



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LA TRINIDAD (0216), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA**

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 Hidrología superficial.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología estructural	16
4.3 Geología del subsuelo.....	17
5. HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.1 Tipo de acuífero.....	18
5.2 Parámetros hidráulicos	19
5.3 Piezometría.....	19
5.4 Comportamiento hidráulico.....	19
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	20
5.4.3 Evolución del nivel estático	21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1 Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	24
7.1.2 Recarga inducida por retornos de riego (Rr)	24
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.2 Salidas	26
7.2.1 Bombeo (B).....	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).....	29
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 La Trinidad, definido con la clave 0216 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza geográficamente en la porción norte-centro del estado de Baja California, entre los paralelos 31°05' y 31° 40' de latitud norte y los meridianos 115°29' y 116° 53' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 1,212 km². Limita al norte con el acuífero Jamau; al noreste con el acuífero Laguna Salada y Valle Chico-San Pedro Mártir; al sur con el acuífero San Rafael; al oeste con Cañón La Calentura y San Vicente (Figura 1). Geopolíticamente, la superficie completa del territorio del acuífero se localiza en el municipio de Ensenada.

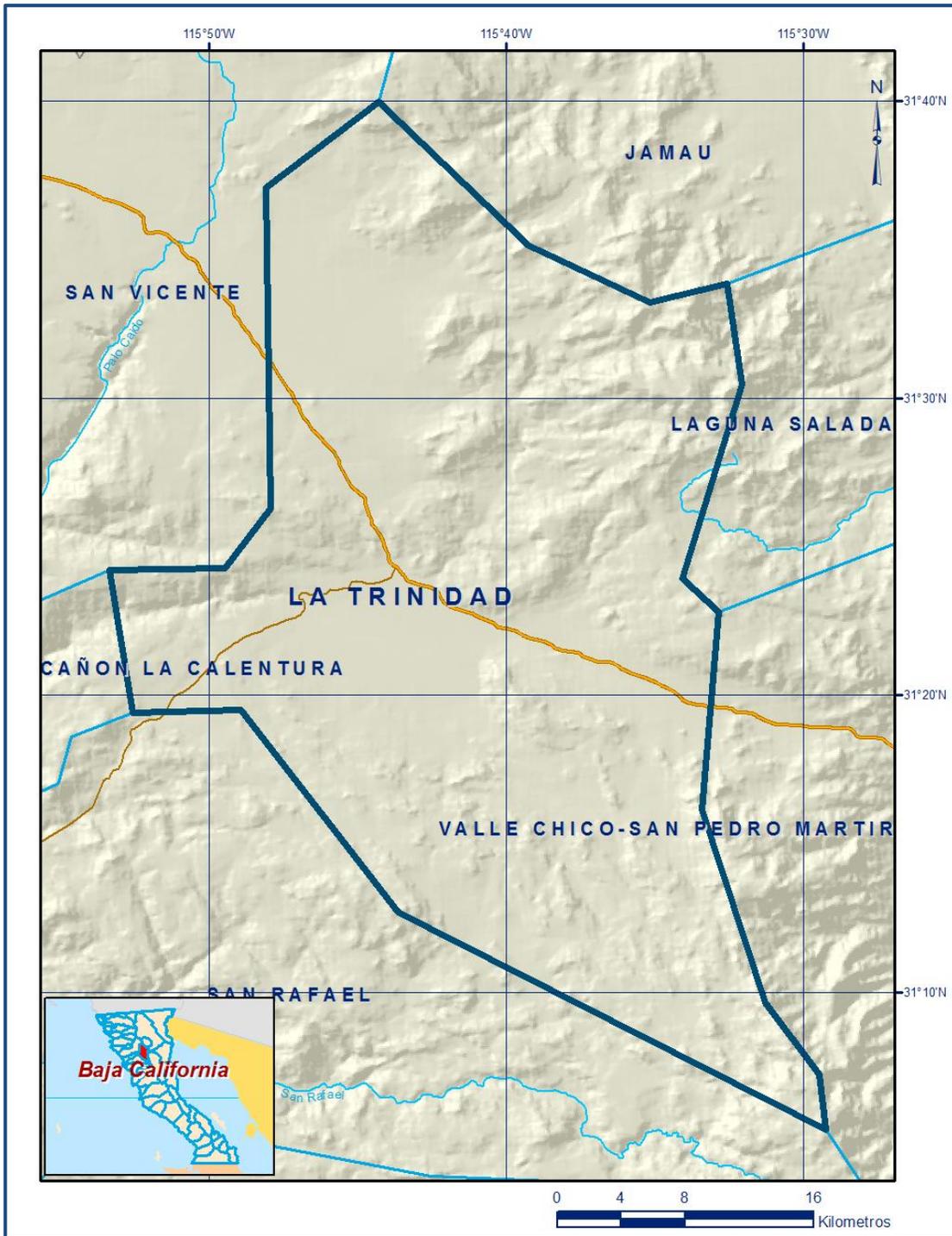


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0216 LA TRINIDAD						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	115	48	6.3	31	37	4.2
2	115	44	18.5	31	39	57.7
3	115	39	15.1	31	35	8.2
4	115	35	10.9	31	33	13.0
5	115	32	35.4	31	33	50.6
6	115	32	4.8	31	30	28.1
7	115	34	4.9	31	23	55.7
8	115	32	50.8	31	22	48.5
9	115	33	25.5	31	16	10.3
10	115	31	16.8	31	9	38.9
11	115	29	28.7	31	7	14.7
12	115	29	15.8	31	5	24.0
13	115	43	38.3	31	12	417
14	115	48	57.6	31	19	311
15	115	52	34.8	31	19	25.7
16	115	53	216	31	24	12.9
17	115	49	29.7	31	24	17.6
18	115	47	56.5	31	26	17.9
1	115	48	6.3	31	37	4.2

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero La Trinidad pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California. Su territorio se encuentra completamente vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965; esta veda se clasifica como tipo III en las 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 de Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola.

En el territorio del acuífero no se localiza ninguna unidad o Distrito de Riego. Los usuarios de aguas subterráneas se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Valle de Trinidad, A.C. instalado el 7 de febrero de 2003 y forma parte del Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional. A continuación se mencionan los estudios más recientes e importantes:

ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO BC-LA TRINIDAD B.C. Elaborado por la Comisión Nacional del Agua en 1997. Contiene profundidades del nivel estático de los años 1988, 1981, 1980 y 1997. También tiene elevaciones del nivel estático de 1974, 1978, 1979, 1979, 1981, 1983, 1992, 1997.

CENSO DEL VALLE DE LA TRINIDAD. Elaborado por Barrera y Asociados S.A. para la Comisión Nacional del Agua en 2012. El estudio contiene información para actualizar el censo para el año 2012.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA DE 10 ACUÍFEROS, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por Moro Ingeniería, S.C. para la Comisión Nacional del Agua en 2013. Los acuíferos estudiados son Tijuana, Tecate, Las Palmas, Ojos Negros, Laguna Salada, Maneadero, La Trinidad, Camalú, San Quintín y San Simón.

El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas realizada por INEGI (1997), la superficie del acuífero se encuentra ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California, Subprovincia Sierras de Baja California Norte, la cual está representada en todo su conjunto por la provincia geológica Batolito de Juárez-San Pedro Mártir, de origen intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega *et al.*, 1992). La mejor exposición de esta subprovincia está representada por las sierras Juárez, San Felipe y San Pedro Mártir. Esta última, con una elevación máxima de 3,078 msnm en el cerro Pico del Diablo. Se reconoce una gran variedad de tipos litológicos, estructuras y geoformas del relieve. Esta provincia está caracterizada por la presencia de tres cinturones pre-terciarios a lo largo de toda la península.

La fisiografía de la cuenca está representada por dos expresiones morfológicas principales: una constituida por altas prominencias topográficas de la ladera occidental de la Sierra de Juárez y la alta escarpada pared de su cierre hidrográfico sur, formada por rocas volcánicas, intrusivas y metamórficas, en tanto que la pared sur está constituida por rocas sedimentarias. Ambos rasgos son el resultado de intensos movimientos tectónicos producidos por la acción de fallas transversales al área peninsular, entre las que destaca la falla Agua Blanca.

3.2 Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para las condiciones de la República Mexicana por E. García, en la superficie que cubre el acuífero predominan dos climas, el clima tipo BSKs que pertenece al grupo de climas semisecos, subtipo templado mediterráneo, con régimen de lluvias invernales, algo extremos, que se registran principalmente de octubre a marzo y el clima templado Cs, subtipo húmedo, régimen de lluvias invernales y verano fresco a cálido algo extremoso.

Para la determinación de las variables climatológicas, se utilizó la información de la estación Ejido Valle de la Trinidad (02-084), que tiene un registro que comprende el periodo 1977-2010 y 1948.1996, respectivamente.

Con base en esta información se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación son **15.3 °C y 234 mm**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de **200 mm**.

El régimen de lluvias se registra principalmente de noviembre a marzo; el máximo valor se presenta en febrero y junio es el mes más seco. Las temperaturas mínimas se registran entre los meses de diciembre a febrero. La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de lluvias torrenciales. Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de lluvias extraordinarias, tienen un efecto importante sobre la recarga al acuífero. Las condiciones de aridez, causadas por las bajas precipitaciones pluviales, son agravadas por la presencia de sequías extremas que ocasionan una disminución de los escurrimientos superficiales y del almacenamiento.

3.3 Hidrología superficial

La zona de estudio se ubica en la Región Hidrológica No.1, Baja California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, en las cuencas Río Tijuana-Arroyo Maneadero y Arroyo Las Ánimas - Santo Domingo; subcuenca Arroyo El Salado (b). Esta región forma parte de la vertiente del Océano Pacífico. Sus drenes principales son el Arroyo Salado y el Arroyo Ciprés.

3.4 Geomorfología

En la superficie del acuífero se identifican tres geoformas:

Valle. Cubre aproximadamente el 20% de la superficie total del acuífero, es un valle homogéneo con orientación E-W inclinado hacia el W. Su pendiente no excede los 5° y se encuentra a una altitud comprendida entre los 0 y 100 msnm. Está constituido por depósitos granulares de textura y tamaño variables. El drenaje en esta unidad es de tipo subparalelo y paralelo.

Lomeríos y Mesetas. Se presentan en una franja orientada de noroeste-sureste. Están constituidas por basaltos, areniscas y conglomerados. Su elevación varía entre 100 y 300 msnm y en general presentan un sistema de drenaje de tipo paralelo, debido a que las mesetas se encuentran disectadas por cañones y cañadas. Las unidades que las conforman tienen permeabilidad media a baja debido a que su composición litológica incluye arenas arcillosas, así como depósitos de talud y abanicos aluviales, localizados al pie de las montañas.

Sierras y Cerros. Se ubican en la porción oriental del acuífero, cubriendo aproximadamente el 60 % de su superficie. Las zonas topográficamente más altas forman parte de la Sierra de Juárez, localizada fuera de los límites del acuífero. Están conformadas por rocas ígneas intrusivas (granitos, dioritas, tonalitas y granodioritas), como en el caso de los cerros Pedregoso y Prieto, y metamórficas (sierras El Encino Solo y Peralta), en las que el patrón de fallas y fracturas permite la infiltración de las lluvias. El drenaje que predomina es de tipo subdendrítico y subparalelo.

4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la región se ubica en el Batolito de San Pedro Mártir (Ortega, *et. al.* 1992), de edad Mesozoica, origen plutónico y un ambiente de raíz de arco. Este intrusivo, conformado por tonalitas y granodioritas, se desarrolló del Cretácico al Cenozoico tardío y tiene una extensión de más de 400 km². La intrusión causó metamorfismo a las rocas prebatolíticas, transformándolas a gneis y esquisto. El fallamiento fuertemente escalonado que presenta la península de Baja California está relacionado con el desarrollo de los sistemas transformantes que dominan la tectónica regional.

La geología regional es el reflejo de una zonificación litológica-estructural que se manifiesta a lo largo de toda la península de Baja California. En el territorio del Estado de Baja California se encuentra expuesta una secuencia estratigráfica cuyo rango geocronológico varía desde el Paleozoico hasta el Reciente. La distribución de las diferentes unidades litológicas se puede definir según tres cinturones pre-terciarios que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables. Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Terciario y Cuaternario; su distribución de oeste a este es la siguiente:

El primer cinturón, ubicado en el extremo occidental de la península, está representado por una secuencia de sedimentos marinos y continentales del Cretácico Superior, poco consolidados y sin fuertes deformaciones tectónicas. Esta secuencia fue definida formalmente por Beal (1948) como Formación Rosario y consiste de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados, que contienen tanto fauna marina como huesos de saurios. El siguiente cinturón está conformado por secuencias de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias cuya edad asignada corresponde al Cretácico Inferior. La secuencia superior y de mayor distribución fue definida originalmente por Santillán y Barrera (1930), en INEGI (1984), como Formación Alisitos, que está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfozada y afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. El tercer cinturón, ubicado en el borde oriental de la porción norte de la península, está constituido por rocas intrusivas y metamórficas producto del metamorfismo regional de rocas sedimentarias. A esta franja pertenecen los batolitos mesozoicos (tonalitas-granodioritas y granitos) y rocas prebatolíticas anteriores a la Formación Alisitos, cuya edad no ha sido aún bien definida. Las secuencias metamórficas prebatolíticas asociadas a este cinturón presentan diferentes facies metamórficas y su edad es motivo de discusión. Predominan los esquistos, gneises, cuarcitas y pizarras.

La historia cenozoica está caracterizada por la acumulación de gruesos espesores de sedimentos continentales que afloran en diversas localidades, por el desarrollo de depósitos marinos, sobre todo en el borde occidental de la península, y por una importante actividad volcánica que cubre parcialmente los cinturones mesozoicos descritos. Durante el Plioceno y Pleistoceno se acumularon depósitos marinos en una serie de terrazas que alcanzan una altura de hasta 500 m, asociadas a cambios glaciales del nivel del mar (Gastil et al., op. cit.), que se desarrollaron en el marco de una serie de levantamientos y basculamientos de las zonas costeras durante el Plioceno-Cuaternario (Ortlieb, 1978). Tierra adentro se presentan depósitos aluviales, eólicos y lacustres, cuya acumulación ocurre en la actualidad.

Regionalmente la zona está representada por un marco geológico que ha sido definido por la sucesión de eventos tectónicos relacionados con la evolución del borde occidental de Norteamérica, así como con los fenómenos que contribuyeron a la separación de la Península de Baja California. El panorama morfoestructural que presenta hoy la región ha sido establecido por eventos geológicos que datan desde la Era Paleozoica y culminan con la apertura del Golfo de California, dominado por un ambiente de "Rifting", con fallamiento transforme. Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos tectonoestratigráficos: El Terreno Cortés y el Terreno Alisitos. El primero se distribuye en la porción oriental y el segundo en la región occidental. Las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas.

4.1 Estratigrafía

En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metasedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Mesozoico (Triásico) al Reciente (figura 2).

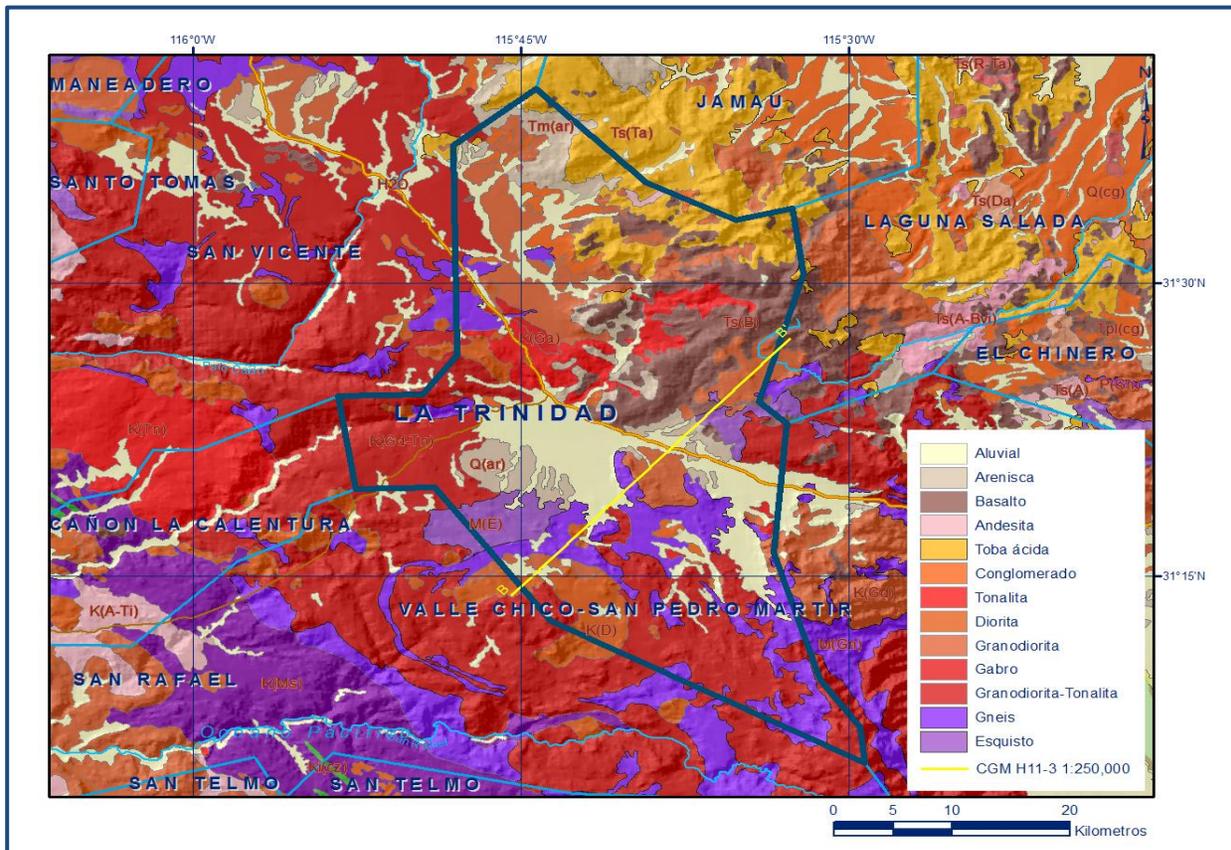


Figura 2. Geología general del acuífero

En la porción occidental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas. A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que afloran en el área, de la más antigua a la más reciente:

Las rocas más antiguas están representadas por metasedimentos y una alternancia de esquistos y gneises de posible edad Triásico Superior-Jurásico Medio que afloran como techos colgantes en rocas graníticas.

Aflora también una secuencia compuesta por andesitas, brechas andesíticas y rocas metavolcánicas con bajo grado de metamorfismo en facies de esquistos verdes. Aunque esta unidad no contiene depósitos de calizas, se correlaciona litológicamente con parte de la Formación Santiago Peak, que aflora desde las montañas de Santa Ana en el sur de California hasta la Falla Agua Blanca en Baja California.

Cretácico

Formación Alisitos (Cretácico Inferior)

Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), al referirse a *“una secuencia de 200 m de lutitas y areniscas metamorfoseadas del Cretácico Inferior que aflora en el Rancho Alisitos en el Valle de Santo Tomás, en el Estado de Baja California. Esta unidad se extiende en una franja orientada NW-SE por espacio de 500 km de largo y 50 km de ancho (Almazán, 1988), a lo largo de la cual, debido a su naturaleza, presenta frecuentes variaciones horizontales”*.

Consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, 1980). Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica. De acuerdo con Rangin (1978) en INEGI (1984), la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental.

Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste.

Está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas. En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfizada en facies de esquistos verdes, afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. Aflora coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico, en forma discordante.

Rocas ígneas Intrusivas

Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro. Los cuerpos plutónicos varían en edad de W a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978). La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos. Se considera que las rocas pertenecen al cinturón orogénico denominado Cordillera Norteamericana, que se estableció durante el Mesozoico. Esta unidad se presenta intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Alisitos y junto con dicha unidad, conforman las partes más elevadas de la región. Sus afloramientos muestran una estructura masiva, están fuertemente fracturadas y su intemperismo es en forma de bloques.

Formación Rosario (Cretácico Superior)

Su nombre fue designado formalmente por Beal en 1948 (en López, R., 1985), para referirse a un afloramiento de areniscas de color café y arcillas de color oscuro, con lentes de conglomerado, asignándole una edad Campaniano-Maestrichtiano. Su localidad tipo se encuentra en el Arroyo Rosario, ubicado al noreste del poblado del mismo nombre.

Está formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino; se presenta poco consolidada y con escasas evidencias de tectonismo. Se encuentra descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico) de los terrenos terciarios de Baja California Norte, cuyo límite oriental es la denominada línea "Santillán-Barrera" que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos.

De acuerdo con Yeo (1984), la Formación Rosario se divide en tres miembros litoestratigráficamente distintos, cada uno de los cuales corresponde a una fase diferente en el cambio del nivel del mar. Estas unidades son (de la base a la cima): (a) miembro arenoso inferior, (b) miembro lodolítico medio y (c) miembro conglomerático-arenoso superior. Los tres presentan marcados cambios en facies tanto en extensión (de norte a sur y de este a oeste) como en la vertical (en sentido estratigráfico). La transición vertical de estas facies corresponde a variaciones temporales del nivel del mar. En términos geográficos los cambios de facies más grandes se presentaban de este a oeste, que concuerdan con el trend de la línea de costa hacia la cuenca para el Cretácico Tardío.

Esta formación cubre, en discordancia angular, a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas; subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario. Las determinaciones paleontológicas la ubican estratigráficamente en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Su espesor máximo es de 750 m. Se correlaciona con las formaciones Point Loma y Cabrillo del área de San Diego.

Terciario (Neógeno)

Formación Rosarito Beach

Representa el depósito en la cuenca Rosarito Beach formada en el Mioceno Medio, dividida en dos subcuencas: Tijuana y la Misión (Ashby y Minch, 1988 y Ashby, 1989) y subdividida en diez miembros: cinco se localizan en la subcuenca Tijuana y cinco en La Misión (Ashby, 1989). Los cinco miembros de la Subcuenca La Misión son (de la base a la cima): Punta Mesquite, Medio Camino, La Misión, Los Indios y Descanso. Los cinco miembros de la Subcuenca Tijuana son (de la base a la cima): Mira al Mar, Costa Azul, Amado Nervo, Las Glorias y Los Buenos.

Los afloramientos actuales de rocas de la Cuenca Rosarito Beach se encuentran limitados al este por los terrenos batolíticos y prebatolíticos de las serranías peninsulares y hacia el oeste por la actual línea de costa. La margen occidental puede extenderse para incluir a las Islas Los Coronados, cerca de Tijuana y a las Islas Todos Santos cercanas a Ensenada. El límite norte se extiende hacia la porción sur del Condado de San Diego, California, en donde se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos plio-pleistocénicos marinos y gravas fluviales. Los afloramientos meridionales se presentan en Punta San Miguel y al suroeste en las Islas Todos Santos.

De acuerdo con Ashby (1989) la sección típica del miembro Punta Mesquite aflora a lo largo de la costa, desde Punta Mesquite hasta el área de Medio Camino. Este miembro consiste de dos unidades: una brecha basamental y una secuencia sobreyacente de tobas y areniscas tobáceas. La brecha es sedimentaria de color café grisáceo claro a medio, masiva a poco estratificada con clastos angulares a subangulares, pobre a moderadamente clasificados. Sus clastos consisten de metavolcánicos prebatolíticos, rocas graníticas y sedimentarias, en una matriz de arenisca tobácea de color café grisáceo claro a medio de grano fino a medio, subangulares a subredondeados, pobremente clasificados. Carece de fósiles y se encuentra en contacto discordante sobre el miembro lodolítico medio de la Formación Rosario. Se correlaciona con las rocas volcánicas Conejo y El Modelo del sur de California.

Neógeno Marino (Plioceno)

Se adoptó este nombre para designar a los depósitos de sedimentos que conforman las mesetas.

Está constituido por areniscas y conglomerados, cuyos fragmentos fueron derivados de rocas ígneas y sedimentarias más antiguas que conforman los terrenos ubicados inmediatamente al este de la zona costera; presentan estructura masiva, con un grado bajo de fracturamiento. Su espesor estimado difícilmente supera los 50 m. Según Gastil (1975) estos materiales se depositaron en la delgada franja costera que se extiende desde la Ciudad de Los Ángeles hasta los 28° de latitud norte, quedando incluidos en esta franja los sedimentos existentes en la zona de San Quintín.

Los depósitos marinos dieron origen a la formación de terrazas que actualmente pueden estar aflorando algunos kilómetros tierra adentro de la península y corresponde con lo que Heim (1922, en Gastil op.cit.) denominó Formación Salada.

Neógeno Continental (Plioceno)

Con este nombre se agruparon los depósitos de talud que se distribuyen sobre las unidades pre-terciarias que conforman las zonas de topografía elevada. Son materiales granulares producto de la denudación de rocas preexistentes que se encuentran consolidados, formando lomeríos sobre los flancos y base de las sierras.

Están conformados por conglomerados de rocas ígneas, cuyos fragmentos se encuentran soportados por una matriz areno-arcillosa, presentan estructura masiva y al intemperizarse tienden a formar bloques, su fracturamiento es escaso y presentan buena compactación.

La edad de estos depósitos fue determinada por Gastil (op. cit.) con base en su relación estratigráfica con los depósitos del Plioceno marino, por lo que les asignó esta misma edad. Se presentan sobreyaciendo discordantemente a los estratos de la Formación Alisitos y a las rocas intrusivas graníticas que conforman las sierras.

Cuaternario marino (Pleistoceno)

Gastil (1975) encontró depósitos de origen marino en la costa occidental del estado de Baja California. La Unidad fue estudiada en 1944 por Hertlein (en Gastil, op. cit.), reportando, como principal característica, un paquete de areniscas y conglomerados con alteraciones ferruginosas de color rojo, intercalado con areniscas fosilíferas y coquinas. Al sur de Rosarito los fragmentos mayores están bien redondeados y son del tamaño de guijarros, soportados por una matriz arenosa poco consolidada. En la planicie costera está cubierto por los materiales aluviales recientes o conformando pequeñas mesetas.

Depósitos recientes

Con este término se denomina a los depósitos más jóvenes que se distribuyen sobre las zonas topográficamente bajas; están representados por conglomerados, areniscas, que se presentan como terrazas continentales, depósitos aluviales y palustres.

Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales producto de la denudación de rocas pre-existentes. Se encuentran distribuidos en zonas de pie de monte y en los lechos de cauces de ríos, arroyos y zonas topográficamente bajas, formando en ocasiones abanicos aluviales.

Están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación. Se encuentran distribuidos por toda el área cubriendo a las rocas más antiguas, por medio de discordancias angulares y litológicas. Los depósitos palustres se localizan en depresiones pantanosas ubicadas en la zona cercana a la costa y están conformados por arenas, limos y arcillas; se presentan en el extremo occidental del área.

4.2 Geología estructural

La deformación dúctil está representada por foliación, esquistosidad y micropliegues en las rocas metasedimentarias y metavolcánicas. La deformación frágil fue producida por la tectónica distensiva que ha originado cuencas dentro de un sistema evolutivo de un posible pull-apart.

Los principales eventos tectónicos que han afectado a la región iniciaron en el Paleozoico, cuando la margen del cratón de Norteamérica se situaba en la actual Península de Baja California, época durante la cual se desarrolló una tectónica pasiva que originó una sedimentación estable. Durante el Triásico Superior-Jurásico Medio se depositaron dos secuencias que posteriormente fueron metamorfizadas, la primera representada por rocas metasedimentarias depositadas en un ambiente de cuenca con posible correlación con los metasedimentos de la Formación Rancho Valecillos.

La segunda está representada por una alternancia de esquistos-gneises con metamorfismo de la facies de esquistos verdes. Durante el Jurásico Medio-Cretácico Inferior, se desarrolló un arco insular con orientación NW-SE, denominado arco Alisitos, que implicó vulcanismo e intrusiones magmáticas, provocando levantamientos y fosas profundas, originando una secuencia de arco que constituye las rocas del Grupo o Formación Alisitos.

Esta secuencia, al igual que las rocas metamórficas mesozoicas, fue afectada por la Orogenia Oregoniana (finales del Albiano). Del Cretácico Inferior al Terciario Inferior el evento más importante fue el emplazamiento del Batolito Peninsular. Durante el Campaniano-Maastrichtiano se depositaron los sedimentos de la Formación Rosario en un ambiente mixto.

De igual manera, durante el Mioceno se depositó la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Rosarito Beach, cuya actividad volcánica estuvo relacionada con la subducción y la migración de la placa Farallón-Guadalupe y Rivera, durante los procesos tectonomagmáticos relacionados a la apertura del Golfo de California. Esta tectónica está evidenciada por los levantamientos que ponen en contacto a las rocas del Cretácico Inferior con los depósitos del Mioceno.

Las estructuras más sobresalientes son las fallas de rumbo NW con desplazamiento lateral derecho: Agua Blanca y Santo Tomás, con longitudes de 78 a 35 km. Se reconocieron otras fallas normales, unas con rumbo NE, como las fallas Tres Hermanos y la fallas de rumbo Puerto Blanco y Peralta, con longitudes de 15 a 30 km.

Estas estructuras han afectado tanto a las rocas metamórficas volcánicas y sedimentarias mesozoicas, así como a los sedimentos y depósitos volcánicos del Terciario.

La estructura Agua Blanca es la más antigua de las fallas activas originada por la subducción de la placa Farallón durante el Triásico, presenta aproximadamente 1.0 km de ancho y desplazamiento horizontal reciente de 4 a 6 mm/año (Carta Geológico-Minera H11-2 "Ensenada", escala 1:250 000 SGM, 2003).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial, fluvial, eólicos y palustres de granulometría variada, conglomerados y areniscas depositados en los cauces de los arroyos; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias (Formación Alisitos) cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias. El espesor de los depósitos clásticos es de 70 a 200 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, permiten establecer que el acuífero es de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos. Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada, areniscas, conglomerados, depósitos eólicos y palustres; en su porción inferior por rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

De acuerdo con su permeabilidad, es posible agrupar las distintas litologías en las unidades hidrogeológicas que a continuación se describen, las cuales conforman el medio poroso o granular y el medio fracturado por el que se desplaza el agua subterránea:

Depósitos granulares no consolidados de permeabilidad media a alta. Están constituidos por depósitos clásticos no consolidados del Terciario y Cuaternario, que rellenan la porción superior del valle y están compuestos por una gran diversidad de material granular, aluvial y fluvial; así como las areniscas y conglomerados de la Formación Rosario.

Derrames volcánicos, rocas sedimentarias y vulcanosedimentarias de permeabilidad media a baja. Dentro de esta unidad se considera la secuencia volcánica y vulcanosedimentaria del Cretácico Inferior, los derrames de basaltos cuaternarios, andesitas tobas así como las lutitas de la Formación Rosario. Su interés hidrogeológico se restringe a las zonas en las que sus afloramientos presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. En general funcionan como barreras al flujo subterráneo y basamento hidrogeológico.

Rocas ígneas y metamórficas de baja permeabilidad. Esta unidad está integrada por los cuerpos intrusivos que afloran en las porciones centro y sur del acuífero, así como por las secuencias metasedimentarias constituidas por filitas, esquistos, pizarras y gneises.

Son materiales muy compactos, de baja conductividad hidráulica, que funcionan como basamento regional del acuífero y fronteras al flujo del agua subterránea; sin embargo, localmente, el fracturamiento puede incrementar su permeabilidad.

El movimiento del agua subterránea en el medio granular está controlado por las variaciones de permeabilidad de los diferentes depósitos, mientras que en el medio fracturado su trayectoria depende del patrón de fracturas y fallas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2012, se ejecutaron 4 pruebas de bombeo de corta duración (4 a 6 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, como resultado de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, por métodos analíticos convencionales y por el método numérico Rathod and Rushton (1991), se estima que los valores de transmisividad varían de **5.94×10^{-2} a 1.07×10^{-3} m²/s**. Los valores de conductividad hidráulica varían de **1.12×10^{-5} a 1.4×10^{-3} m/s (0.97 a 121.59 m/d)**. Los valores más altos se presentan en los depósitos granulares.

De la interpretación de las pruebas de bombeo por el método de Rathod and Rushton se obtuvieron coeficientes de almacenamiento específico de 0.1.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea y del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 1997-2012.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2012 varía de 20 a 90 m (figura 4), incrementándose por efecto de la topografía desde la zona del valle hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más someros se presentan en la zona del valle cercana a los arroyos, mientras que las zonas con mayor profundidad se registran en la zona agrícola.

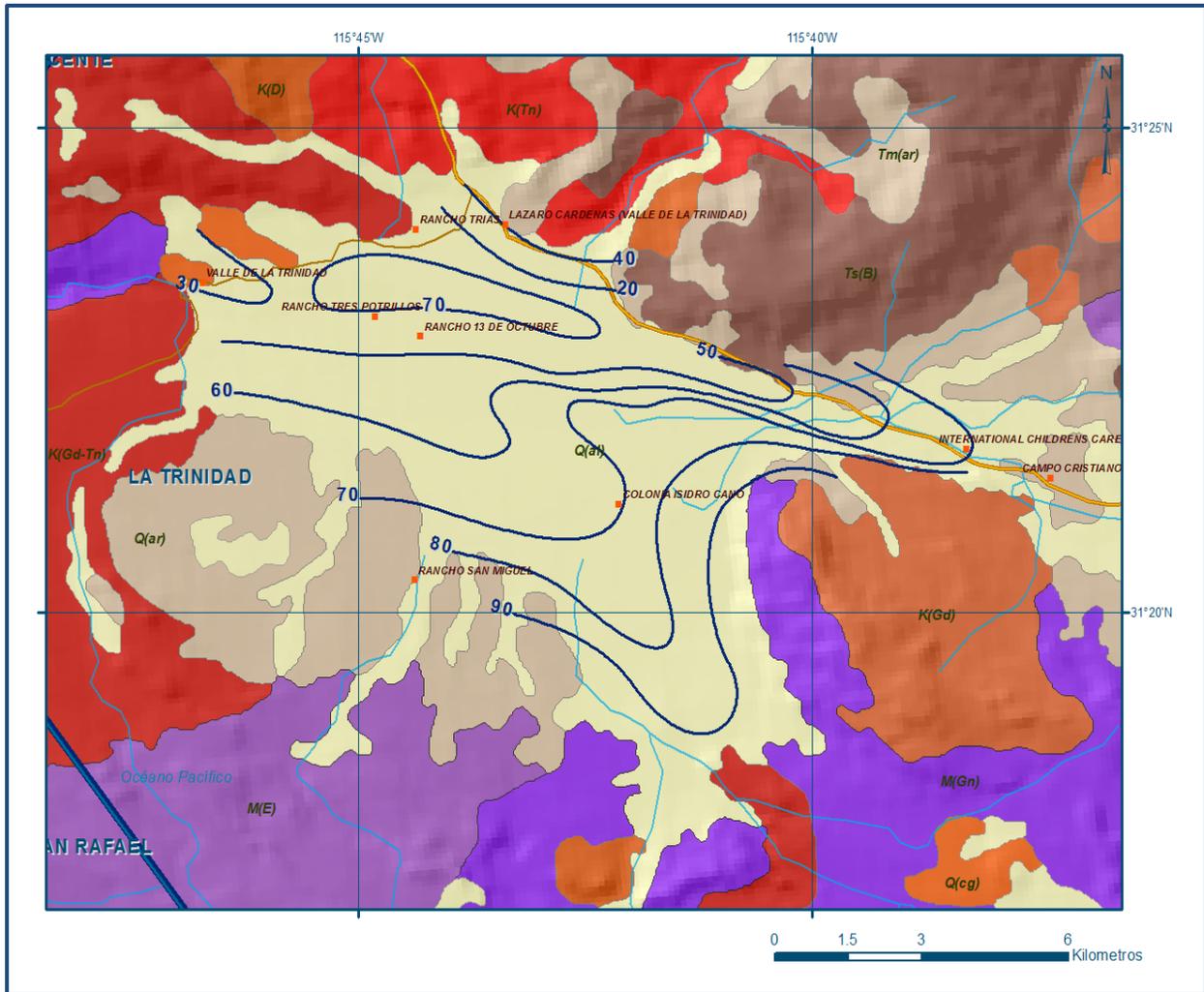


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2012 (figura 5) va de 770 msnm en la parte oriental a 700 msnm en la zona del valle.

La dirección del flujo subterráneo es hacia el centro con un gradiente uniforme, hasta llegar al poblado Ejido valle de la Trinidad donde la curva de 700 msnm forma un cono de abatimiento.

Las configuraciones de elevación para este año muestran que en la zona occidental el flujo se invirtió y el valle ya no presenta salidas subterráneas.

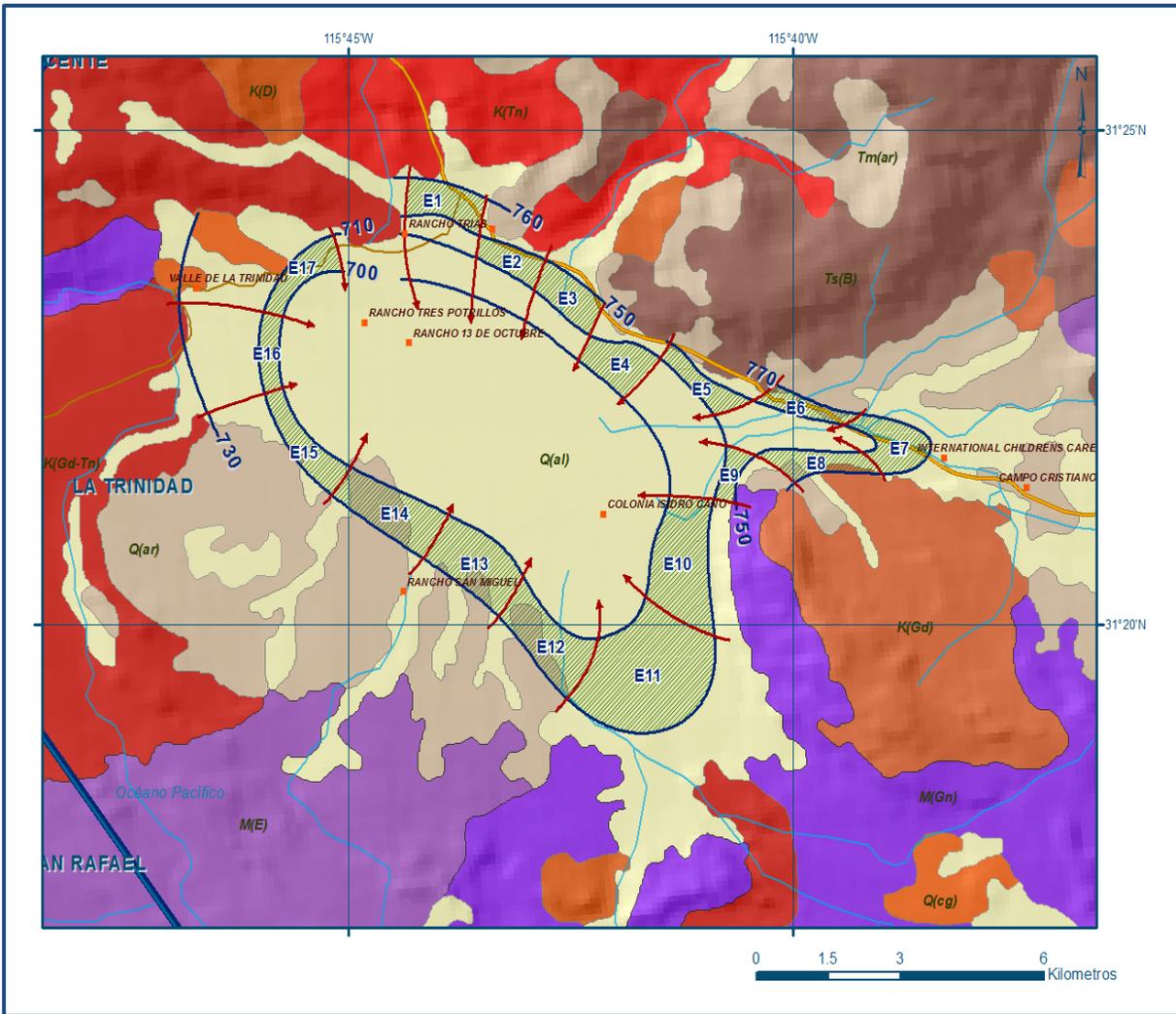


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2012)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1997-2012 (figura 6), se registran valores de abatimiento que van de -5 a -35 m.

Los valores de abatimiento más grandes se localizan cerca de la zona agrícola entre las localidades Colonia Lázaro Cárdenas y Los Compadres.

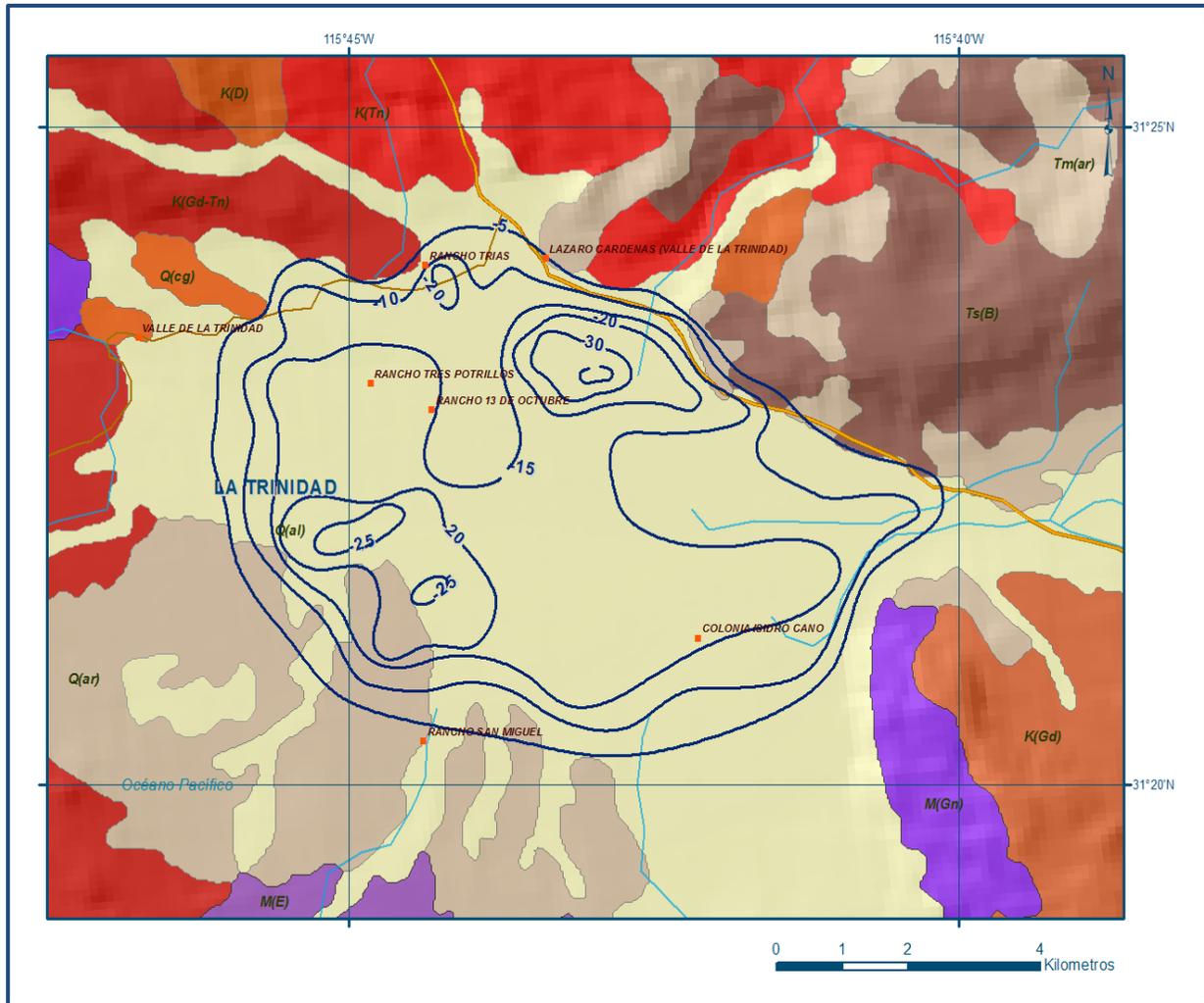


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (1997-2012)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo de los estudios realizados en 2012 se tomaron 4 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente.

La presencia de los iones predominantes como los bicarbonatos, el cloro, los sulfatos, el calcio y el sodio están asociados a la lluvia y al contacto con rocas ígneas y metamórficas. En las obras muestreadas los valores de sólidos totales disueltos (STD) fluctúan entre 800 y 1500 ppm, las mayores concentraciones se encuentran en la porción centro y oriente del valle. El potencial hidrógeno (pH) promedio es de 7.63, los valores máximos se identificaron en los manantiales.

Con respecto a la familia de agua predominante, las muestras pertenecen a la familia del agua bicarbonatada-cálcica.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), para 2012 existían 122 aprovechamientos. De los cuales 99 son pozos, 21 norias y 1 manantial. Del total de obras, que en conjunto extraen un volumen de **27.7 hm³ anuales**, de los cuales 25.2 hm³ (91.1 %) son para uso agrícola y 2.5 hm³ (8.9%) para los usos doméstico y pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1997 a 2012, en una superficie de 75 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:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, y de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado, 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 cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

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

Donde:

R_v : Recarga vertical

R_r : Retornos de riego

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

B : Bombeo

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B - E_h - R_r \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Recarga inducida por retornos de riego (R_r)

Como se mencionó anteriormente, la recarga inducida (R_i) tiene varios componentes, en este caso solo se consideran la infiltración de los excedentes del riego agrícola (R_r).

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que 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 (Jacob Bear 1970).

Para el cálculo de esta componente, se considera que el 15% del agua aplicada retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, lo cual es consistente con la permeabilidad media a baja de sedimentos del subsuelo y con el hecho de que en la mayor parte de las parcelas el riego es por goteo.

De esta manera, tomando en cuenta que el volumen neto de agua aplicado al riego que es de 25.3 hm³/año, del cual se infiltran, como retornos de riego, el 15% corresponde a 3.8 hm³/año. Por lo tanto **Rr = 3.8 hm³ anuales.**

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, 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 el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5. 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:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

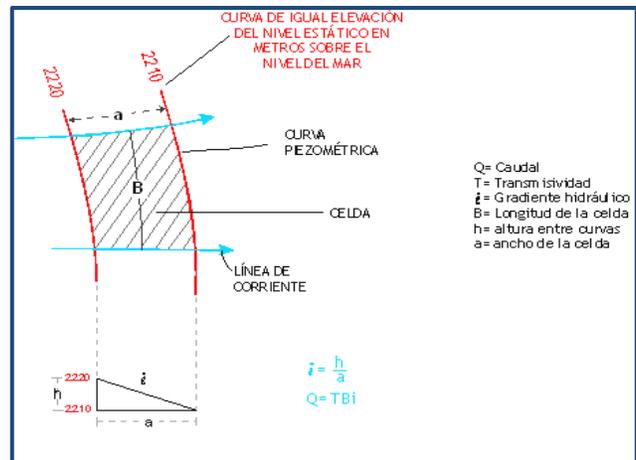
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/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 celda establecida (tabla 2). El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **17.9 hm³/año.**

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas en 2012 y en estudios previos, adaptados al espesor saturado.

Tabla 2. Entradas de agua por flujo subterráneo horizontal (2012)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1520	450	10	0.02222	0.0003	0.0101	0.3
E2	1350	395	40	0.10127	0.0003	0.0410	1.3
E3	1860	510	40	0.07843	0.0003	0.0438	1.4
E4	1125	845	10	0.01183	0.0005	0.0067	0.2
E5	1830	675	40	0.05926	0.0005	0.0542	1.7
E6	2255	395	20	0.05063	0.0006	0.0685	2.2
E7	2140	1125	20	0.01778	0.0015	0.0571	1.8
E8	1830	430	20	0.04651	0.0008	0.0681	2.1
E9	1015	730	40	0.05479	0.0010	0.0556	1.8
E10	2705	1240	10	0.00806	0.0010	0.0218	0.7
E11	2480	1410	10	0.00709	0.0005	0.0088	0.3
E12	2030	730	10	0.01370	0.0005	0.0139	0.4
E13	2365	675	10	0.01481	0.0005	0.0175	0.6
E14	1915	790	10	0.01266	0.0005	0.0121	0.4
E15	2030	675	10	0.01481	0.0008	0.0241	0.8
E16	1690	505	10	0.01980	0.0010	0.0335	1.1
E17	1970	395	10	0.02532	0.0005	0.0249	0.8
Total entradas							17.9

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **27.7 hm³/año**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2006-2013 (figura 6).

Con base en ella y considerando un rendimiento específico de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 75 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

- $\Delta V(S)$** = Cambio de almacenamiento en el período analizado;
S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;
A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);
h= Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 1997-2012 se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento es de -5.3 hm³/año. Por lo tanto, **$\Delta V(S) = - 5.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2006-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-10 a -15	-12.5	14.4	0.1	-18.0
-20	-20.0	0.2	0.1	-0.4
-20 a -15	-17.5	17.6	0.1	-30.8
-20 a -25	-22.5	3.3	0.1	-7.4
-25 a -30	-25.0	1.5	0.1	-3.8
-25	-25.0	0.6	0.1	-1.5
-30 a -35	-32.5	0.8	0.1	-2.6
-35	-35.0	0.1	0.1	-0.4
-5 a -10	-7.5	9.9	0.1	-7.4
0 a -5	-2.5	26.6	0.1	-6.7
Área de balance		75.0		-78.9
			Promedio anual	-5.3

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2), establecida anteriormente:

$$R_v = B - E_h - R_r \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 27.7 - 17.9 - 3.8 - 5.3$$

$$R_v = 0.7 \text{ hm}^3$$

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

$$R = R_v + E_h + R_r$$

$$R = 0.7 + 17.9 + 3.8$$

$$R = 22.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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:

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

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 **22.4 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida es de **DNC = 0.0 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 (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **27,330,506 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 22.4 - 0.0 - 27.330506 \\ \text{DMA} &= -4.930506 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **4,930,506 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1997. Actualización piezométrica del acuífero BC-La Trinidad B.C: