

**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN DIEGO DE ALEJANDRÍA (1444),  
ESTADO DE JALISCO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación Administrativa del acuífero .....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>4</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1 Provincia Fisiográfica .....	5
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía .....	6
3.4 Geomorfología.....	6
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>6</b>
4.1 Estratigrafía .....	9
4.2 Geología Estructural.....	11
4.3 Geología del subsuelo .....	11
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
5.1 Tipo de acuífero .....	12
5.2 Parámetros hidráulicos.....	12
5.3 Piezometría .....	12
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático .....	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	14
5.4.3 Evolución del nivel estático .....	15
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	15
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>16</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>16</b>
7.1 Entradas .....	17
7.1.1 Recarga vertical (Rv) .....	17
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	22
7.1.3 Recarga inducida (Ri) .....	24
7.2 Salidas.....	24
7.2.1 Bombeo (B).....	24
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	24
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>25</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	25
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	26
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	26
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>28</b>

## **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 San Diego de Alejandría, definido con la clave 1444 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del estado de Jalisco, entre los paralelos 20° 48' y 21° 19' de latitud norte y los meridianos 101° 42' y 102° 13' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 872 km<sup>2</sup>. Limita al norte y oeste con el acuífero Lagos de Moreno; al sur con San José de Las Pilas, pertenecientes al estado de Jalisco y al este con los acuíferos Valle de León y Rio Turbio, pertenecientes al estado de Guanajuato (figura 1). Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios de Lagos de Moreno, Unión de San Antonio, Arandas, una porción al suroeste del municipio San Julián y destacando en mayor porción el municipio San Diego de Alejandría.

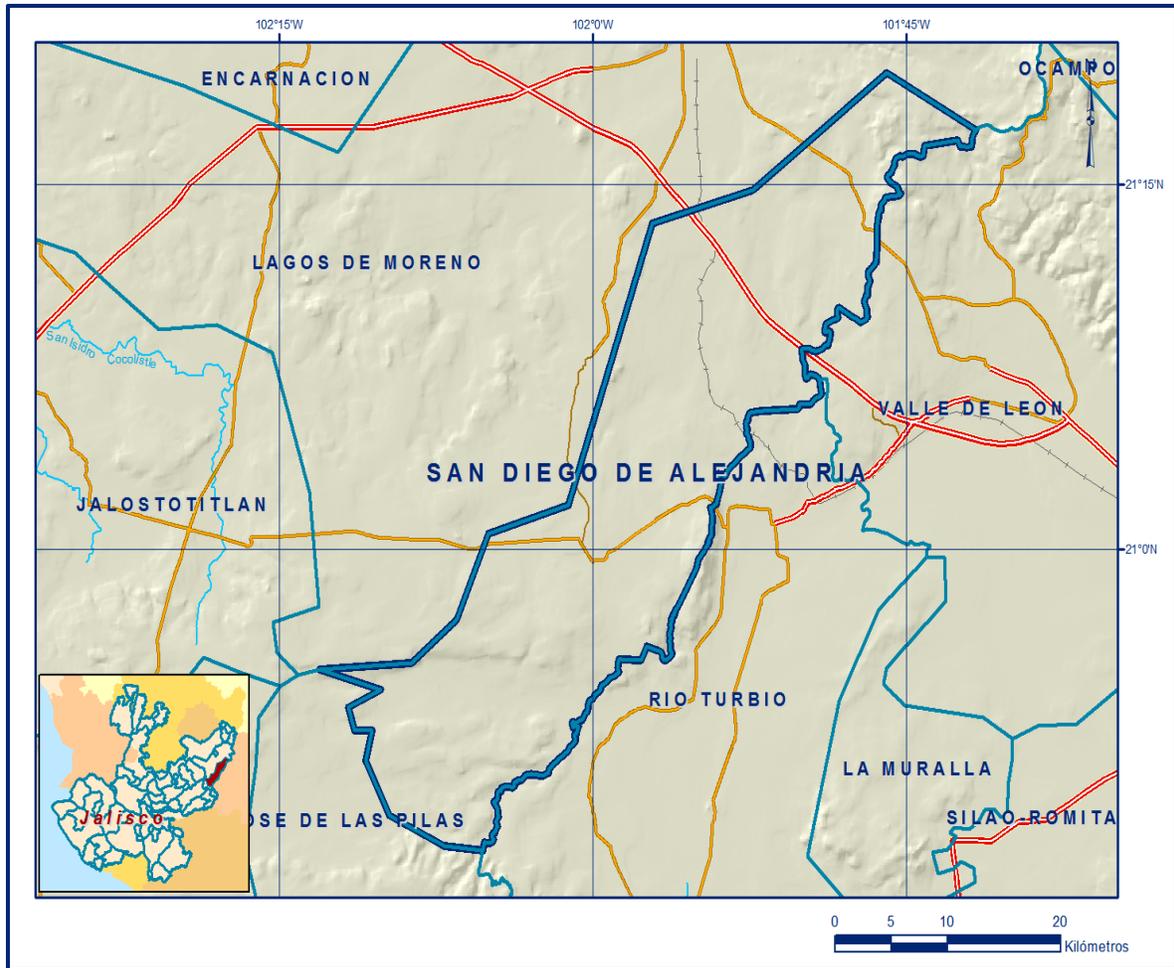


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 1444 SAN DIEGO DE ALEJANDRIA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	13	6.0	20	55	5.0	
2	102	8	42.4	20	55	22.7	
3	102	6	32.7	20	57	8.5	
4	102	5	1.4	21	0	39.9	
5	102	1	10.7	21	1	52.0	
6	101	57	10.4	21	13	24.0	
7	101	52	22.0	21	14	45.7	
8	101	49	48.3	21	16	41.1	
9	101	45	57.6	21	19	34.1	
10	101	41	39.9	21	17	14.0	DEL10 AL11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	101	49	10.0	21	6	58.9	DEL11 AL12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	102	5	17.8	20	47	39.8	
13	102	7	8.5	20	47	52.8	
14	102	9	46.5	20	49	7.6	
15	102	10	53.0	20	51	20.6	
16	102	10	36.4	20	52	35.4	
17	102	11	26.2	20	52	35.4	
18	102	11	42.9	20	53	33.6	
19	102	10	11.4	20	54	15.2	
1	102	13	6.0	20	55	5.0	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

## 1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero San Diego de Alejandria pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio se encuentra completamente vedado sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en zonas no vedadas en diversos Municipios del estado de Jalisco y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios del estado de Jalisco” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 07 de Diciembre de 1987.

Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza Distrito o Unidad de Riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se ha llevado a cabo un sólo estudio geohidrológico que a continuación se menciona:

## **ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LA BARCA, SAN JOSÉ DE LAS PILAS, SAN DIEGO DE ALEJANDRÍA Y JESÚS MARIA, JALISCO.**

**Elaborado por la Compañía Proyectos, Trámites y Supervisión de Construcciones (PROTYC, S.A. de C. V.), para la Comisión Nacional del Agua, en 2005.**

Este estudio tuvo como objetivo general, actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento geohidrológico, para contar con la información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la ejecución de actividades de campo que incluyeron: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia Fisiográfica**

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el área que cubre el acuífero se encuentra ubicado dentro del sector nor-occidental de la Provincia Fisiográfica X Eje Neovolcánico, Subprovincia Altos de Jalisco. Esta provincia se caracteriza por una serie de planicies escalonadas delimitadas por fallas, estructuras y aparatos volcánicos con una extensión de oeste a este aproximada de 980 km, desde la costa del Océano Pacífico hasta el Golfo de México. La zona cubre gran parte de la subprovincia Altos de Jalisco.

La subprovincia Altos de Jalisco se caracteriza por amplias mesetas de origen volcánico y presenta la mayor densidad de topoformas degradativas, generadas por disección hídrica y abundancia de valles profundos de laderas escarpadas a fines de los caños de la Sierra Madre Occidental. Representa el 17.51% con respecto a la superficie total de la entidad y se distinguen en ella los siguientes sistemas de topoformas: Escudo-Volcanes Aislados o en Conjunto, Pequeña Meseta asociada con lomeríos, Gran Meseta con Cañadas, Meseta Lávica, Meseta Lávica asociada con lomeríos, Meseta Escalonada, Lomerío de Colinas Redondeadas, Lomeríos Suave en Arenisca Conglomerado, Valle de Laderas Escarpadas asociadas a lomeríos, Valle con Terrazas, Cañón y Depresión.

### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes para el acuífero San Diego de Alejandría se encuentra en el rango de semicálido subhúmedo, del grupo de climas templados. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con la información de 4 estaciones climatológicas: Guanajal, San Diego de Alejandría, Comanja de Corona y Unión de San Antonio. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **642 mm** y **17.6 °C**, respectivamente.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 12 “Lerma-Santiago”, cuenca del Río Lerma-Salamanca, sus principales corrientes son: el río Peña Blanca y Jalpa; además cuenta con los arroyos Arenillas, Casillas y San Agustín; también se tienen las presas Vieja de Jalpa, Nueva de Jalpa, Peña Blanca, La Amapola, San Fernando, Los Charcos, El Zapote, Los Griegos, Corral Blanco, San José, Santa Rosa, así como algunos pozos. La zona no cuenta con estructura hidráulica para el almacenamiento de las corrientes superficiales.

### **3.4 Geomorfología**

En dichas provincias la conformación del relieve es el resultado principal de procesos endógenos, modificado por la acción de procesos exógenos. La zona se encuentra localizada en una meseta de cimas y faldas, valles y barrancos en donde las partes más accidentadas se elevan entre los 1,500 y 2,400 msnm, su terreno es predominantemente semiplano; en ellas se desarrolla un drenaje dendrítico en su gran mayoría con dirección NE-SW. Dentro de la zona del acuífero se encuentran los Cerros del Palenque, del Chapín, del Gallo donde nace el Cañón de Jalpa; y al llegar a los linderos con San Julián, se levanta el cerro de Tolimán, también encontramos el cerro el Frontón, el cerro Pelón, y las mesas Piedras Bolas, San Vicente, San Ignacio, El Palenque y La Mesita, además de la Barranca El Carricillo.

## **4. GEOLOGÍA**

La zona está conformada por areniscas, basaltos, conglomerados, esquistos, granitos, riolitas y tobas (figura 2). Con base en el análisis de los afloramientos de rocas, de sus relaciones estratigráficas, estructurales y correlaciones con áreas vecinas, apoyado en algunos sitios con dataciones, se interpretan los eventos geológicos ocurridos en la región.

El Eje Neovolcánico es una cadena montañosa compuesta totalmente de lavas y materiales piroclásticos de aluvión y origen lacustre del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, que no han sufrido perturbaciones desde que se depositaron, con excepción de la porción oeste (Fosas de Tepic, Colima, Chapala y parte de Michoacán).

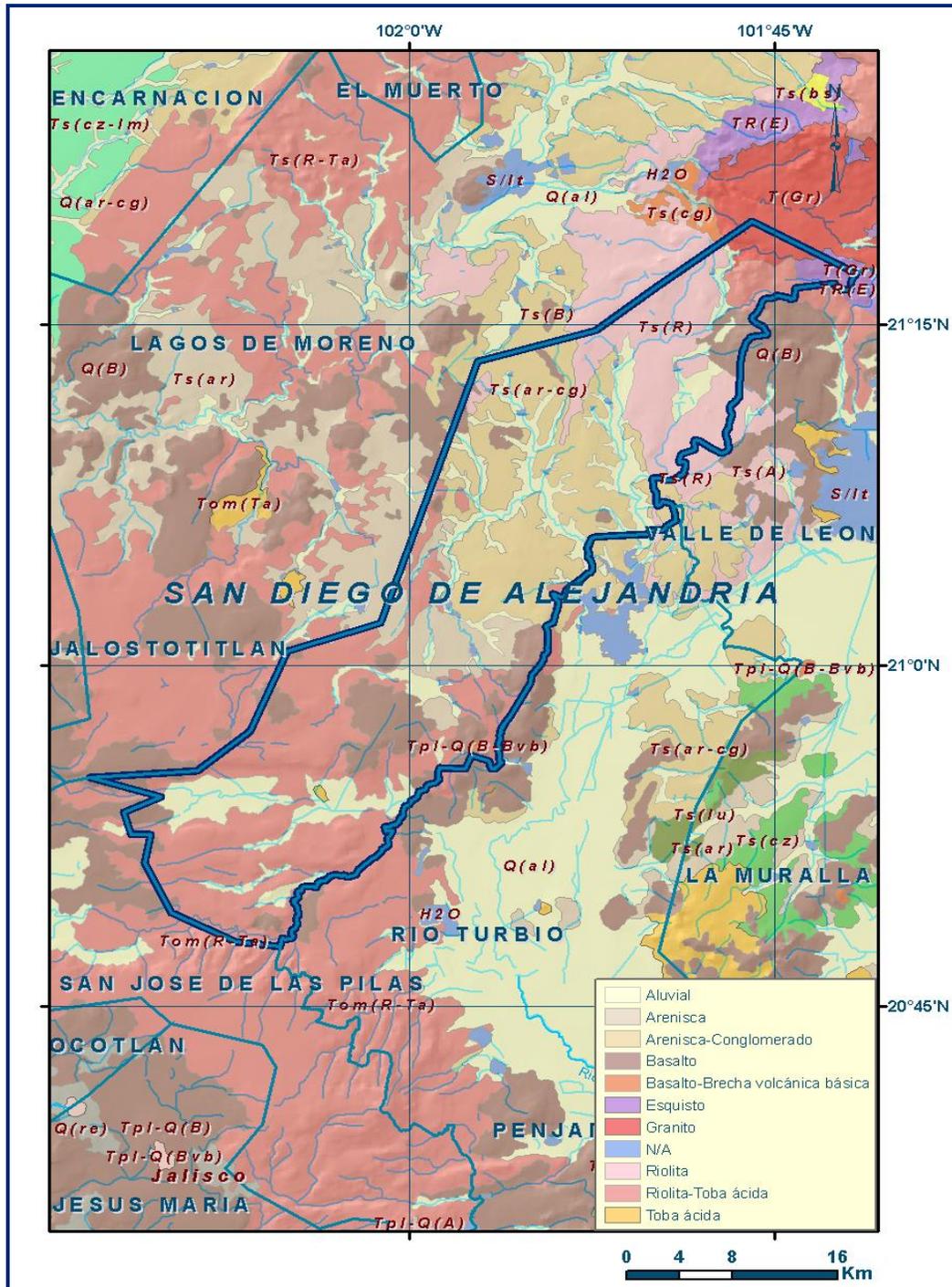


Figura 2. Geología general del acuífero

Colinda al norte con la Mesa Central, siendo el límite la línea en que la superficie de meseta cede su lugar a las vertientes de montañas. Sus contactos occidental, meridional y oriental son la franja en que los materiales volcánicos encuentran a los sedimentos de las provincias adyacentes, La Sierra Madre del Sur, Cuenca Morelos-Guerrero y Cuenca de Tlaxiaco.

Esta línea rodea el volcán de Colima y avanza hacia el Este en un curso sinuoso cortando las cabeceras de los tributarios septentrionales del Río Balsas y parte oriental del Pico de Orizaba. Según la literatura aparecen varias fases de actividad volcánica en la forma siguiente:

Una fase cretácica metamorfoseada. Esta fase fue objeto de trabajos recientes que permitieron definir su edad cretácica. Se presenta como una serie andesítica, como facies en ocasiones “lavas almohadilladas”, brechas y tobas mezcladas con sedimentos del Jurásico Superior–Cretácico Inferior. Este conjunto sufrió un metamorfismo en el Cretácico Medio. Los afloramientos de estas rocas son muy extensos.

Una fase Oligo-Miocénica que se puede diferenciar en la parte occidental del Eje Neovolcánico. Por lo general casi siempre se presenta en forma de mesetas, con alternancias de brechas y derrames, inclinados por efectos de la tectónica pliocuaternaria. Sus extensos afloramientos se localizan al nivel del Lago de Chapala, del graben de Colima y de la Presa del Infiernillo.

La fase Plio-Cuaternaria, a diferencia de las secuencias anteriores tiene una disposición Este-Oeste. Aparte de los aparatos volcánicos, muchos de ellos destruidos o recubiertos por emisiones posteriores, el Eje Neovolcánico presenta una gran cantidad de estructuras extrusivas como calderas, axalapascos, conos ígneos secundarios, restos de cuellos volcánicos, etc.

Grahen Chapala- Tepic. Este graben constituye la terminación Occidental del Eje Neovolcánico. Las manifestaciones volcánicas recientes se alinean con una orientación NW-SE, en una franja que se extiende desde Tepic hasta Guadalajara. A la altura del Lago de Chapala cambian las direcciones tectónicas, llegando a ser Este-Oeste. Los límites del graben están constituidos por la secuencia volcánica Oligoceno-Miocénica, presente al nivel del Río Grande de Santiago, así como en ambos lados del Lago de Chapala.

En el Graben de Tepic se localizan muchas manifestaciones siálicas de tipo riolítico e ignimbrítico Plio Cuaternarias ubicadas entre Tequila, Jal., al norte de Guadalajara, y al nivel del Río Grande de Santiago. La manifestación riolítica más espectacular se encuentra a la altura de La Primavera, Jal.; se trata de domos riolíticos yuxtapuestos, con derrames asociados que han conservado perfectamente las figuras de flujo por lo cual se puede pensar en una edad Cuaternaria-Reciente. Las tobas se presentan estratificadas y masivas, su abundancia es más notoria que las de las brechas; observan una constitución mineralógica, así como física, variable; pero todas ellas acompañadas de cuarzo; por lo general son de colores grises y café claro.

Fácilmente se pueden distinguir dos clases de basalto; el primero es de color gris oscuro, compacto, muy fracturado y pseudoestratificado, está poco alterado, se localiza claramente en algunos cortes expuestos en el camino actual que va de Tepic al Puerto de San Blas.

El segundo tipo consiste en un basalto del mismo color, compacto y a veces vesicular poco alterado, con cristales de plagioclasa alargados en forma de agujas, con frecuencia estas plagioclasas llegan a formar fenocristales.

Graben de Colima. Esta zona se comunica al norte con la depresión de Chapala, a la altura de la Laguna de San Marcos. Con respecto a la disposición general del Eje Neovolcánico Transmexicano, el Graben de Colima se diferencia por su orientación Norte-Sur. Aquí la actividad volcánica fue mayor al nivel del conjunto Nevado de Colima – Volcán de Fuego; sin embargo, de un lado y otro del graben se desarrollaron numerosos aparatos volcánicos más pequeños que cubrieron los terrenos volcánicos oligomiocénicos.

Graben o Fosa de Chapala. Este es el probablemente más ampliamente desarrollado, ya que cuando menos tiene unos 80 km de longitud por 20 de ancho. Su orientación es E-W y en la porción baja del mismo se encuentra el Lago del mismo nombre. En la ladera norte del Lago de Chapala afloran varios de cientos de metros de rocas clásticas volcánicas muy inclinadas que no aparecen en la porción sur.

#### **4.1 Estratigrafía**

Es difícil establecer que tipos de rocas se encontraban en la base del Eje Neovolcánico antes de que éste alcanzara su pleno desarrollo en el Plioceno Cuaternario, que dio lugar a imponentes moles de rocas volcánicas de más de 5000 m de altura.

Evidentemente, nuestro continente prácticamente permanecía ya emergido durante el Eoceno y se estaban ya erosionando gran parte de las elevaciones cretácicas y rocas ígneas y metamórficas preexistentes.

Las unidades litológicas aflorantes de la zona están representadas por secuencias volcanosedimentarias, rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas; ubicadas en un rango cronoestratigráfico comprendido entre el Mesozoico y el Cenozoico.

### **Unidades del Paleógeno-Neógeno**

Las rocas ígneas extrusivas básicas del Plioceno-Cuaternario, se presentan ampliamente en la región central del estado y forman parte de la provincia petrológica Eje Neovolcánico. Consisten en basalto y basalto andesítico; su textura es holocristalina, intergranular y porfídica; su estructura es vesicular, masiva y compacta, con fracturas y fallas normales. Sobreyace en discordancia a granito del Cretácico, toba ácida del Oligoceno-Mioceno y rocas sedimentarias clásticas del Neógeno; subyace a depósitos clásticos del Cuaternario.

Por lo anterior se la asigna edad del Plioceno Cuaternario. Morfológicamente constituye derrames y cascadas lávicas, volcanes monogenéticos y estratovolcanes; dentro de esta unidad se localizan centros eruptivos como el volcán de Fuego de Colima y el Nevado de Colima.

### **Unidades del Cuaternario**

Del Cuaternario se encuentra una secuencia volcánica de composición ácida, constituida por lava riolíticoperalcalina, toba, pómez, vidrio volcánico, depósitos lacustres, fluviales y volcanoclásticos. A este paquete de materiales se les dató del Pleistoceno Superior.

La unidad de suelos es de edad correspondiente al Cuaternario e incluye los suelos aluviales, litoral residual y lacustre.

El aluvial varía en su granulometría de arcilla a grandes bloques, el residual es limo-arcilloso y en el lacustre predomina la arcilla; el aluvial se distribuye por todo el estado, el residual en la región de Los Altos de Jalisco y el lacustre en la región central del estado.

## **4.2 Geología Estructural**

Las rocas aflorantes en la región centro-occidental del país, muestran diversas etapas de deformación. Forman parte de cadenas montañosas orogénicas, compuestas principalmente por rocas volcánicas que se depositaron sobre un basamento metamórfico; originando elementos estructurales distintivos dentro del marco de la tectónica de placas.

La secuencia, del Plioceno hasta el Cuaternario, se constituye por volcanismo calcoalcalino; pertenece a la provincia Eje Neovolcánico y cubre la porción central de la entidad; las rocas más representativas son: basalto, andesita, toba y brecha de composiciones básica e intermedia, en ellas se observan tres grandes sistemas de fallas normales escalonadas y fracturas, que originaron el graben de Colima-Sayula, con orientación norte-sur, el graben de Chapala, con dirección oeste-este y el graben de Tepic-Zacoalco de Torres, de noroeste-sureste los cuales convergen en la misma zona dentro de la superficie estatal; el origen de las rocas que conforman el Eje Neovolcánico se relaciona a la subducción de la placa de Cocos debajo de la corteza continental de México.

## **4.3 Geología del subsuelo**

Dentro de los límites del acuífero no se han realizado estudios para conocer su geometría, sin embargo, se puede extrapolar, por la geología del acuífero y su similitud con el acuífero Lagos de Moreno en donde se determinaron diferentes unidades geoelectricas. Hay porciones donde el terreno corresponde con rocas ígneas extrusivas ácidas que prácticamente tienen permeabilidad baja en todos los afloramientos.

Se presentan en el subsuelo rocas ígneas intrusivas ácidas (granito) y metamórficas (hornfels); ambas unidades tienen baja permeabilidad y las posibilidades de que contengan agua son muy remotas, excepto donde se presenten sistemas de fracturas donde pueden localizarse acuíferos de poca importancia, así como en áreas de granito alterado, que en algunas partes tiene espesores considerables.

En la porción superior del acuífero se localizan cuerpos de roca con características más favorables para almacenar agua, como son las unidades litológicas constituidas de areniscas y conglomerados que tienen permeabilidades altas, y condiciones geológicas y topográficas propicias para el almacenamiento.

Las rocas de origen continental y lacustre pueden presentar buenas permeabilidades, debido a sus características granulométricas y su pobre cementación, con espesores que pueden ser superiores a los 300 m. Los basaltos se consideran como buenas zonas de recarga debido a su intenso fracturamiento que los hace muy permeables y en ocasiones buenos almacenadores de agua.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, conformado por una secuencia de riolitas y tobas de permeabilidad baja que funciona como zona de recarga generando un escurrimiento superficial hacia el centro del valle compuesta por areniscas, conglomerados y basaltos fracturados que ayudan a la recarga del acuífero.

### **5.2 Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se llevaron a cabo 14 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Theis y Jacob-Cooper.

De los resultados de su interpretación por los métodos analíticos mencionados, se establece que los valores de transmisividad son de  **$1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$**  en las zonas donde la estratigrafía está compuesta de una combinación de sedimentos aluviales y formaciones fracturadas de rocas ígneas. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se obtuvieron valores del coeficiente de almacenamiento.

### **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en 2005. Se realizaron dos corridas piezométricas para obtener las configuraciones del nivel del agua subterránea. Obteniendo que flujo subterráneo tiene una dirección hacia San Jose del Caliche, el cual circula de las partes altas a las bajas y varían de 1860 a 1770 msnm.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático para 2005, mostrada en la figura 3, se registran valores que varían de 20 a 80 m. Los valores más someros (20 a 40 m) se localizan en la porción centro-norte del acuífero, en los alrededores de las localidades El Comedero, San José de Caliche, San Bartolo, Loma de Sotelos, Las Palmas y Noria de las Vueltas; los valores de 40 a 60 m corresponden a Lomas de Santa Gertrudis, Corral Blanco, San Diego de Alejandría y El Molino éstos tres últimos al sur del acuífero y hacia el oeste los valores de 60 a 80 m se encuentran las localidades El Cedro, El Vizcaíno y La Tapona.

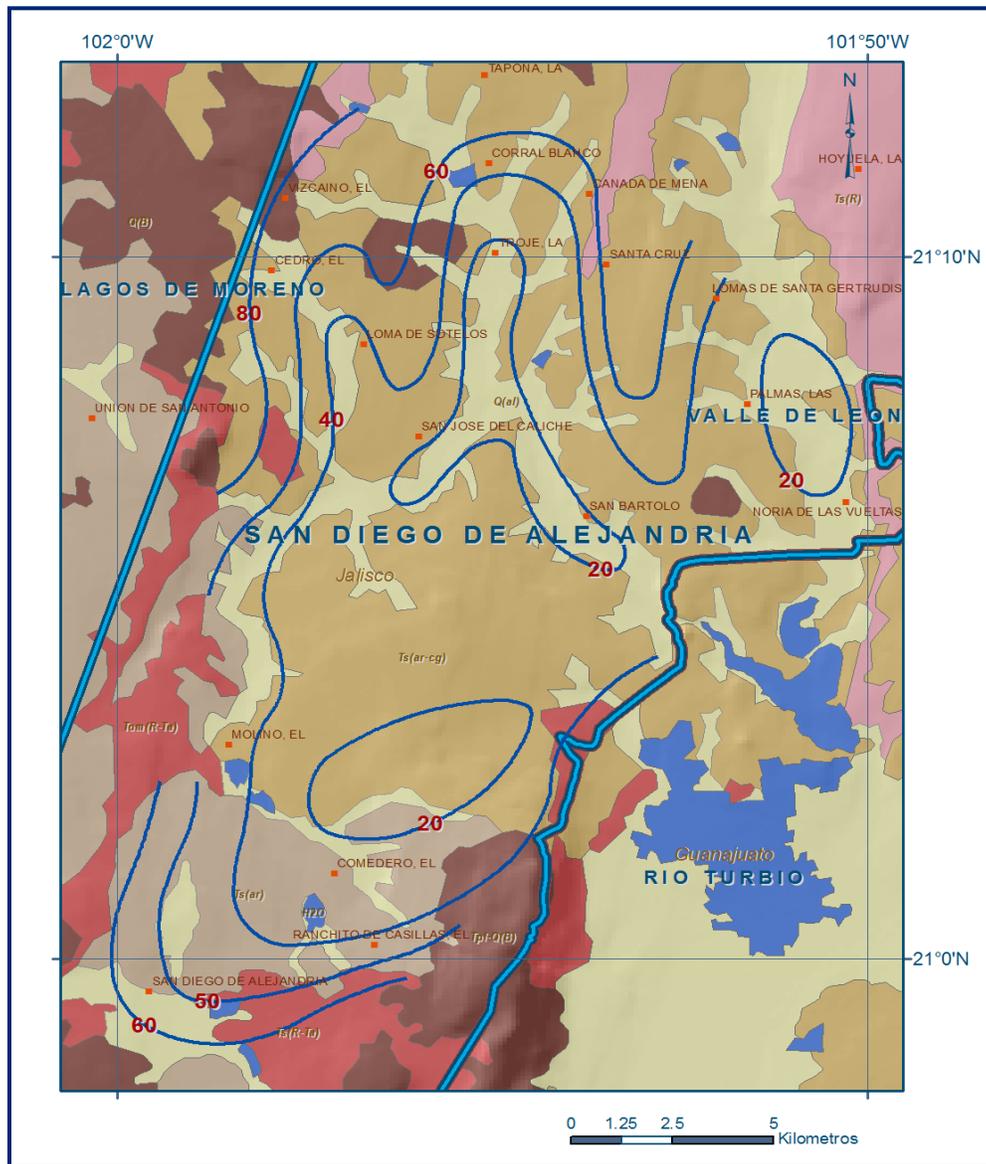


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2005)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático mostrada en la figura 4, se observa que los valores de elevación varían de 1800 a 2010 msnm, con una dirección preferencial de flujo noreste-suroeste (hacia el centro del acuífero), al igual que la profundidad, se muestra claramente el reflejo de la topografía para la mayor parte del acuífero.

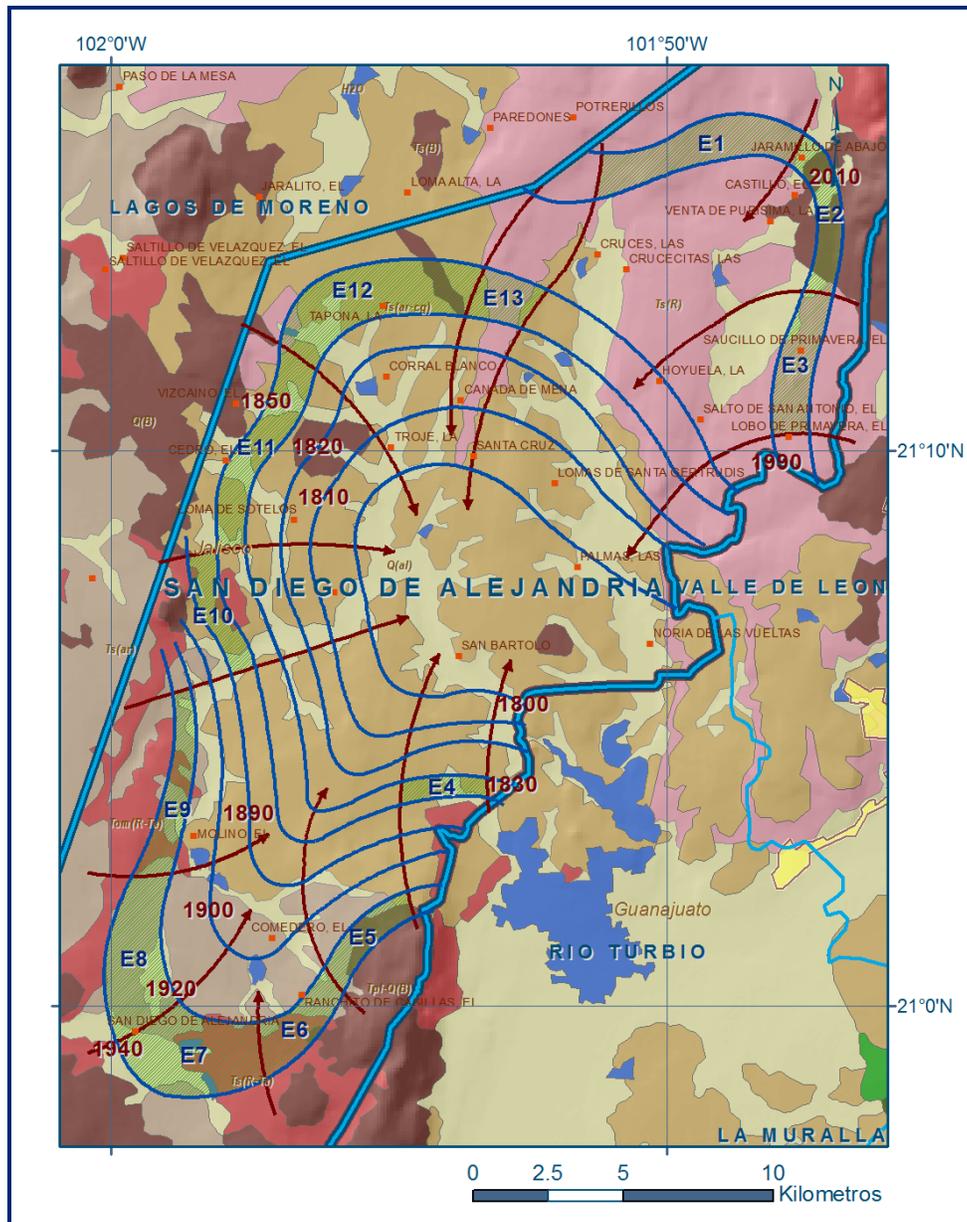


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2005)

### **5.4.3 Evolución del nivel estático**

Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

### **5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2005, se tomaron 7 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron los parámetros correspondientes dependiendo el fin de uso de agua como son potabilidad o riego, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 32 a 247 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Con respecto a la conductividad eléctrica, esta presenta valores que varían de 0.064 a 0.495  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los valores de temperatura varían de 18.2 a 19 °C y los de pH varían de 6.9 a 7.7.

En la mayor parte del acuífero predominan las aguas suaves con dureza temporal y bajas concentraciones de calcio, magnesio y bicarbonatos. De acuerdo con los iones dominantes, el agua de los pozos se caracteriza como cálcica bicarbonatada y en algunos puntos de tipo magnésica bicarbonatada, que representa agua de reciente infiltración.

Según el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), una muestra se clasifica como C1S1, que representa contenido bajo de sales y baja proporción de sodio intercambiable, que pueden utilizarse para riego agrícola sin ninguna restricción, seis muestras más se clasifican como C2S1, esta clasificación pertenecen aguas moderadamente salinas que pueden ser usadas para riego si se proporciona un excedente para fines de lavado, sin prácticas especiales de control de sales.

El contenido de sodio es muy bajo sin que presente gran peligro de crear niveles de sodio intercambiable.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del último censo realizado en el 2005, se registró la existencia de un total de 109 aprovechamientos del agua subterránea, todos ellos pozos. De ellos, 98 se encuentran actualmente activos y los 11 restantes se consideran inactivos.

El volumen total de extracción es de **7.7 hm<sup>3</sup>/año**, de ese total, 4.0 hm<sup>3</sup>/año (51.9%) es utilizado para uso agrícola y 3.7 hm<sup>3</sup>/año (48.1%) es para uso público urbano.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

## 7.1 Entradas

Las entradas al acuífero San Diego de Alejandría están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv), sin embargo, no existe información piezométrica actual ni histórica en la superficie que cubre el acuífero.

La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo hechos se encuentra dispersa en tiempo y espacio, es puntual e inconsistente, aunque fue posible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático, no se cuenta con la información suficiente que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas.

### 7.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \quad (1)$$

$V_{LL}$  = Volumen de lluvia;

$V_{ETR}$  = Volumen evapotranspirado;

$V_{ESC}$  = Volumen escurrido;

$V_{INF}$  = Volumen infiltrado;

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (872 km<sup>2</sup>) por la lámina de precipitación media anual (642 mm):

$$V_{LL} = 872 \text{ km}^2 (0.642 \text{ m}) = 559.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de precipitación de 642 mm y temperatura de 17.6 °C:

<b>COUTAGNE</b>	$ETR = P - \chi P^2$
Donde:	
ETR= Evapotranspiración m/año	
P = precipitación en m/año	
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$	
t = temperatura en °C	

La temperatura promedio anual es de 17.6 °C, que al sustituirlo en la ecuación de Coutagne junto con el valor de precipitación de 642 mm, se obtiene un valor de evapotranspiración de 515.7 mm/año, que multiplicado por el área total resulta en un volumen evapotranspirado de:

$$V_{ETR} = 872 \text{ km}^2 (0.5157 \text{ m}) = \mathbf{449.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación - escurrimiento.

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{VOLUMEN ANUAL DE} & & & & & & \\ \text{ESCURRIMIENTO} & = & \text{PRECIPITACION ANUAL} & & \text{AREA DE LA} & & \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{NATURAL DE LA} & & \text{DE LA CUENCA} & & \text{CUENCA} & & \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{CUENCA} & & & & & & \end{array}$$

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca, de acuerdo

con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

Tabla 2. Valores de k en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000)

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pasizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Camino	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3
TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgadas sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

En el caso de que, en la cuenca, existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15,

$$Ce = K (P-250) / 2000;$$

Si K es mayor que 0.15,

$$Ce = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) / 1.5;$$

Donde:

P= Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1'000,000 para el tipo de suelo, predominan los Feozem, Planosol y Vertisol (figura 5).

En cuanto al uso de suelo (figura 6), de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1'000,000, el 58.8% de la superficie del acuífero está cubierta por pastizal, en los que el suelo es tipo B, por lo que  $K=0.24$ ; en el area agricola cubre un 25.8% de la superficie del acuífero, el suelo es de tipo B, con una  $K=0.27$ ; 12.9% por matorral, suelo tipo A, por lo que  $K=0.24$ ; las áreas de bosque con 2.3% de la superficie del acuífero, suelo tipo B, por lo que  $K=0.16$ . y en areas urbanas con 0.2%, suelo tipo B, por lo que  $K=0.29$ .

$$K_{ponderado} = 0.24 (0.588) + 0.27 (0.258) + 0.24 (0.129) + 0.16 (0.023) + 0.29 (0.002) = 0.246$$

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a **0.25**, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

$$Ce = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 = \mathbf{0.1157}$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:  $V_{ESC} = 0.1157 (559.8 \text{ hm}^3) = \mathbf{64.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$ .

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} V_{INF} &= V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2) \\ V_{INF} &= 559.8 - 449.7 - 64.8 \\ V_{INF} &= \mathbf{45.4 \text{ hm}^3/\text{año}} \end{aligned}$$

La recarga vertical del valle del acuífero se obtiene mediante la siguiente formula aplicando solo en el área correspondiente que es de **240 km<sup>2</sup>**.

$$Rv = \text{Área (km}^2) * \text{Coeficiente de Infiltración} * \text{Precipitación Media (m)}$$

El Coeficiente de Infiltración es igual al cociente del Volumen de infiltración (45.4 hm<sup>3</sup>/año) y el Volumen de Precipitación (559.8 hm<sup>3</sup>/año) y nos da un valor de **0.08**.

$$R_v = (240 \text{ km}^2) (0.08) (0.642 \text{ m})$$

$$R_v = 12.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Esta recarga no incluye las zonas en donde se evaluaron las Eh.

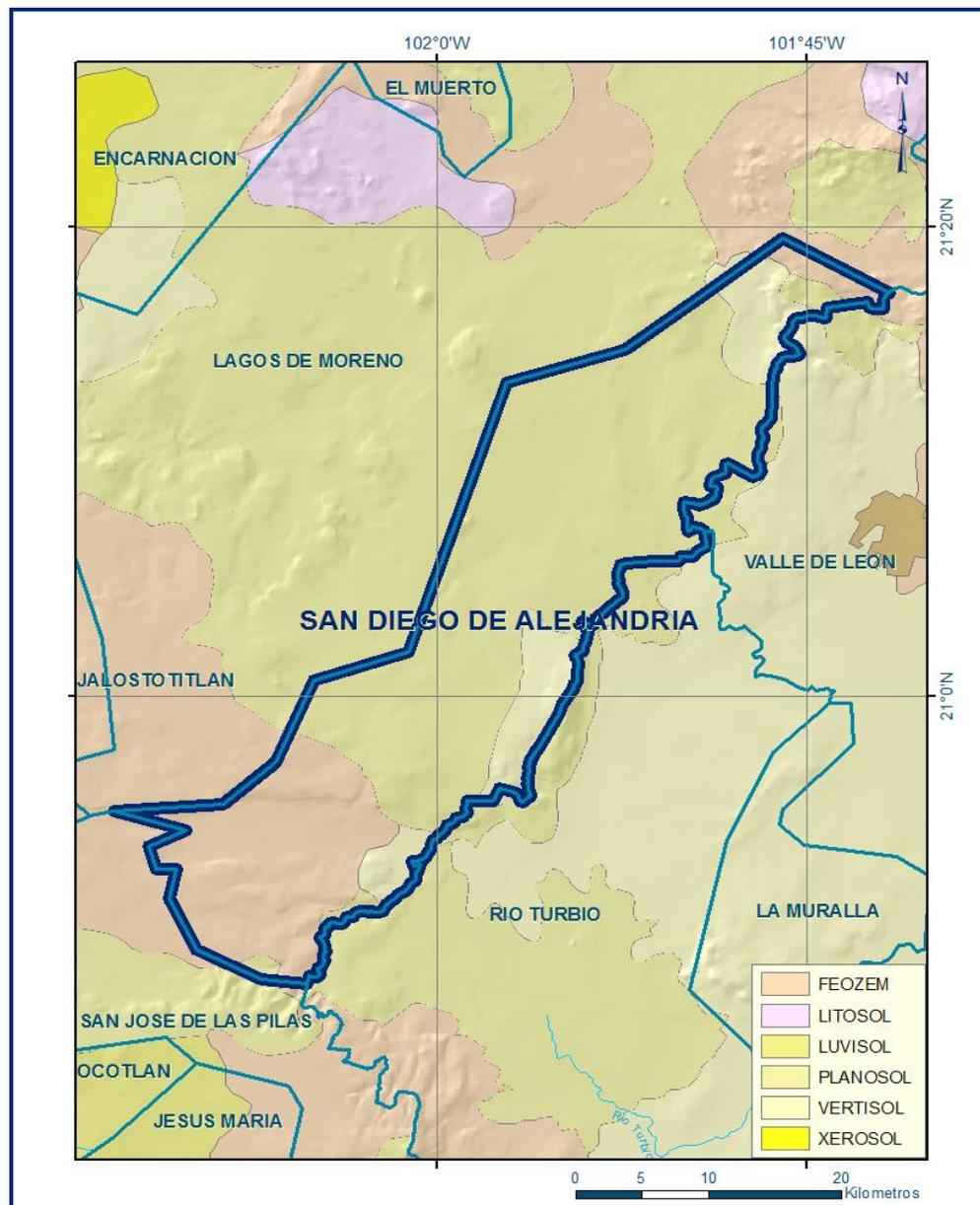


Figura 5. Tipo de suelo

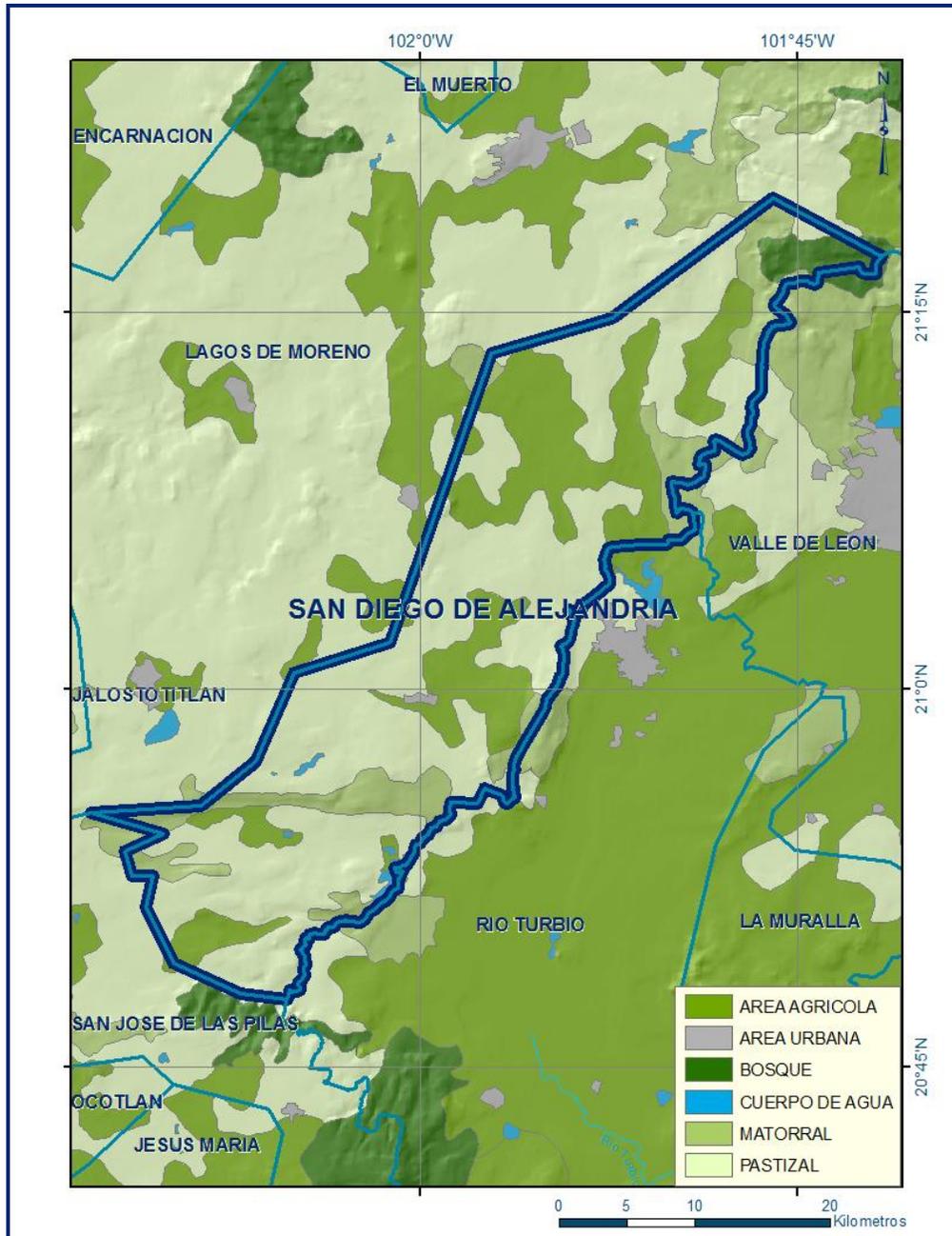


Figura 6. Uso de suelo

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2005, 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:

$$Q = B * i * T$$

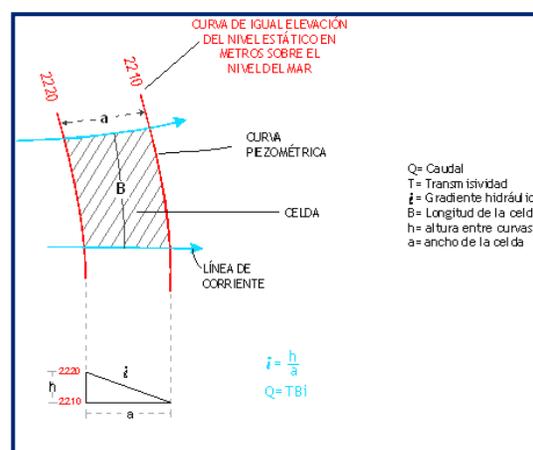
Donde:

**Q** = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

**B** = Longitud de la celda (m)

**i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)

**T** = Transmisividad (m<sup>2</sup>/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona. La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 5 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **22.7 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 5. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2005)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	7315	1170	20	0.017094	0.0003	0.0375	1.18
E2	5270	1025	20	0.019512	0.0005	0.0514	1.62
E3	4390	1170	20	0.017094	0.0003	0.0225	0.71
E4	3510	880	20	0.022727	0.0010	0.0798	2.52
E5	3510	730	20	0.027397	0.0008	0.0769	2.43
E6	2925	1025	20	0.019512	0.0008	0.0457	1.44
E7	4975	2440	20	0.008197	0.0008	0.0326	1.03
E8	4390	1465	20	0.013652	0.0008	0.0479	1.51
E9	5850	880	20	0.022727	0.0005	0.0665	2.10
E10	3805	880	40	0.045455	0.0003	0.0519	1.64
E11	7025	1170	20	0.017094	0.0010	0.1201	3.79
E12	6730	1755	20	0.011396	0.0010	0.0767	2.42
E13	2340	1465	20	0.013652	0.0003	0.0096	0.30
<b>Total entradas</b>							<b>22.7</b>

### **7.1.3 Recarga inducida (Ri)**

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

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró un 20% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea y permeabilidad media de los materiales que conforman el subsuelo.

Si consideramos que 4.0 hm<sup>3</sup> anuales son para uso agrícola, 3.7 hm<sup>3</sup> para uso público urbano y que el 20% de este volumen retorna al acuífero, obtenemos un volumen de recarga inducida por retornos del riego de 0.8 y 0.7 hm<sup>3</sup> por infiltración de pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable y alcantarillado, respectivamente.

Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida es de **Ri = 1.5 hm<sup>3</sup>/año**

## **7.2 Salidas**

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

### **7.2.1. Bombeo (B)**

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **7.7 hm<sup>3</sup> anuales**.

## **7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV(S))**

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

Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero, por lo que se toma al ΔV(S) como incógnita en la ecuación de balance.

### Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar el cambio de almacenamiento  $\Delta V(S)$ , mediante la expresión 3, mostrada a continuación:

$$\begin{aligned} R_v + R_i + E_h - B &= \pm \Delta V(S) \quad (3) \\ 12.3 + 1.5 + 22.7 - 7.7 &= \pm \Delta V(S) \\ \Delta V(S) &= 28.8 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

La recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 12.3 + 22.7 + 1.5 \\ R &= 36.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

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 **36.5 hm<sup>3</sup>/año**, todos ellos son de recarga natural.

## **8.2 Descarga natural comprometida (DNC)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero San Diego de Alejandría, no se consideró la descarga natural comprometida. por lo que **DNC = 0.0**.

## **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 **46,106,796 m<sup>3</sup> 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 36.5 - 0.0 - 46.106796 \\ \text{DMA} &= -9.606796 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **9,606,796 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**