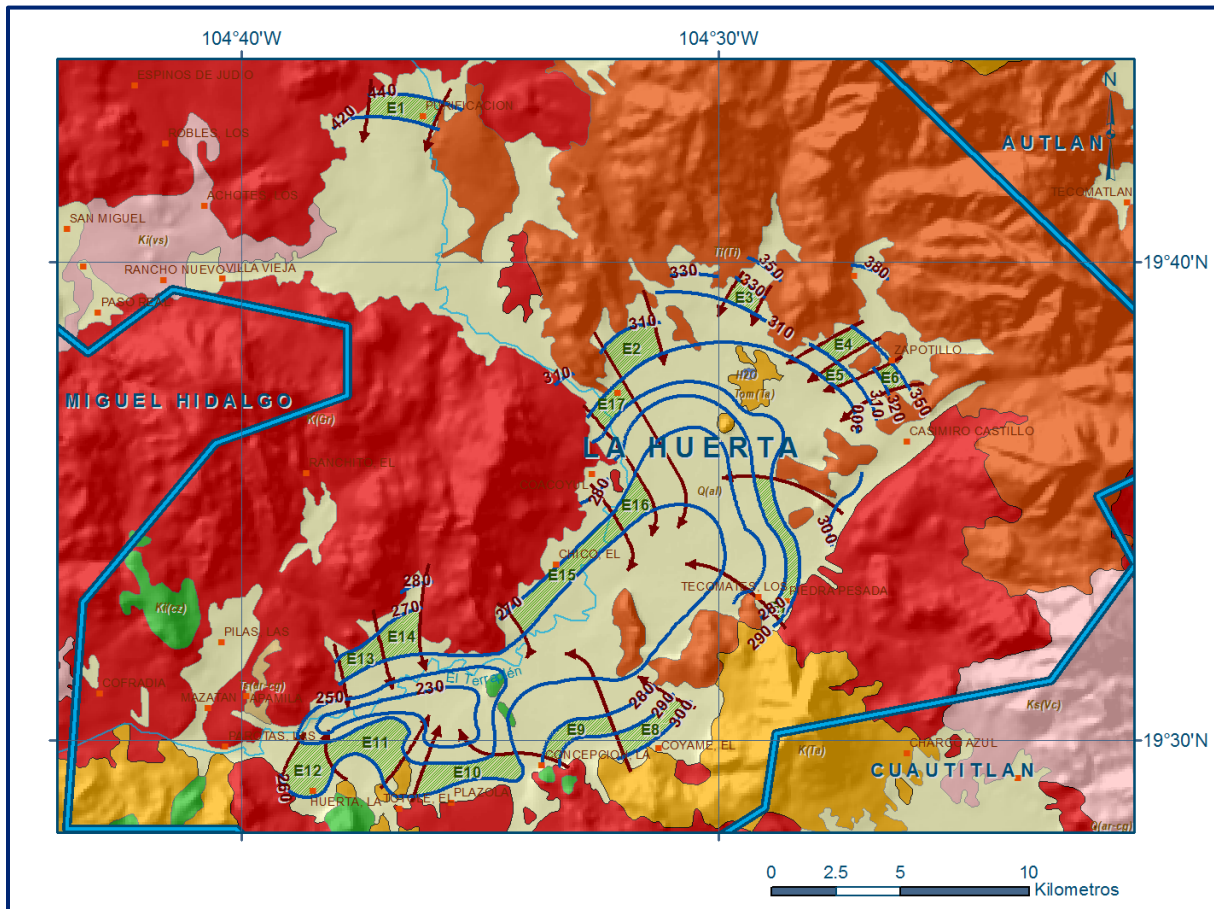


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita 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 la 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 30 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (30 pozos), para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, concentración de arsénico inorgánico disuelto y boro disuelto. 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.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia la bicarbonatada cálcica y bicarbonatada cálcica-magnésica-sódica, que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas y la segunda por roca residual y aluvial.

Los valores de temperatura varían de 22.2 a 32.9 °C, de potencial de hidrógeno (pH) oscilan entre 6.9 y 8.2. Los valores de conductividad eléctrica oscilan entre 193 y 1,570 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con promedio de 476. La dureza registra valores entre 62 y 458 $\text{mg}/\text{lt.}$

En el caso de las concentraciones de arsénico inorgánico disuelto, de los 9 pozos analizados los valores varían entre 0.11 y 0.87 $\mu\text{g}/\text{lt.}$, no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la norma para uso agrícola y doméstico.

Las concentraciones de boro disuelto del conjunto de 15 pozos analizados, que integran la cuenca de La Huerta, se encuentran en un promedio de 0.18 mg/lit, sin embargo, el agua de los pozos: 199, 249, 275 y 451 rebasa significativamente la normatividad para uso doméstico con un promedio de 4.35 mg/lit. 12 de los sitios muestreados y el Manantial 2, presentan concentraciones máximas de boro, incluso para uso pecuario. En estos puntos las concentraciones promedio son de 6.8 mg/lit.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2010, se registraron un total de 784 aprovechamientos de agua subterránea, en su totalidad pozos; del total de ellos 634 se consideran activos y los restantes 150 inactivos. El volumen de extracción estimado es de **51.3 hm³/año**, de los cuales 48.7 hm³ (94.9%) se destinan al uso agrícola, 1.5 hm³ (3.0%) al uso Público urbano y los restantes 1.1 hm³ (2.1%) otros usos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance se definió para 2010 en una superficie de 344 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. 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:

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

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero, estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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:

$$R_v + E_h + R_i - B - D_m - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas horizontales por flujo subterráneo horizontal;

R_i = Recarga inducida;

B = Bombeo;

D_m = Descarga de manantiales;

ETR = Evapotranspiración;

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

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_v = B + D_m + ETR - E_h - R_i \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero 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 año 2010, mostrada en la 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:

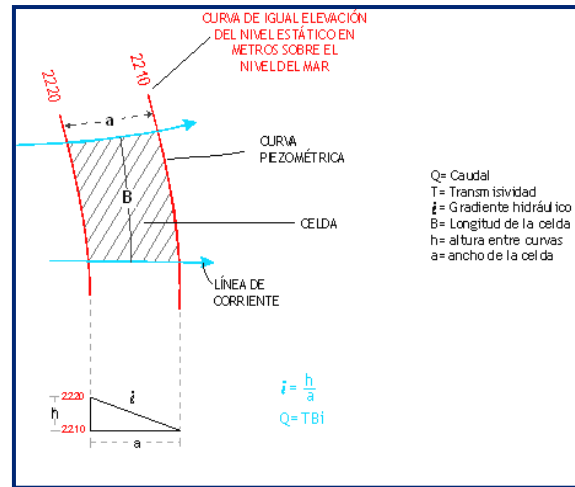
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico;

T= Transmisividad;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se muestran los valores obtenidos en cada celda.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

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	3020	890	20	0.022472	0.0015	0.1018	3.2
E2	2490	1420	10	0.007042	0.0010	0.0175	0.6
E3	1065	1245	20	0.016064	0.0010	0.0171	0.5
E4	1245	1600	40	0.025000	0.0010	0.0311	1.0
E5	1065	890	10	0.011236	0.0010	0.0120	0.4
E6	1245	710	30	0.042254	0.0010	0.0526	1.7
E7	4980	710	10	0.014085	0.0030	0.2104	6.6
E8	2675	800	10	0.012500	0.0010	0.0334	1.1
E9	3020	890	10	0.011236	0.0015	0.0509	1.6
E10	4445	710	10	0.014085	0.0015	0.0939	3.0
E11	2845	1245	10	0.008032	0.0015	0.0343	1.1
E12	2310	1780	10	0.005618	0.0015	0.0195	0.6
E13	1780	890	10	0.011236	0.0010	0.0200	0.6
E14	1420	1245	10	0.008032	0.0010	0.0114	0.4
E15	6220	890	10	0.011236	0.0015	0.1048	3.3
E16	1600	1065	10	0.009390	0.0015	0.0225	0.7
E17	2310	710	10	0.014085	0.0050	0.1627	5.1
Total entradas							31.4

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **31.4 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 baja permeabilidad en el subsuelo.

El volumen extracción de agua subterránea para uso agrícola y público urbano es de 50.2 hm³ anuales, si consideramos que el 20% de ese volumen retorna al acuífero, obtenemos que un volumen de $50.2 (0.20) = 10.04$. Por lo que el volumen recarga inducida asciende a **10.0 hm³/año**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y por la descarga de los manantiales (Dm). No existen salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), descarga por evapotranspiración (ETR) 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 calculado asciende a **51.3 hm³/año**.

7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)

Del aforo de los manantiales ubicados dentro del territorio del acuífero, se estima que su descarga es del orden de 257 lps, que equivalen a **8.1 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).

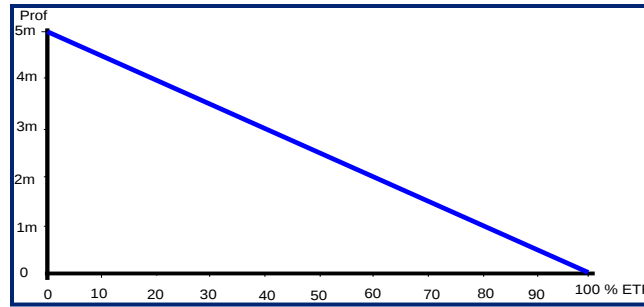
Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

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) =	24.3		
P(mm) =	1101	P ² =	1212201
L =	1624.94535	L ² =	2640447.39
ETR (mm)	944.4		

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 13.5 km^2 en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración obtenida de 944.4 mm, se tiene que la $\text{ETR} = 13.5 \text{ km}^2 (0.9444 \text{ m}) (0.4) = 5.09$.

Por lo tanto; el volumen evapotranspirado asciende a **5.1 $\text{hm}^3/\text{año}$** .

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 escasos registros existentes recabados en los 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. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero.

Por lo tanto, para fines del balance $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (Rv), el cual será calculado a partir de la ecuación (2):

$$\begin{aligned} R_v &= B + D_m + ETR - E_h - R_i \pm \Delta V S \quad (2) \\ R_v &= 51.3 + 8.1 + 5.1 - 31.4 - 10.0 + 0.0 \\ R_v &= 23.1 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de todas las entradas, recarga vertical (Rv), recarga inducida (Ri) y entradas subterráneas horizontales (Eh):

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 23.1 + 31.4 + 10.0 \\ R &= 64.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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:

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

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 **64.5 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 el caso del acuífero La Huerta, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **8.1 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga a través de los manantiales.

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 (REPDa), 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 **61,381,055 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 64.5 - 8.1 - 61.381055 \\ \text{DMA} &= -4.981055 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **4,981,055 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

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