

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE MATATIPAC (1804), ESTADO
DE NAYARIT**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1. Provincia fisiográfica.....	7
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía	9
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía	12
4.2. Geología estructural	14
4.3. Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1. Tipo de acuífero	15
5.2. Parámetros hidráulicos.....	15
5.3. Piezometría	16
5.4. Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3 Evolución del nivel estático	18
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1. Entradas	21
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	22
7.1.3 Recarga incidental (Ri)	23
7.2. Salidas.....	24
7.2.1 Bombeo (B).....	24
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm)	26
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	26
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1. Recarga total media anual (R).....	28
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	28
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	29
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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 Valle de Matatipac, definido con la clave 1804 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-sur del estado de Nayarit, entre los paralelos 21°15'50" y 21°33'08" de latitud norte y 104°39'25" y 104°58'38" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 526 km².

Limita al norte y este con el acuífero Valle Santiago-San Blas; al sureste con Valle Santa María del Oro y Valle Ixtlán-Ahuacatlán; al sur y oeste con el acuífero Valle de Compostela, todos ellos pertenecientes al estado de Nayarit (figura 1).

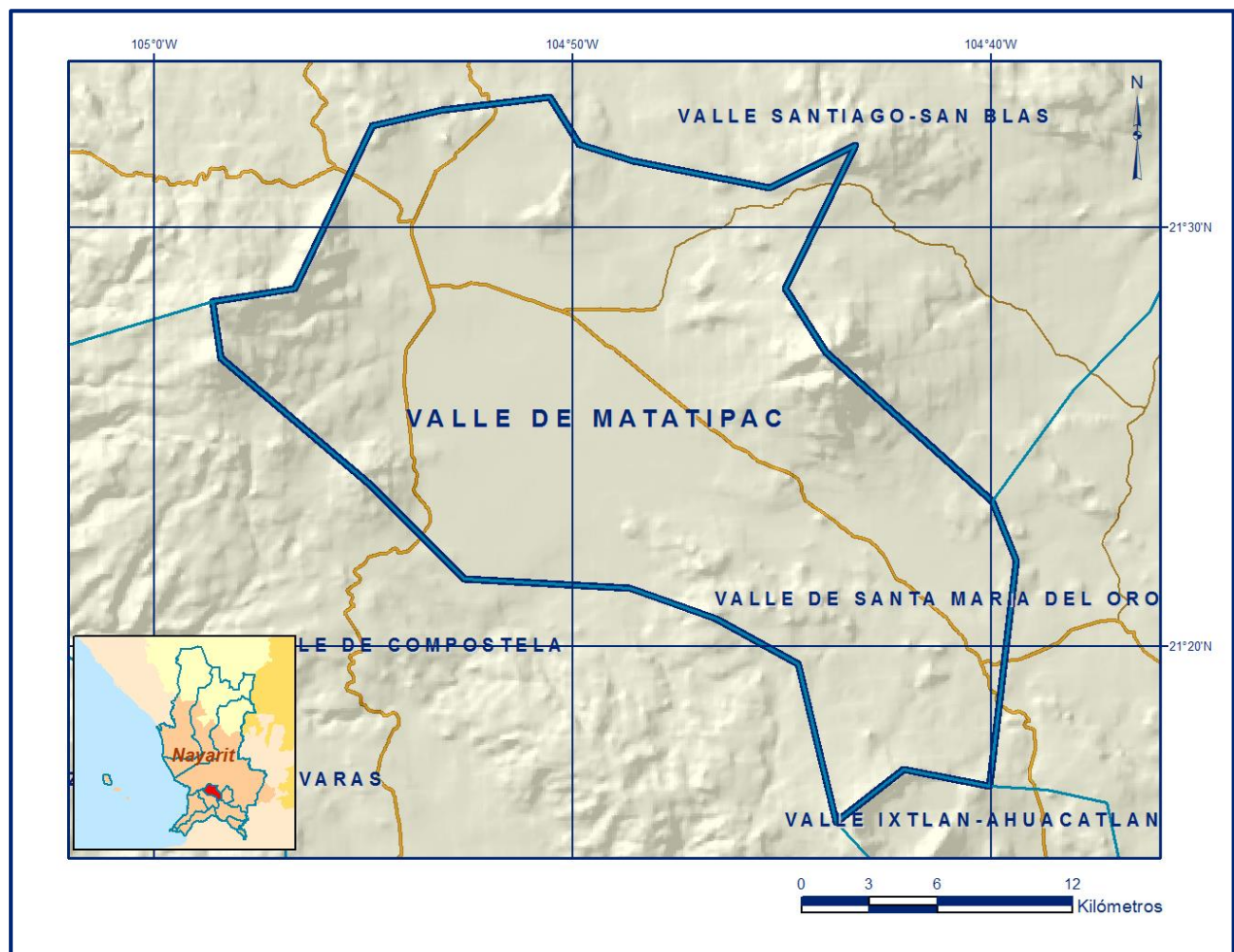


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende parcialmente los municipios Tepic, Xalisco y Santa María del Oro, así como una pequeña área de San Pedro Lagunillas.

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

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico y al Consejo de Cuenca Río Santiago, instalado el 14 de julio de 1999. El territorio que cubre el acuífero se encuentra parcialmente vedado. En la mayor parte de su superficie rige el *“Decreto que declara de interés público la conservación de los Mantos acuíferos en los Municipios de Santa María del Oro y Jalisco, y en la parte correspondiente de los de Tepic, San Blas y Compostela, Nayarit”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 13 de febrero de 1975. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. Sólo en una

pequeña área del extremo suroriental, no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada está sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	104	58	36.7	21	28	13.5
2	104	56	38.9	21	28	33.0
3	104	54	47.4	21	32	24.9
4	104	53	7.9	21	32	47.7
5	104	50	32.6	21	33	6.1
6	104	49	50.7	21	31	59.3
7	104	48	33.4	21	31	34.7
8	104	45	18.5	21	30	57.1
9	104	43	15.6	21	31	57.7
10	104	44	55.1	21	28	32.4
11	104	43	57.6	21	27	0.7
12	104	39	59.3	21	23	27.2
13	104	39	24.4	21	22	2.9
14	104	40	2.4	21	16	40.4
15	104	42	5.6	21	17	4.3
16	104	43	43.0	21	15	48.5
17	104	44	36.5	21	19	34.3
18	104	46	35.1	21	20	40.2
19	104	48	37.7	21	21	23.7
20	104	52	35.2	21	21	37.1
21	104	54	55.4	21	23	56.0
22	104	58	24.0	21	26	52.4
1	104	58	36.7	21	28	13.5

El 8 de agosto de 1988, se publicó en el DOF el “Decreto que establece reservas de aguas subterráneas en los Municipios de Tepic y Xalisco, del estado de Nayarit, hasta por un volumen de 60 hm³ anuales, del acuífero de Matatipac, que se destinarán para

el abastecimiento público urbano de la Ciudad de Tepic, Nay.” dentro del área comprendida entre los paralelos 21° 20' y 21° 32' de latitud norte y entre los meridianos 104° 45' y 104° 55' de longitud oeste, cuando de acuerdo con las necesidades por la explosión demográfica, así lo requiera el Gobierno del Estado, previa a la asignación respectiva.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En el territorio del acuífero no se localiza ningún Distrito de Riego ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LAS ZONAS DE MATATIPAC-ZACUALPAN Y LAS VARAS, NAYARIT. Realizado en 1978 por Rocha y Asociados, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Su objetivo principal fue conocer las características, comportamiento, condiciones de explotación, calidad del agua, magnitud de la recarga y volumen aprovechable en los acuíferos Valle de Matatipac y la zona costera denominada Zacualpan–Las Varas, para seleccionar sitios favorables para la perforación de pozos de explotación. Entre sus actividades más relevantes destacan el censo de aprovechamientos, la nivelación de brocales, mediciones piezométricas, análisis fisicoquímicos a muestras de agua, ejecución de pruebas de bombeo, prospección geofísica y balance preliminar de aguas subterráneas. Concluye que la recarga media anual era de 89.6 hm³, con una extracción de 30.4 hm³, por lo que el volumen excedente disponible era de 59.2 hm³ anuales.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DE CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LA ZONA DEL VALLE DE MATATIPAC, ESTADO DE NAYARIT. Realizado en 1985 por la Secretaría de Agricultura y Recurso Hidráulicos (SARH). Su objetivo fue actualizar el conocimiento de la condición de explotación, calidad del agua, magnitud de la recarga y volumen aprovechable del agua subterránea en el acuífero, así como la verificación de los sitios identificados como favorables para la perforación de pozos con base en reconocimientos hidrogeológicos y del resultado de los sondeos geofísicos.

INFORME DEL MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MATATIPAC, ESTADO DE NAYARIT. Realizado por la Gerencia Estatal de la

CONAGUA en Nayarit, durante el periodo 1990-1992. Su objetivo principal fue obtener un conocimiento más completo y actualizado del comportamiento del acuífero y simular el efecto ante diversas condiciones de explotación; para ello utilizó la información hidrogeológica recabada en estudios previos y la actualización del censo e hidrometría. Como resultado comprobó la existencia de sobreexplotación local en la porción norte del valle, prácticamente en la zona urbana, debido a la gran concentración de los pozos del sistema operador del municipio de Tepic.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE MATATIPAC, EN NAYARIT. Realizado en 1998 para la Comisión nacional del Agua, por Benton y Asociados, S.A. Su objetivo fue determinar las condiciones geohidrológicas del subsuelo y establecer las características y límites del acuífero, para definir las áreas y sitios adecuados para explotación del agua subterránea de buena calidad para uso público urbano. Entre sus actividades de campo más importantes destacan la prospección geológica y geofísica, hidrología, hidrogeología e hidrogeoquímica.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE MATATIPAC, NAYARIT. Realizado en 2003 por C H Ingeniería y Proyectos, S.A. de C. V., para Secretaría de Desarrollo Rural del Gobierno del estado de Nayarit. Su objetivo fue actualizar las condiciones piezométricas y explorar la posibilidad de extraer agua subterránea a profundidades mayores a 300 m, dado que la gran cantidad de obras existentes eran en general someras. Calcula un volumen de extracción de 100.2 hm³ anuales, es decir 70.2 hm³ más que en el año 1980, sin mostrar cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea durante el periodo 1977-2003.

A partir de la disponibilidad de 94.1 hm³ anuales determinada por el balance 2002-2003, concluye que es factible la modificación del decreto de reserva por una política de control y reglamentación, tomando en cuenta que la reserva de 60 hm³/año se mantiene para cubrir las necesidades de la población.

ESTUDIO TÉCNICO DEL IMPACTO POR LA EXPLOTACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO VALLE DE MATATIPAC, NAYARIT. Realizado en 2004 para la Comisión Nacional del Agua por Ariel Consultores, S.A. Su objetivo fue analizar las relaciones que existen entre la condición de explotación del acuífero y la situación económica y social presente en la región, con el marco normativo emitido para controlar la extracción, uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas. Entre sus resultados obtenidos evalúa los alcances de las medidas regulatorias establecidas

e identifica la existencia de causales de interés o utilidad públicos para justificar la emisión/modificación/supresión de un ordenamiento (veda, reglamento o reserva).

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO VALLE DE MATATIPAC, NAYARIT. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Nayarit, 2019.

Se utilizó la información piezométrica e hidrométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático y el planteamiento del balance de aguas subterráneas.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica "Eje Neovolcánico". Según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincia Sierras Neovolcánicas Nayaritas.

La Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico es una cordillera montañosa que sirve de unión de las sierras Madre Occidental y Oriental, que se extiende desde el estado de Veracruz hasta el estado de Nayarit, comprende también parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima y Puebla, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario hasta el presente. La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estratovolcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico", integrado por los volcanes de Colima, Tancitaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19° de latitud norte, que representan el trazo de la gran Falla Clarión.

La Subprovincia Sierras Neovolcánicas Nayaritas está limitada al norte y este por la provincia Sierra Madre Occidental; al noroeste, por la provincia Llanura Costera del Pacífico; al oeste por el Océano Pacífico; al sur por la provincia Sierra Madre del Sur; y al sureste por la subprovincia Sierras de Jalisco. Se caracteriza por presentar formas volcánicas acumulativas originadas por la emisión de lavas y cenizas, que no han sido transformadas sustancialmente por procesos exógenos, lo que refleja su reciente formación, tal es el caso de los estratovolcanes Ceboruco (2,280 msnm), Sangangüey

(2,340 msnm) y San Juan (2,180 msnm), entre otros. Tiene además la presencia de numerosos volcanes monogenéticos. La intensa actividad volcánica sólo ha dejado tres áreas llanas de mayor extensión, que son las de Tepic, Compostela y la zona costera de Zacualpan.

3.2. Clima

Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1981 para las condiciones particulares de la República Mexicana, se establece que en la superficie que cubre el acuífero domina el clima semicálido subhúmedo del grupo C(A)C(w2), en las regiones de mayor elevación topográfica localizadas al oeste, este y sureste; en tanto que el clima cálido subhúmedo se presenta en la porción central, en una franja orientada en sentido norte-sur. El primero se caracteriza por presentar temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C.

La Precipitación del mes más seco es menor de 40 mm. El clima cálido subhúmedo registra una temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.; con precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm. Ambos tipos de clima presentan régimen de lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

La precipitación es generalmente mayor de 1200 mm anuales, con temperaturas medias anuales que varían de 22 a 25°C, con valores extremos de 8 y 36°C. La región está expuesta a dos regímenes de precipitación: las lluvias de verano y las de invierno; las primeras son producidas por la temporada normal de lluvias y eventos hidrocimatológicos extremos, como los ciclones, los cuales se presentan con regularidad; generalmente estas lluvias se presentan en los meses de junio a octubre; las cuales suelen ser intensas y de corta duración, generando fuertes avenidas, que producen inundaciones en las partes bajas del valle.

La segunda temporada de lluvias es invernal, producida por los frentes fríos que se presentan durante los meses de noviembre a enero, de menor intensidad que las de verano. El período de estiaje, donde las precipitaciones son prácticamente nulas, ocurre de febrero a mayo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 15 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Compostela, El Refilón, Ixtlán Del Río, Jumatán, Miravalles, Puerto Platanares, Tepic, Tetitlán, Ahuacatlán, Aguirre, Roseta, Tepic (FFCC), Presa El Baño, Trigomil y San Pedro

Lagunillas; con un periodo de registro que comprende de 1985 a 2017. Con estos datos y utilizando el método de las isoyetas, se determinó un valor de precipitación media anual de **1182 mm**; de igual manera, la temperatura y evaporación potencial medias anuales son **19°C** y **1,385 mm**, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica No.12 denominada Río Lerma-Santiago, dentro de la Cuenca “F” llamada Río Santiago-Aguamilpa. Su sistema de drenaje regional que se observa es de tipo dendrítico, combinado con sistemas radiales y subparalelos, controlados por las estructuras morfológicas existentes.

El rasgo hidrográfico principal lo constituye el Río Tepic o Mololoa, afluente del Santiago, es la corriente superficial perenne más importante en el área. Tiene su origen en las vertientes sur y oeste del volcán Sangangüey, cerca de San Pedro Lagunillas, a partir del nacimiento de algunos manantiales, fluyendo a través del valle con una dirección preferencial sur-sureste/nor-noroeste; para orientarse de inmediato rumbo a la ciudad de Tepic, con dirección noroeste y seguir la traza de la carretera federal número 15. En su recorrido recibe aportaciones de sus afluentes.

El Gavilán, Leonel, San Cayetano, Jalisco y Guayaba, antes de descargar en el Río Grande de Santiago, a unos 35 km de Tepic. El Río Mololoa drena una cuenca de 525.5 km² de superficie, en la que el volumen precipitado de 620.5 hm³/año; el volumen evapotranspirado es del orden de 436.9 hm³ anuales y el escurrimiento superficial generado, medido en la estación hidrométrica Mololoa, es del orden de 89.5 hm³.

En la estación hidrométrica Mololoa, localizada dentro de la ciudad de Tepic, el río ya recibe aportaciones de aguas residuales provenientes de esa ciudad. El escurrimiento medio anual medido en esa estación hidrométrica es de 128.5 hm³ anuales volumen que finalmente descarga en el Río Santiago.

Los escurrimientos más bajos varían entre 4 y 8 hm³ mensuales durante el estiaje, en tanto que los más altos oscilan entre 15 y 28 hm³ al mes durante el verano.

3.4. Geomorfología

La zona se encuentra en una región que presenta, en su conjunto, pendientes poco accidentadas y laderas de relieves moderados. Existen serranías al oriente de Tepic, donde sobresale la caldera Las Navajas con 1,600 msnm y el Volcán Sangangüey; al poniente del valle se encuentra la sierra de San Juan donde destaca la presencia del

Volcán de San Juan, que juntamente con el Cerro Alto con 2,200 msnm y el Cerro Coatepec con 1,560 msnm, constituyen el borde poniente del valle. Destacan además elevaciones menores representadas por conos volcánicos y lomeríos que delimitan valles menores, cercanos al principal, rellenos con sedimentos aluviales.

El valle intermontano de Matatipac, es una fosa tectónica rellena con material aluvial erosionado y transportado de las elevaciones mencionadas, que aloja el acuífero principal. Presenta una superficie ondulada, pendientes poco accidentadas y laderas de relieves moderados. Únicamente en la porción occidental del valle, las pendientes son abruptas, con rasgos poco erosivos. Es una cuenca que captura el drenaje integrando varias cuencas endorreicas por el desplazamiento de bloques, permitiendo sitios de salida que se agregan al sistema del río Mololoa, que a su vez es afluente del Río Grande de Santiago.

Los elementos que conforman el relieve se pueden definir mejor si se considera a la región completa como un conjunto de bloques originados en primera instancia por los procesos endógenos que seccionan y definen los límites de los bloques con relación a los sistemas conjugados de fallas y fracturas. En este sentido, destaca el valle o fosa del valle de Matatipac, definido por los bloques elevados o horsts de los volcanes Sangangüey y San Juan; así como el bloque La Labor-Trigomil y la Caldera Laguna de las Ánimas.

4. GEOLOGÍA

A nivel regional, las rocas más antiguas son de tipo vulcanoclástico y consisten de intercalaciones de lavas y tobas andesíticas, arenisca y lutitas, aparentemente coronadas por un miembro calcáreo (figura 2). Estas rocas desarrollan superficies de esquistosidad que les confiere una textura de filitas y ocasionalmente esquistosa en las litologías de granulometría fina. Esta secuencia puede correlacionarse con roca similares que afloran al sur, cuya edad se estima del Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Al sur de Compostela aflora la secuencia calcárea. Intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria y cubierto discordantemente por las unidades volcánicas terciarias, aflora una roca que varía de granito a granodiorita, que por su posición estratigráfica y correlación con cuerpos similares del Bloque Jalisco que aflora al sur, se considera de edad Cretácico Superior. Este intrusivo aflora al sur de Tepic.

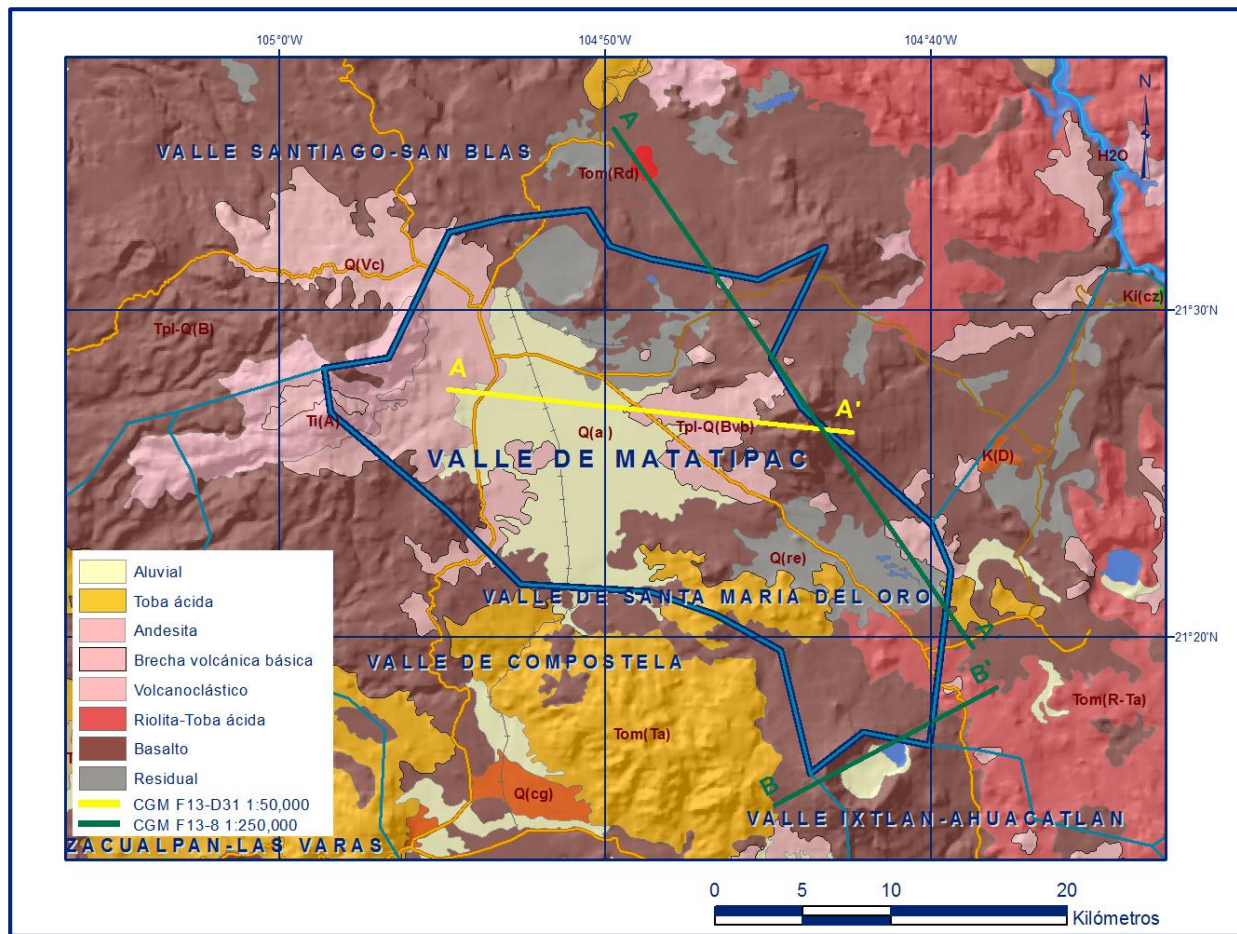


Figura 2. Geología general del acuífero

La Secuencia Volcánica Inferior, cuya edad varía de 45 a 100 Ma, está representada en la zona principalmente por rocas de composición ácida; en tanto que la Secuencia Volcánica Superior está formada predominantemente por ignimbritas, tobas y riolitas, originadas a partir de calderas (McDowell and Clabaugh, 1979). Las extrusiones estuvieron acompañadas por pequeñas emanaciones de lavas basálticas, incluyendo una Secuencia Vulcanoclástica de areniscas tobáceas y tobas líticas bien estratificadas con capas delgadas a medianas, que yacen sobre las ignimbritas. La mayor parte de este vulcanismo, estuvo confinado a un corto tiempo, entre 37 y 27 Ma. Intrusionando a las secuencias volcánicas inferior y superior, se observan cuerpos porfídicos de composición diorítica y riolítica, así como granodioritas y gabros.

Al norte y noroeste de Santa María del Oro se dató una granodiorita y un pórfido diorítico con edades de 52.3 ± 1.1 Ma, ubicándolos en un rango Eoceno-Oligoceno. Asimismo, en la Sierra de Zapotán, ubicada al sur de la zona, se reporta una edad de 13.3 ± 1 Ma (Gastil, 1975), correspondiente al Mioceno para una pegmatita gabroica. En la zona del graben de Tepic-Zacoalco se presentan derrames de basaltos e ignimbritas de composición riolítica, datadas de Mioceno Superior-Plioceno Inferior. La secuencia

del Plioceno-Holoceno está conformada por la presencia de basaltos, andesitas, riolitas y tobas riolíticas, así como pumicitas del Eje Neovolcánico. Al reciente pertenecen arenas y boleos mal clasificados, de composición heterogénea, así como sedimentos limo-arcillosos (Carta Geológico-Minera Tepic F13-8. Escala 1:250,000. SGM,1998).

4.1. Estratigrafía

Estratigráficamente la zona del acuífero está conformada por una secuencia de roca vulcanosedimentarias y volcánicas del Arco Zihuatanejo, Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico cuyas edades varían del Cretácico al Reciente.

CRETÁCICO

Arco Zihuatanejo

Las rocas más antiguas corresponden a una secuencia vulcanosedimentaria de arco insular, que forma, parte del Terreno Guerrero, que consisten de rocas del Cretácico Inferior (Neocomiano-Aptiano). A nivel regional están constituidas por andesitas, brechas andesíticas, areniscas volcánicas, con intercalaciones de niveles riolíticos, areniscas, limolitas, lutitas, sedimentos calcáreos y en menor proporción conglomerado polimíctico. Localmente afloran brechas andesíticas con horizontes de areniscas-conglomerados polimícticos y horizontes delgados de limolitas y lutitas.

TERCIARIO

SIERRA MADRE OCCIDENTAL

A las rocas cretácicas le sobreyace en discordancia la secuencia volcánica terciaria constituida en la base por andesitas del Eoceno-Oligoceno y flujos riolíticos del Mioceno. Las primeras presentan color gris con tintes verdosos que cambian a gris oscuro al intemperismo, de estructura compacta masiva y textura afanítica. Sus principales afloramientos se observan en la porción suroccidental de la región. Los flujos piroclásticos cubren, concordantemente, a la unidad andesítica y están constituidos por una alternancia de flujos piroclásticos, representados por tobas riolíticas e ignimbritas, que en general presentan color gris claro a rosa claro, estructura masiva pseudoestratificada y textura fluidal, constituidas por feldespatos, cuarzo, escasa mica y vidrio. Sus principales afloramientos se observan al sur.

La secuencia vulcano-sedimentaria, así como las rocas terciarias volcánicas y piroclásticas de la Sierra Madre Occidental, que afloran en la porción suroccidental, están afectadas por un intrusivo de composición granítica-granodiorítica, cuya edad se le asigna al Mioceno, por su relación de intrusión con rocas piroclásticas del Mioceno Medio.

PLIOCENO-CUATERNARIO

EJE NEOLVOLCÁNICO

Está conformado por unidades volcánicas de edad pliocuaternaria. Las más antiguas corresponden a una toba opalífera, de composición riolítica, que consiste principalmente de toba de flujo, toba depositada por aire y flujo de cenizas, con escasos niveles de brechas de la misma composición y de moderadas intercalaciones de niveles de lavas y tobas de composición andesítica. En la zona se presentan tres aparatos volcánicos: El Volcán Sangangüey, ubicado en la porción este, tiene una variedad de rocas con distintos depósitos, derrames de lavas y flujos de ceniza que varían de dacitas, andesita-basalto, andesitas y basaltos; Volcán Tepetitlic, localizado en el extremo suroriental, varían en su litología y está representada por andesitas, algunos derrames, tobas, brechas riolíticas, pumicitas con niveles de piroclastos, derrames de y conos escoriáceos de basaltos. El Volcán San Juan, localizado en la región noroccidental, presenta una litología más restringida, caracterizada por niveles de andesita-dacita, pumicita y andesita, cuyo espesor máximo es de 540 m. Su depósito se relaciona con una depresión tectónica reciente. La edad de la serie volcánica del Eje Neovolcánico varía del Plioceno tardío al Holoceno. Como eventos más recientes se presenta la unidad conglomerática y los depósitos aluviales que cubren parcialmente a las rocas anteriores.

Asociado al Volcán San Juan, se presenta un depósito de pumicitas producto de un vulcanismo piroclástico félsico, de tipo Pliniano y Peleano, en el que predomina una secuencia de flujos con intercalaciones de brechas de la misma composición y arenas, depositadas por el aire, así como escasas intercalaciones de toba riolítica; se distribuye en una amplia zona de la región noroccidental, cubriendo la mayor parte de los volcanes San Juan, Cerro Alto, las laderas del cerro Coatepec, la ciudad de Xalisco y la porción occidental de la ciudad de Tepic. Los espesores calculados en el área varían de 5 a 12 m. Luhr F.J. (2000), proporciona una estimación de 15 m de espesor de depósitos piroclásticos con una extensión aproximada de 15 km a partir del cráter del volcán San Juan. Se correlaciona con la pumicita descrita por Luca Ferrari et al. (1997) en el flanco sur del volcán Ceboruco, quienes dataron dos muestras en el área de Jala, con edades de 1020 y 1030 años por el método de C^{14} .

El volcán San Juan emitió pumicitas como último evento, considerado por Ferrari et al. (1997), de edad aproximada a 15,000 años definidos por relaciones estratigráficas. Las pumicitas se consideran como un segundo evento de actividad explosiva del volcán San Juan hace 14,770 años, fecha que fue datada por el método C^{14} (Luhr F.J., 1999) (Carta Geológico-Minera Xalisco F13-D31. Escala 1:50,000. SGM, 2007).

4.2. Geología estructural

Las estructuras de las rocas vulcanoclásticas son típica de un régimen de deformación dúctil de baja presión y temperatura. La zona está afectada por fallas normales de orientación NNW-SSE, presentándose bloques basculados hacia el este y oeste, formando una serie de fosas y pilares, que afectan a toda la secuencia de la Sierra Madre Occidental. Los principales lineamientos interpretados regionalmente se orientan en sentido NW-SE, el fracturamiento y fallamiento secundario presentan una orientación NW-SE y NE-SW. La estructura regional más importante orientada en esta dirección es el graben Tepic-Zacoalco (Luhr et al., 1985; Allan et al., 1991). Las sierras Alicia, Pajaritos y La Yesca, se orientan en sentido norte-sur, dividido entre sí por fallas reflejadas por los ríos Huajimic, Camotlán y Jora Viejo.

Dentro del Eje Neovolcánico destacan estructuras volcánicas, como los volcanes Sangangüey, San Juan y Ceboruco. Este último, ubicado en la porción suroriental de la región, es un estratovolcán pliocuaternario típico de un ambiente de subducción. Su último derrame ocurrió en 1870, evento que se estimó en un km³ de basalto, alcanzando una distancia de 7.0 km de la fuente de origen (Demant A, 1980). La laguna de Santa María del Oro, ubicada al oriente de la región, ocupa la cuenca de una caldera emplazada en un graben de 8 km de diámetro.

El volcán Sangangüey presenta el aspecto de un estratovolcán. Los conos cineríticos muestran una orientación NW-SE, que se relacionan con la caldera de la Laguna de Santa María del Oro (Carta Geológico-Minera Tepic F13-8. Escala 1:250,000. SGM, 1998).

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado en una fosa tectónica constituida, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales, vulcanoclásticos y conglomeráticos, de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes, que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río Mololoa, arroyos tributarios y la planicie aluvial.

Intercaladas con los sedimentos clásticos y en la porción inferior del acuífero, se presentan rocas vulcanoclásticas y volcánicas como tobas ácidas, piroclastos no consolidados, tobas pumicíticas, brechas volcánicas básicas, andesitas y basaltos; que presentan fracturamiento secundario moderado a intenso, que le confiere permeabilidad alta a media. Los depósitos aluviales y conglomeráticos tienen algunas centenas de metros de espesor (figura 3). Las fronteras al flujo subterráneo y el

basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas, volcánicas al desaparecer el fracturamiento.

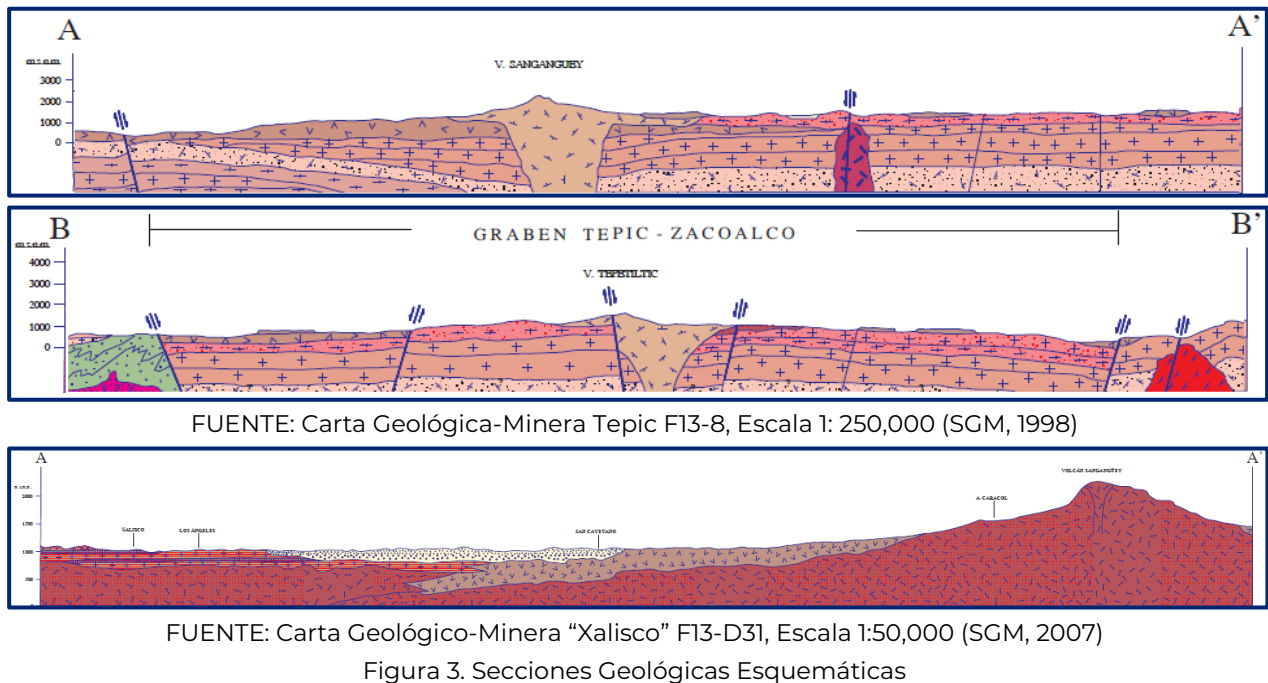


Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

La información geológica, geofísica e hidrogeológicasuperficial y del subsuelo, permite definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado, que presenta **condiciones locales de semiconfinamiento**. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales, fluviales, vulcanoclásticos y conglomeráticos, de granulometría variada, que constituyen la planicie aluvial, el cauce y llanura de inundación del río Mololoa y arroyos tributarios. La porción inferior está conformada por tobas ácidas, piroclastos no consolidados, tobas pumicíticas, brechas volcánicas básicas, andesitas y basaltos; que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades que conforman el acuífero en explotación, se analizó la información de pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, que fueron realizadas en estudios previos.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores de transmisividad varían de **1.73×10^{-6} a $168.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . En tanto que la conductividad hidráulica oscila entre **4.95×10^{-9} y $1.15 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.00043 a 9.9 m/d)**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Para el propósito del balance de aguas subterráneas, se consideró un valor promedio de rendimiento específico **S_y de 0.1** .

Los valores más bajos de estos parámetros se asocian a los sedimentos clásticos de granulometría más fina y los más altos a los depósitos aluviales y fluviales de mayor granulometría que conforman las planicies de inundación y/o mayor espesor saturado.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información de registros históricos durante el periodo 1997-2020, obtenidos por la Dirección Local Nayarit. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2005-2019 que tiene mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de algunos metros a 100 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona central del valle y del cauce de río Mololoa hacia las estribaciones de las sierras que lo limitan. Los niveles estáticos más someros, de 3 a 10 m, se registran en la porción baja de la cuenca, que comprende la mayor parte de la zona agrícola, entre los poblados Pantanal, San Cayetano y Trigomil, desde donde se incrementan gradualmente, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 70 a 100 m, se presentan en la porción noroccidental del acuífero, hacia las estribaciones del volcán San Juan y el Cerro Coatepec, entre la porción occidental de la zona urbana de Tepic y los poblados Xalisco, Testerazo y Aquiles Serdán (figura 4).

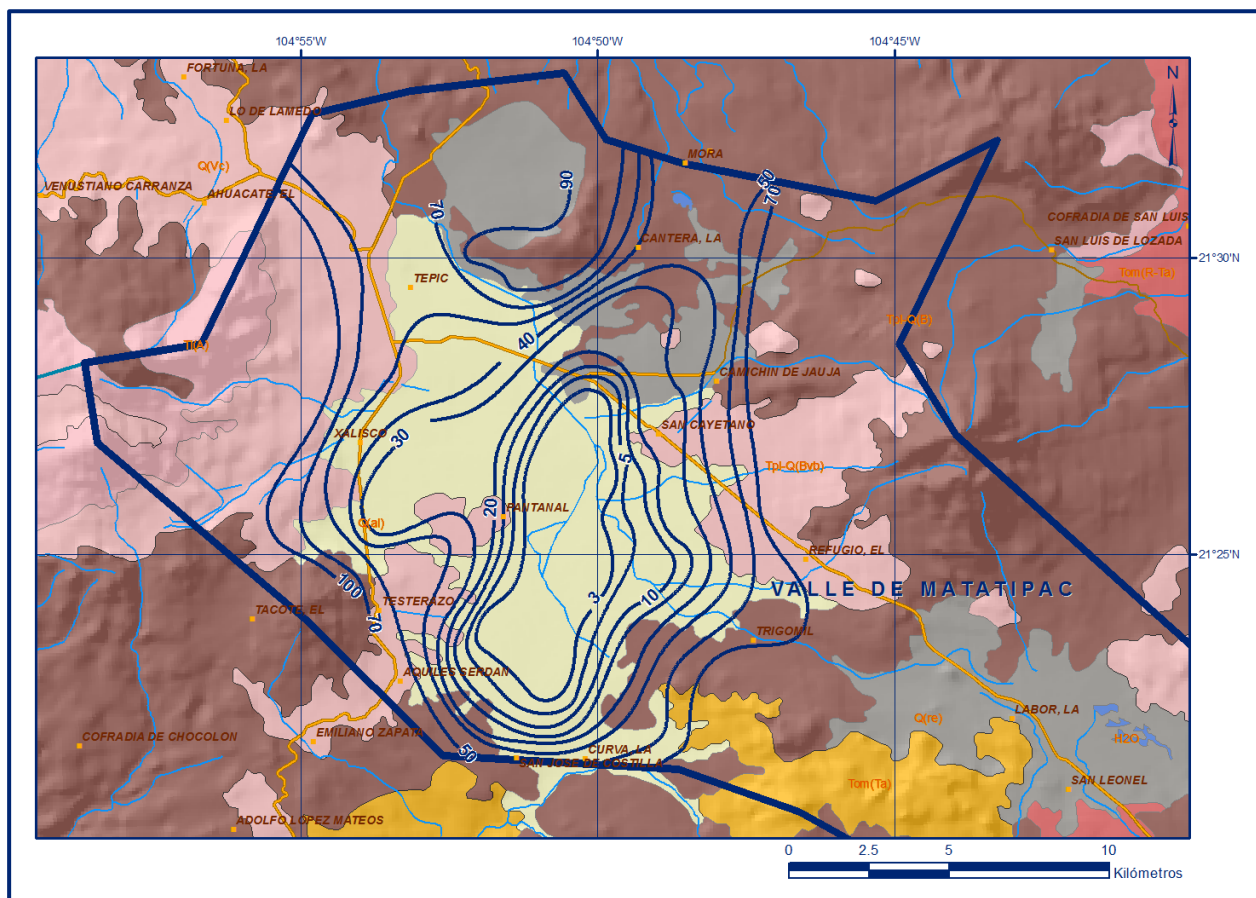


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 790 a 950 msnm, que se incrementan de las porciones norte y noroccidental del acuífero hacia el sur, hacia los flancos de las sierras que lo delimitan y aguas arriba a lo largo del cauce del Río Mololoa. Los valores más altos, de 920 a 950 msnm, se localizan en los extremos sur, este y oeste que rodean la periferia del valle, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la planicie del valle y hacia el norte. Los valores más bajos, de 790 a 800 y de 900 a 910 msnm, se registran en las zonas norte y noroccidental del valle, en los límites con el acuífero Valle Santiago-San Blas, al norte de la zona urbana de Tepic y hacia el poblado Mora, respectivamente.

La dirección preferencial del flujo subterráneo es sur-norte, sureste-noroeste, paralela a la dirección de escurrimiento del Río Mololoa, con alimentaciones provenientes de los flancos este y oeste (figura 5).

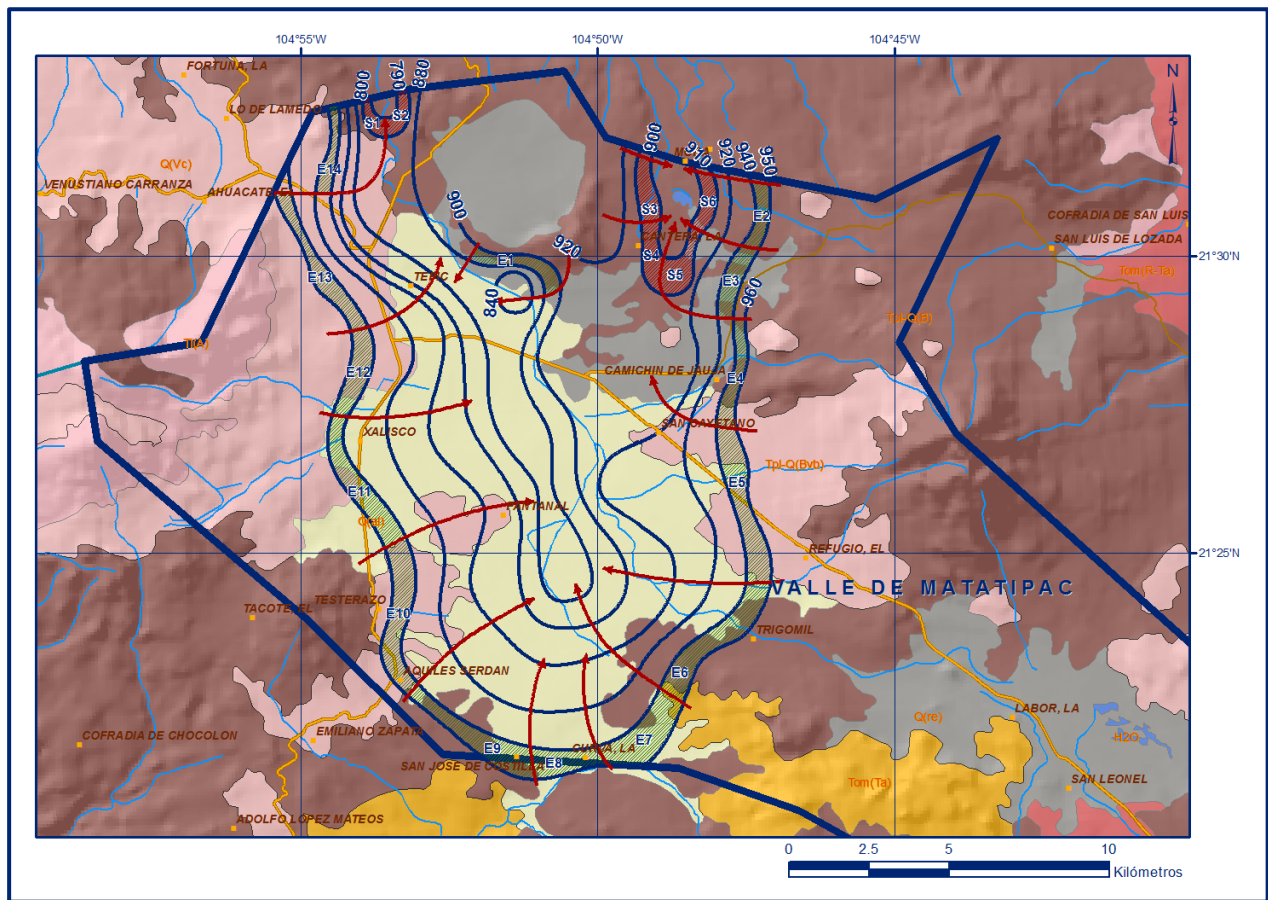


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2005-2019 registró valores de recuperación en la posición de los niveles del agua subterránea en la mayor parte de la superficie de explotación que varían de 2 a 10 m, con valores locales de 18 m, que representan 0.1 a 1.3 m anuales; los mayores, 0.7 a 1.3 m anuales, se presentan de manera local al norte del poblado Camichín de Jauja y en zona que rodea al aeropuerto de Tepic, disminuyendo gradualmente hacia las estribaciones de las sierras, hasta desaparecer. En la mayor parte de la superficie de explotación no se presentan cambios significativos en la posición del nivel estático (figura 6).

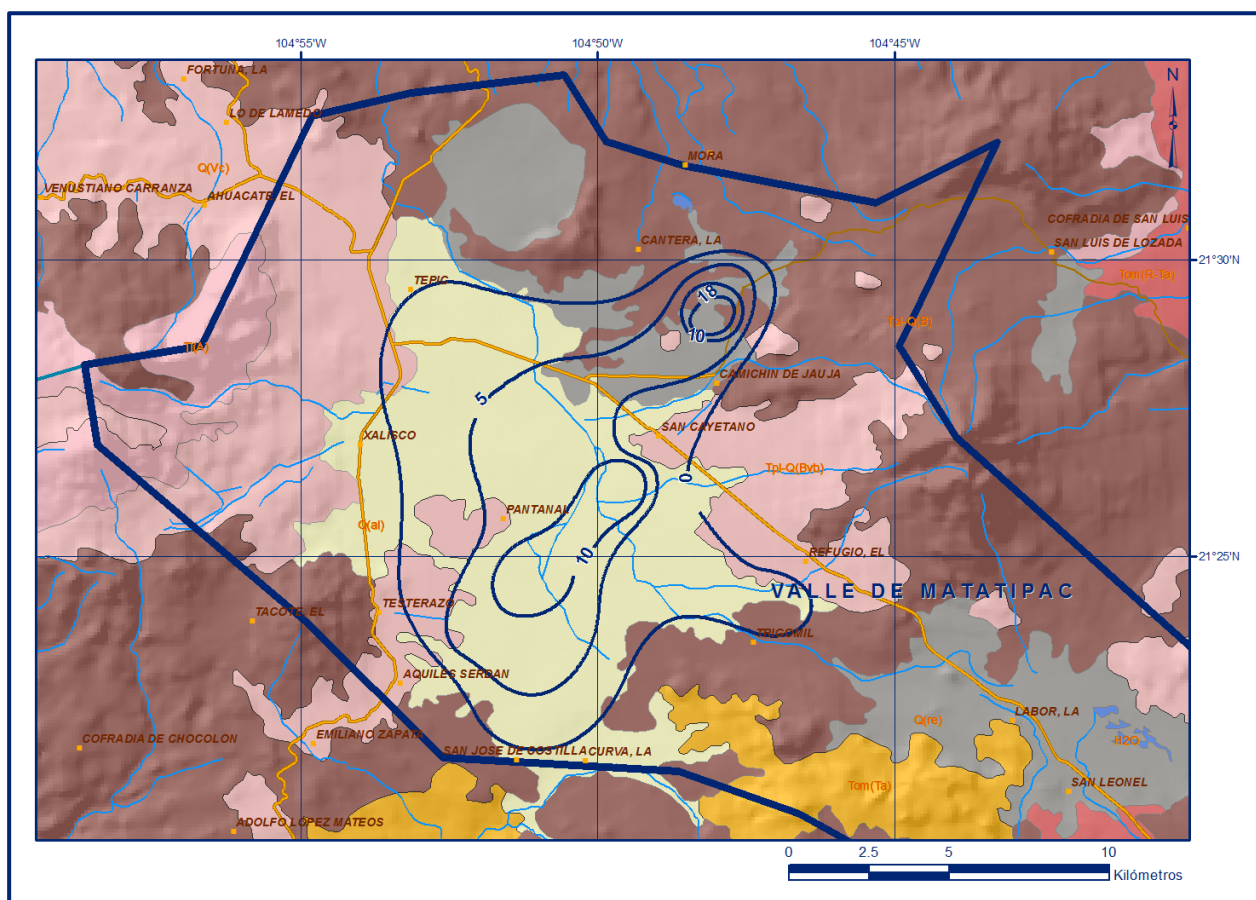


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2005-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2003, se tomaron 25 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, sólidos disueltos totales (SDT), dureza cálcica, dureza total, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos y nitratos. Así mismo se tomaron 2 muestras de agua subterránea en el año 2018 y una muestra en el año 2020, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018-2020). Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, 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 sobrepasaron los límites máximos permisibles (LMP) que establece 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, para consumo humano. La concentración de SDT presentó valores que varían de 60 a 510 ppm que no superan el LMP de 1000 mg/l para el agua destinada al consumo humano, según la norma mexicana mencionada. De las determinaciones de laboratorio realizadas, las muestras analizadas presentaron concentraciones de coliformes fecales y totales mayores al LMP, que establece la norma referida, asociada a la contaminación con aguas residuales o por heces de animales. Otro parámetro que rebasa el LMP para consumo humano es el Nitrato, que presenta concentraciones máximas de 14.87 mg/l cuando el LMP es de 11 mg/l.

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 98 a 591 μ S/cm. Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en la región sur del acuífero y los más altos al norte y noroeste confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Los valores de temperatura varían de 23.9 a 39.6 °C y los de pH de 6.1 a 7.7.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, de acuerdo con el diagrama de Piper, predomina la familia bicarbonatada-cálcica-magnésica, que corresponde aguas de reciente infiltración con periodos cortos de residencia. En menor proporción existe agua que representa una mezcla entre la familia clorurada-sódica y la bicarbonatada-sódica, de los pozos más profundos que extraen agua de mayor temperatura, por lo que representa una mezcla de aguas del sistema profundo con aguas de reciente infiltración.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las muestras analizadas se clasifican como C2-S1, que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, apta para la agricultura sin restricción alguna en tipo de cultivos ni suelos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos llevado a cabo como parte del estudio realizado en 2003, complementada con la información del REPDA 2022, se registraron un total de 250 obras que aprovechan el agua subterránea, de los cuales 221 son pozos, 209 norias y 20 manantiales; todas ellas activas.

El volumen total de extracción calculado es de **100.2 hm³/año**, de los cuales 77.0 hm³ (76.8%) se destinan al uso público-urbano, 16.3 hm³ (16.3%) para uso agrícola, 3.7 hm³ (3.7 %) para uso industrial, 2.0 hm³ (2.0%) para servicios y 1.2 hm³ (1.2%) para uso doméstico-pecuario.

Adicionalmente, a través de los **20 manantiales** más importantes que se identificaron, se descarga un caudal conjunto de 839.4 lps, que representan un volumen de **26.5 hm³ anuales**, destinados a los usos agrícola y público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2005-2019, en una superficie de **248 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 conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

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 que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; 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 incidental (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

Ri: Recarga incidental

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

Dm: Descarga a través de manantiales

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

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

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 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 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella 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:

$$Q = T * B * i$$

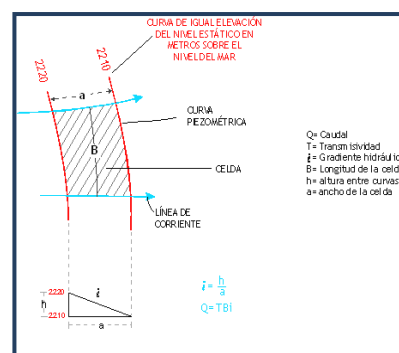
Donde:

Q: Caudal (m^3/s)

T: Transmisividad (m^2/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **60.7 hm³/año**.

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 de la región donde se localizan las celdas.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$ (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($\text{hm}^3/\text{año}$)
E1	2900	490	20	0.0005	0.0592	1.9
E2	2000	420	10	0.0010	0.0476	1.5
E3	2300	570	10	0.0010	0.0404	1.3
E4	3420	400	10	0.0015	0.1283	4.0
E5	4880	800	10	0.0035	0.2135	6.7
E6	4400	891	10	0.0015	0.0741	2.3
E7	3000	1100	10	0.0010	0.0273	0.9
E8	2100	800	10	0.0015	0.0394	1.2
E9	4200	950	10	0.0050	0.2211	7.0
E10	5000	1000	10	0.0035	0.1750	5.5
E11	4380	660	10	0.0060	0.3982	12.6
E12	2800	900	10	0.0045	0.1400	4.4
E13	4700	620	10	0.0020	0.1516	4.8
E14	2700	450	10	0.0035	0.2100	6.6
TOTAL						60.7

7.1.3 Recarga incidental (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 las 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, se considera que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 16.3 hm³, al aplicar el 10% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 1.6 hm³ anuales.

Por otra parte, las pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varían según la zona y su estado físico, para este caso se consideró también un coeficiente de infiltración de 25%, que aplicado al volumen destinado al uso público-urbano de 77.0 hm³ resulta un volumen de 19.3 hm³ anuales. Por lo tanto, $R_i = 19.3 + 1.6 = 20.9$. **Ri = 20.9 hm³/año.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **100.2 hm³ anuales.**

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **1.7 hm³/año.**

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	1450	530	10	0.00015	0.0041	0.1
S2	1280	500	10	0.00015	0.0038	0.1
S3	1950	680	10	0.0005	0.0143	0.5
S4	1950	800	10	0.0005	0.0122	0.4
S5	2150	1000	10	0.0005	0.0108	0.3
S6	1760	810	10	0.0005	0.0109	0.3
TOTAL						1.7

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) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

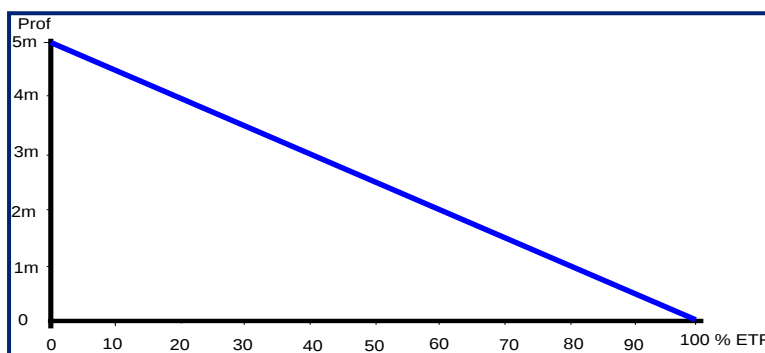
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 20.0 °C y 1,186 mm, representativos del área de balance. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 865.7 mm anuales, como se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	20		
P(mm) =	1186	P ² =	1406596
L =	1200	L ² =	1440000
ETR (mm)	865.7		

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 las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 9.2 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
3	3	22.0	0.8657	0.4	7.6
3 a 5	4	9.0	0.8657	0.2	1.6
	TOTAL	31.0		TOTAL	9.2

7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 20 manantiales importantes, que descargan un caudal conjunto de 839.4 lps, que equivalen a volumen de 26.5 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dm = 26.5 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2005-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.1$, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de 61.1 hm^3 , es decir, un promedio anual de **4.4 hm^3** .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2005-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
18	18.0	1.1	0.1	2.0
10 a 18	14	1.4	0.1	2.0
10	10	9.3	0.1	9.3
5 a 10	7.5	39.4	0.1	29.6
0 a 5	2.5	72.6	0.1	18.2
	TOTAL	123.8	TOTAL	61.1
		Promedio anual		4.4

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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + ETR + Dm - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \\ R_v &= 100.2 + 1.7 + 9.2 + 26.5 - 60.7 - 20.9 + 4.4 \\ R_v &= 60.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + Eh + Ri \\ R &= 60.4 + 60.7 + 20.9 \\ R &= 142.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **142.0 hm³/año**.

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 Valle de Matatipac, su valor es **28.2 hm³ anuales**, de los cuales 1.7 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el acuífero vecino Valle Santiago-San Blas y 26.5 hm³ a la descarga de los manantiales que están comprometidos para usos agrícola y público-urbano. **DNC = 28.2 hm³ anuales**.

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 **65'714,783 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 142.0 - 28.2 - 65.714783 \\ \text{DMA} &= 48.085217 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **48'085,217 m³** para otorgar nuevas concesiones

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Nayarit, 1990-1992. Informe del modelo matemático de simulación del acuífero del Valle de Matatipac, estado de Nayarit.

Comisión Nacional del Agua, 1998. Estudio geohidrológico del Valle de Matatipac, en Nayarit. Realizado por Benton y Asociados, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2004. Estudio técnico del impacto por la explotación del agua subterránea del acuífero Valle de Matatipac, Nayarit. Realizado por Ariel Consultores, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Matatipac, estado de Nayarit.

Comisión Nacional del Agua, 2019. Información piezométrica e hidrométrica del acuífero Valle de Matatipac, Nayarit.

Gobierno del Estado de Nayarit, Secretaría de Desarrollo Rural, 2003. Estudio de actualización geohidrológica del sistema acuífero del Valle de Matatipac, Nayarit. Realizado por C H Ingeniería y Proyectos, S.A. de C. V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978. Estudio geohidrológico preliminar de las zonas de Matatipac-Zacualpan y Las Varas, Nayarit. Realizado por Rocha y Asociados, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1985 Estudio de actualización de condiciones piezométricas de la zona del Valle de Matatipac, estado de Nayarit.

Servicio Geológico Mexicano, 1998, Carta Geológica-Minera Tepic F13-8, escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológico-Minera Xalisco F13-D31, escala 1:50,000.