**Comisión Nacional del Agua**
**Subdirección General Técnica**
**Gerencia de Aguas Subterráneas**
**Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos**

# *DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO 0807 EL SAUZ-ENCINILLAS, ESTADO DE CHIHUAHUA*

***México, D.F. Mayo de 2010***

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 ..... 7
3.1 Provincia fisiográfica ..... 7
3.2 Clima ..... 8
3.3 Hidrografía ..... 8
3.4 Geomorfología ..... 9
4. GEOLOGÍA ..... 9
4.1 Estratigrafía ..... 10
4.2 Geología estructural ..... 14
4.3 Geología del subsuelo ..... 15
5. HIDROGEOLOGÍA ..... 16
5.1 Tipo de acuífero ..... 16
5.2 Parámetros hidráulicos ..... 16
5.3 Piezometría ..... 16
5.4 Comportamiento hidráulico ..... 16
5.4.1 Profundidad al nivel estático ..... 16
5.4.2 Elevación del nivel estático ..... 19
5.4.3 Evolución del nivel estático ..... 21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea ..... 22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA ..... 22
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRANEAS ..... 23
7.1 Entradas ..... 23
7.1.1 Recarga vertical (Rv) ..... 24
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) ..... 24
7.1.3 Retornos de riego (Rr) ..... 26
7.2 Salidas ..... 27
7.2.1 Bombeo (B) ..... 27
7.2.2 Evapotranspiración (ETR) ..... 27
7.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta$VS) ..... 28
8. DISPONIBILIDAD ..... 30
8.1 Recarga total media anual (Rt) ..... 30
8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM) ..... 30
8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS) ..... 30
8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS) ..... 31
9. BIBLIOGRAFIA ..... 32

# 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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 El Sauz-Encinillas, definido con la clave 0807 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción central del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28°53'31” a 29°39'41” de latitud norte y los meridianos 106º09’35” a 106°43´27” de longitud oeste, cubriendo una superficie de 2743 km$^2$.

Colinda al norte con los acuíferos Laguna de Tarabillas y Flores Magón-Villa Ahumada, al este con Laguna de Hormigas y Laguna El Diablo, al sur con Chihuahua Sacramento y Alto Río San Pedro y al oeste con Santa Clara y Cuauhtémoc, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua (figura1).

Geopolíticamente se ubica parcialmente en los municipios de Chihuahua y Namiquipa, y comprende pequeñas porciones de los municipios de Aldama y Buenaventura.

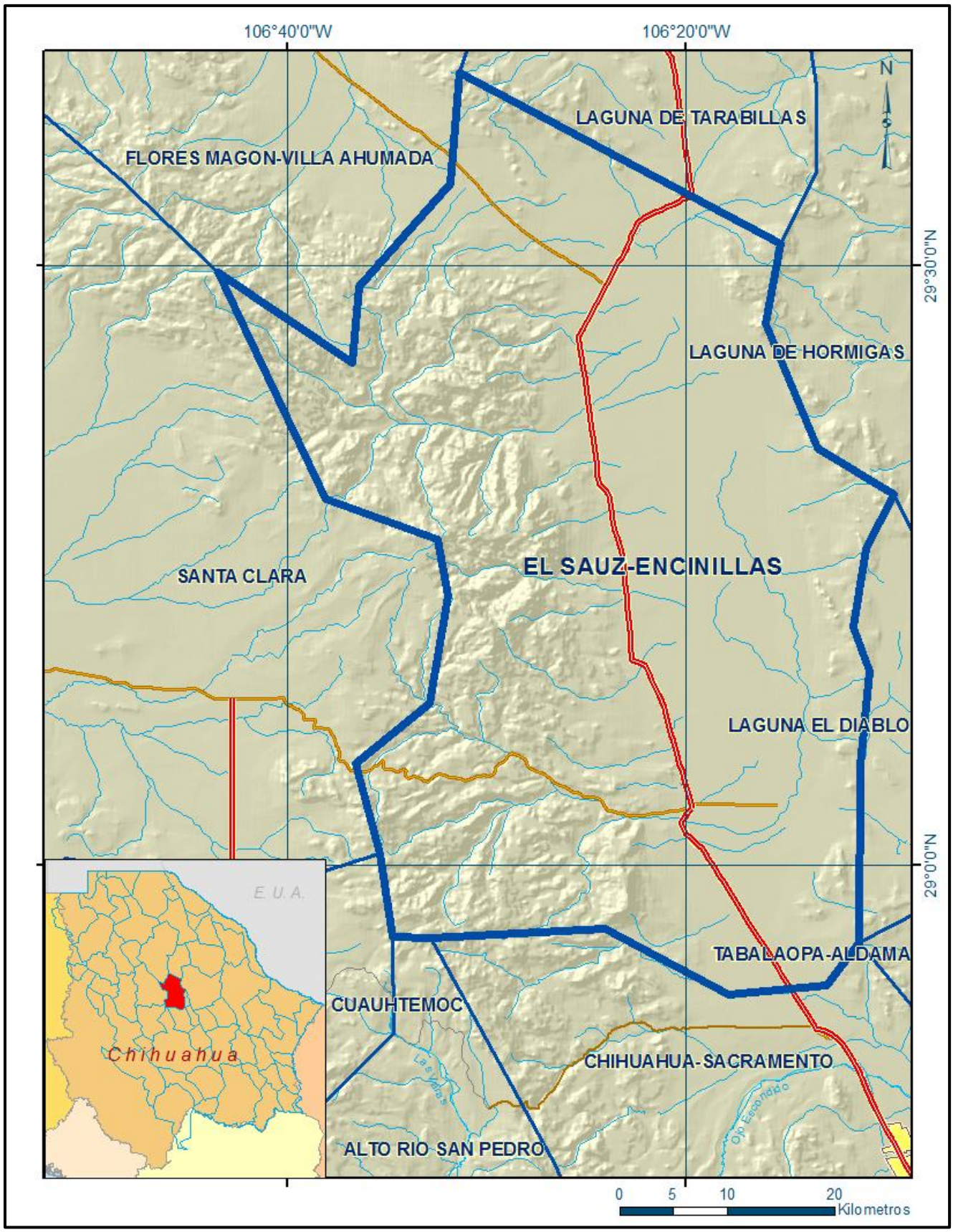



Figura 1 Localización del acuífero El Sauz - Encinillas

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 0807 EL SAUZ-ENCINILLAS | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS |
| 1 | 106 | 31 | 20.6 | 29 | 39 | 41.5 |
| 2 | 106 | 15 | 15.3 | 29 | 31 | 7.5 |
| 3 | 106 | 15 | 59.8 | 29 | 27 | 6.9 |
| 4 | 106 | 13 | 24.6 | 29 | 20 | 54.1 |
| 5 | 106 | 9 | 34.6 | 29 | 18 | 32.4 |
| 6 | 106 | 10 | 57.4 | 29 | 15 | 49.8 |
| 7 | 106 | 11 | 35.2 | 29 | 11 | 53.2 |
| 8 | 106 | 10 | 47.4 | 29 | 9 | 42.7 |
| 9 | 106 | 11 | 15.1 | 29 | 4 | 56.6 |
| 10 | 106 | 11 | 17.5 | 28 | 56 | 7.4 |
| 11 | 106 | 12 | 54.9 | 28 | 53 | 56.1 |
| 12 | 106 | 17 | 51.1 | 28 | 53 | 31.1 |
| 13 | 106 | 24 | 2.8 | 28 | 56 | 46.0 |
| 14 | 106 | 32 | 48.5 | 28 | 56 | 19.5 |
| 15 | 106 | 34 | 42.0 | 28 | 56 | 22.2 |
| 16 | 106 | 35 | 19.3 | 29 | 0 | 32.4 |
| 17 | 106 | 36 | 31.8 | 29 | 5 | 3.9 |
| 18 | 106 | 32 | 49.1 | 29 | 8 | 3.9 |
| 19 | 106 | 31 | 55.5 | 29 | 13 | 27.9 |
| 20 | 106 | 32 | 26.6 | 29 | 16 | 19.6 |
| 21 | 106 | 38 | 3.4 | 29 | 18 | 20.2 |
| 22 | 106 | 43 | 26.8 | 29 | 29 | 40.5 |
| 23 | 106 | 36 | 42.8 | 29 | 25 | 10.4 |
| 24 | 106 | 36 | 22.3 | 29 | 28 | 57.6 |
| 25 | 106 | 31 | 46.7 | 29 | 34 | 8.0 |
| 1 | 106 | 31 | 20.6 | 29 | 39 | 41.5 |

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Sauz Encinillas pertenece al Organismo de Cuenca “Río Bravo” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua. Casi el total de su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “*Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona conocida como Cuenca del Sauz y Encinillas, ubicados en el Municipio de Chihuahua, Chih.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 12 enero de 1978. Esta veda es tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Una pequeña porción del extremo noroccidental de su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del "*Acuerdo por el que se establece el Distrito de Riego de El Carmen, en San Buenaventura y Villa Aldama y declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos para alojarlas y operarlas"*, publicado en el DOF el 30 de enero de 1957. Esta veda es tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De igual manera, en una pequeña porción de los extremos sur y oriental, que representa aproximadamente el 5% del área que ocupa el acuífero, no rige ningún decreto de veda.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2010, los municipios Chihuahua y Aldama, se clasifican como zona de disponibilidad 3, Buenaventura como zona de disponibilidad 5 y Namiquipa como zona de disponibilidad 6. El usuario principal es el agrícola. No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se ha llevado a cabo diversos estudios geohidrológicos de evaluación. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE LOS VALLES DEL SAUZ Y TABALAOPA, CHIHUAHUA, PARA PROPORCIONAR AGUA EN BLOQUE A LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, CHIH., elaborado por la empresa PROYESCO S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1980.** Con base en la interpretación de 33 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) recomienda sitios favorables para la extracción de agua subterránea, a profundidades someras que varían de 3 a 18 m, hasta los 200, 280 y 350 m. Concluye que de los sitios sondeados, solamente doce puntos detectan áreas favorables para la explotación del agua subterránea.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CUANTITATIVO DE LA ZONA DE EL SAUZ PARA PROPORCIONAR AGUA EN BLOQUE A LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, CHIH., elaborado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua, en 1985.** Mediante actividades de campo que incluyeron censo, piezometría, nivelación de brocales sondeos eléctricos verticales (40) y pruebas de bombeo (20), plantea al balance de aguas subterráneas. Así mismo, se tomaron 101 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente. Con toda esta información generada se describen las características y comportamiento hidrodinámico.

**ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA NORTE DEL VALLE DEL SAUZ, PARA DELIMITAR LAS ÁREAS DE EXPLOTACIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA Y ETAPAS**

**SUCESIVAS, PARA SUMINISTRAR DE AGUA A LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, CHIH., elaborado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1988**. Comprendió actividades de campo como la actualización del censo de aprovechamientos realizado en 1985 en la porción central del acuífero, realización de pruebas de bombeo (5), muestreo y análisis del agua subterránea (15); con la información generada se plateó el balance de aguas subterráneas y se precisó el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero.

**SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO DE EL SAUZ – ENCINILLAS, CHIHUAHUA, elaborado por la empresa. IEPSA, S.A. DE C.V., para la Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, en 1996.** Este estudio comprendió la mayor parte del acuífero El Sauz-Encinillas, dentro del cual se realizaron las siguientes actividades: Verificación y Actualización del Censo de 1985-1988, pruebas de bombeo (5), muestreo y análisis de agua subterránea (20), balance de aguas subterráneas y modelo de simulación hidrodinámica.

**REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: CASAS GRANDES, CUAUHTÉMOC, EL SAUZ-ENCINILLAS Y ASCENSIÓN, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por la empresa TEGMIN S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 1998.** Concluye que el acuífero es de tipo libre, presenta permeabilidad media y está compuesto por depósitos aluviales y conglomerados, constituidos con fragmentos que varían de bloques hasta arcillas. Con la configuración de evolución del nivel estático de enero de 1986 a diciembre de 1998 identifica abatimientos fuertes que se presentan en la porción sur, donde se encuentra la batería de pozos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) de Chihuahua. La dirección preferencial de flujo subterráneo es de oeste a este, con desvío a la Laguna de Encinillas. De acuerdo con los resultados del estudio, la red piezométrica del acuífero Sauz-Encinillas, se compone de 36 pozos piloto y de 7 pozos piezométricos.

**DIAGNÓSTICO, MODELACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE SECTORES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE CHIHUAHUA, CHIHUAHUA, elaborado por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en 2008.** Este estudio está enfocado a la cobertura de agua potable en la ciudad de Chihuahua que es del 93.8% y las acciones para mantenerlo e incrementarlo. Describe las fuentes de abastecimiento al sistema de agua potable de la ciudad de Chihuahua señalando que desde el año de 1968 se comenzó a ampliar la infraestructura hidráulica con la incorporación de nuevas conducciones de agua, es en este año cuando inicia el funcionamiento de la batería de pozos y la conducción de Ojos de Chuvíscar y Panamericana. En 1977comienza a funcionar la conducción de Sacramentos Viejos y en 1980 entran en marcha las conducciones de Sacramento Norte y Tabalaopa Aldama. Para 1985, se instalan la conducción de Tabalaopa Nombre de Dios y en el año de 1896 la conducción de El Sauz Etapa I. Diez años después, en 1996 la Conducción El Sauz Etapa II y por último en el año 2004 se incorpora la batería de pozos y conducción Puerta de Chihuahua.

**ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LAS PALMAS, PALOMAS-GUADALUPE-VICTORIA, LOS MOSCOS, JOSEFA ORTIZ DE DOMÍNGUEZ, EL SAUZ-ENCINILLAS, LAGUNA EL DIABLO, LAGUNA LA VIEJA, Y CHIHUAHUA-SACRAMENTO, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, para la Comisión Nacional del Agua, en 2009.** Este estudio tuvo como objetivos generales el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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

# 3. FISIOGRAFÍA

## 3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero El Sauz - Encinillas se ubica en un amplio valle longitudinal limitado al oeste por la sierra Majalca-El Nido-Paporín y al este por la sierra Peña Blanca, las que a su vez se encuentran fisiográficamente situadas en la provincia Cuencas y Sierras (Raisz, E., 1964), que es la prolongación al sur de la provincia que en Estados Unidos de América se denomina “Basin and Range”.

El acuífero prácticamente se encuentra en la zona de transición (hacia el oeste) con la provincia de la Sierra Madre Occidental. De tal manera que posee rasgos fisiográficos inherentes a estas dos provincias. Hawley en 1969, designa a esta porción de la provincia como “Subsección de Los Bolsones” por la abundancia de extensas llanuras con una suave pendiente que converge hacia una zona central con drenaje endorreico, conocidas en la región como bolsones, caracterizados por la presencia de suelos arcillosos salinos, denominados localmente como “barreales”, debido a zonas lagunares sometidas a una intensa evaporación. Las amplias llanuras, están limitadas normalmente por delgadas unidades serranas de gran longitud, que emergen de manera brusca como islas sobre la llanura y poseen una orientación aproximada NNO-SSE. Son frecuentes los depósitos eólicos en forma de dunas o médanos que le imprimen al paisaje la particularidad fisiográfica, principalmente en la porción noroeste y este de la provincia Cuencas y Sierras.

El área del Sauz – Encinillas, de acuerdo con Hawley, se ubica casi en el límite con la “Subsección Babícora–Bustillos”; lo cual se refleja en los rasgos fisiográficos de ambas subsecciones. Predominan

los valles intermontanos elongados y estrechos que normalmente presentan zonas lagunares o lacustres.

## 3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación hecha por Köppen, adaptada por E. García para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la zona presenta tres subtipos climatológicos:

1. **$BS_1$k"w**: Clima semiseco templado que presenta lluvias en verano con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2mm.
2. **BSokw** Clima árido, templado, temperatura entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C y lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.
3. **$BS_1$kw** Clima semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C; con lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.

Para el análisis se utilizó la información de las estaciones climatológicas Gallegos, Majalca, San Antonio, Parrita y Presa Chihuahua, que cuentan un con periodo de análisis de 1961 a 1999.

Con base en el análisis de los registros de estas estaciones climatológicas, se determinó que la precipitación media anual es de 474 mm. La temperatura media anual es de 14.8° C y presenta una variación con tendencia parabólica, que se manifiesta con mayor intensidad durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, decreciendo durante el resto del año. Los valores menores registrados corresponden a los meses de diciembre, enero y febrero. En cuanto a la evaporación potencial, su valor es del orden de 1675 mm/año.

## 3.3 Hidrografía

El acuífero del Sauz-Encinillas se ubica dentro de la Región Hidrológica 34 "Cuencas Cerradas del Norte" (Casas Grandes), en la subcuenca Laguna de Encinillas, cuenca Arroyo El Carrizo y Otros. El área del acuífero se distingue como una cuenca hidrográfica de forma elongada, con eje mayor de rumbo N-S de tipo endorreico en cuya margen norte y central se encuentra la laguna de Encinillas, cuya zona de inundación se extiende ocasionalmente varios kilómetros hacia el sur de la estadía normal de inundación de la laguna.

Debido a las condiciones climáticas y a la sedimentología del valle, en el área no se encuentran corrientes fluviales de importancia. Sin embargo se distinguen dos corrientes de relativa importancia, la que ocurre en el Cañón de Santa Clara y la que fluye en el Cañón de Bellavista; las demás corrientes son sólo intermitentes que solo conducen agua en época de lluvias.

La cuenca Arroyo El Carrizo y Otros se encuentra en su totalidad en el noreste de la Entidad; al norte limita con la cuenca Río Bravo-Cd. Juárez, al este con la cuenca Río Conchos-Ojinaga, al sur con la cuenca Río Conchos-Presa El Granero, pertenecientes a la Región Hidrológica 24; al oeste con la cuenca Río del Carmen y al suroeste con una pequeña parte de la cuenca Laguna Bustillos y de los Mexicanos, ambas de la Región Hidrológica 34.

La pendiente general en la parte alta de la cuenca es media, mientras que en la porción inferior es baja. El sistema orográfico que configura esta cuenca forma subcuencas cerradas que originan vasos de tipo lacustre aluvial muy azolvados y por tanto en avanzado proceso de extinción. La Laguna Encinillas es la más importante y es considerada perenne. Las corrientes principales que la alimentan son los arroyos Los Prietos, Las Playas, La Campana, El Sauz y El Potrero.

### 3.4 Geomorfología

El acuífero está limitado al oeste por una importante unidad montañosa de gran longitud y altitud, conocida como Sierra Majalca-El Nido-Paporín, con elevaciones máximas de 2700 msnm (cerro La Campana, a la salida del cañón de Santa Clara) y una diferencia de elevación con respecto al valle de aproximadamente 1200m. El valle intermontano Santa Clara se ubica directamente al oeste del valle El Sauz – Encinillas, a una elevación promedio de 2000 msnm.

Los cambios bruscos de altitud entre los valles mencionados se deben a la presencia de grandes fallas normales que afectan a la región y que sobresalen en el valle como pilares tectónicos que dan lugar a la sierra Majalca-El Nido-Paporín como límite occidental del Valle, que muestra un frente oriental sumamente escarpado y abrupto; el límite oriental está formado por otro pilar tectónico que conforma la sierra Peña Blanca. Ambas unidades orográficas se desarrollan en una potente secuencia de tobas e ignimbritas riolíticas dispuestas en forma aproximadamente horizontal; por ello, el relieve en su mayor parte es escalonado debido a la erosión diferencial, sin embargo en algunos lugares, como en la sierra El Sauz, el relieve se desarrolla sobre rocas calcáreas cretácicas.

A la salida de los arroyos que descienden de las sierras antes mencionadas, sobre todo de la sierra Majalca-El Nido-Paporín, se forman numerosos abanicos aluviales, que en ocasiones se unen en una morfología dominante en bajadas compuestas por sedimentos granulares, desde gravas hasta limos y arcilla.

## 4. GEOLOGÍA

En la sierra Majalca-El Nido-Paporín aflora una potente sección de rocas volcánicas terciarias, compuestas por tobas, domos y flujos ignimbríticos riolíticos con textura variable, debido a los diferentes grados de soldamiento de las unidades. En el cerro La Campana se pueden observar más de 1000 m de espesor de esta sección volcánica. Entre el cañón de Santa Clara y el cañón de

Bellavista, están expuestas rocas basálticas del Paleógeno-Neógeno que se encuentran hacia la porción superior de la secuencia volcánica, sin embargo, rocas andesíticas eocénicas aforan en la parte baja de la sección; esto es, casi al norte de la salida del cañón de Santa Clara. En lo que se refiere al límite oriental del valle, la sierra Peña Blanca presenta una secuencia volcánica similar; pero ligeramente variable en algunos aspectos, tanto en litología como en edad y espesor. La secuencia volcánica descansa discordantemente sobre calizas cretácicas. En la figura 2 se muestra la distribución de las distintas litologías.

## 4.1 Estratigrafía

El registro estratigráfico de la región abarca del Mesozoico al Reciente. Las unidades se describen a continuación de la más antigua a la más reciente:

***Mesozoico. Cretácico Inferior***

***Rocas Sedimentarias***

Las rocas sedimentarias marinas calcáreo-arcillosas que afloran en el acuífero son del Cretácico Inferior, representando casi todo el Albiano Medio, desde la Formación Aurora hasta la Formación Kiamichi. Sin embargo, una secuencia conglomerática continental Cretácico Superior-Paleoceno se encuentra expuesta en la porción nororiental del acuífero.

En el acuífero la secuencia calcárea marina del Cretácico Inferior, está compuesta principalmente por la Formación Aurora (KiaCz2), expuesta en el distrito minero de Terrazas, justamente en la sierra El Sauz, así como al oeste de la misma, en la localidad Punta de Agua (Cuauhtémoc). En ambas localidades las calizas están afectadas localmente por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos y pórfidos riolíticos, presentando áreas de metamorfismo de contacto, evidenciados por la presencia de mármol y skarns.

La sierra El Sauz constituye prácticamente un afloramiento aislado dentro del entorno volcánico, presenta una orientación casi N-S, en la que se aprecia una gruesa sección de la Formación Aurora dispuesta en estratos gruesos a masivos buzantes al oeste, salvo en la porción norte de la sierra donde localmente se observa un buzamiento al sur, provocado al parecer por fallamiento. Otra localidad importante como afloramiento de la Formación Aurora, se encuentra casi en la salida del cañón de Cumbres de Majalca, en la zona mineralizada de Punta de Agua (Cuauhtémoc), que consiste en una intensa marmorización de las calizas, las cuales además muestran deformación estructural.

Por otra parte, las rocas sedimentarias calcáreo-lutíticas del Albiano Medio, que estratigráficamente sobreyacen a la Formación Aurora, afloran restringidamente en la porción norte de la sierra Peña Blanca, justo al sureste de la laguna de Encinillas constituyendo pequeñas elevaciones topográficas formadas por el cerro EL Venado (Burrola), que resalta sobre el terreno como un “banco”, pues está

compuesto por la Formación Edwards (KaCz3), que consiste de estratos gruesos a masivos de carácter arrecifal, más resistentes a la erosión que las rocas que lo rodean y que tienen un mayor contenido arcilloso, como son las formaciones Walnut (KaLu-Cz1) y Kiamichi (KaLu-Cz2). Estas unidades litoestratigráficas forman parte de la vertiente oriental de la sierra Peña Blanca, ya que la cabecera de la cuenca de la Laguna del Cuervo (Hormigas) casi penetra en la cuenca de la Laguna de Encinillas, al hallarse esta última a una altitud mayor: unos 300 m sobre la primera. Las unidades calcáreas albianas expuestas en el cerro El Venado se encuentran intensamente plegadas en estructuras de rumbo general NNO-SSE, sobre todo aquellas con contenido arcilloso mayor.

***Cretácico Superior***

***Rocas Volcánicas y Vulcanoclásticas***

En la porción suroeste del acuífero, justo al NE de Punta de Agua (Cuauhtémoc) y en la cabecera occidental del cañón de Majalca está expuesto un potente espesor de andesitas, tobas andesíticas, brechas e ignimbritas (KsA-R), correspondientes al Grupo Volcánico Cañón Majalca (Mauger, 1979). Sobreyaciendo la unidad litológica anterior, se encuentra una potente secuencia compuesta por lahares, andesitas basálticas intercaladas ocasionalmente con areniscas conglomeráticas (KsA) que afloran claramente en el cauce del arroyo, entre los ranchos Peñas Azules y Quintas, a la cual Spruill en 1976 denomina Grupo Peñas Azules (68Ma). Al norte del rancho Peñas Azules se observan un afloramiento restringido de estas rocas que sobresale en el terreno como una cuesta (“hog back”) con un echado moderado con claro buzamiento hacia el este. Esta unidad también aflora en una serie de lomas bajas al noroeste de la localidad Punta de Agua, hacia el faldeo bajo del escarpe oriental del cerro Ranchería.

Por otra parte, en el extremo norte de la sierra Peña Blanca, entre los ranchos El Venado y Carneros, aflora una sección volcánica-sedimentaria compuesta por tobas, ignimbritas y conglomerados intercalados; similar a la que se localiza en la porción central del flanco oriental de la sierra Peña Blanca, al oeste de la laguna del Cuervo (Hormigas) denominada Formación Cuervo; presenta igualmente una fuerte deformación tectónica. Se le asigna una edad Cretácico Superior-Paleoceno (Díaz V. G. y Morales R. M., 1969).Sin embargo al oeste de estos afloramientos se encuentran sedimentos conglomeráticos, calcáreos principalmente, que constituyen la base de la secuencia volcánica terciaria expuesta en el distrito uranífero de Peña Blanca. Por ello, se considera correlacionable con el Conglomerado Pozos, de edad correspondiente al final del Cretácico y principios del Paleoceno.

***Paleógeno***

***Rocas Volcánicas***

Estas rocas volcánicas afloran en la mayor parte del acuífero, tanto en la sierra Majalca-El Nido-Paporín, constituyendo una potente secuencia compuesta por ignimbritas riolíticas, tobas, andesitas y en menor proporción basaltos, con frecuentes intercalaciones de depósitos conglomeráticos y vulcanoclásticos.

***Paleoceno***

Está representado por rocas andesíticas (TpaA) que se encuentran al sureste del distrito minero de Terrazas aflorando hacia la base de cerros que muestran cierto escalonamiento, con un escarpe en su flanco occidental, debido a una serie de fallas normales paralelas de rumbo NNO-SSE. La secuencia muestra pseudoestratificación con ligera inclinación hacia el noreste.

***Eoceno***

La secuencia volcánica eocénica se encuentra ampliamente representada sobre todo hacia el noreste de la población de Sacramento y en la porción central y norte de la sierra Peña Blanca (localmente Sierra El Oso), así como también en el cañón de Santa Clara y al noreste del mismo. Dentro de esta secuencia se agrupan las unidades: (TeR1,TeTR-Ig), (TeA-B), (TeA2), (TeR2=TeR). Las unidades TeR1 y TeTR-Ig son equivalentes en edad y se interdigitan una con la otra. Está conformada en general por una potente sección que está bien expuesta en la sierra Peña Blanca y que agrupa a las formaciones: Coloradas (ignimbritas), Nopal (ignimbritas), Piloncillos (areniscas y conglomerados), Escuadra (ignimbritas), Chontes (conglomerados), Peña Blanca (tobas arenosas) y Mesa (ignimbritas). La mayor parte de ellas se encuentran aflorando en el acuífero vecino al oeste Laguna del Diablo.

Sobreyaciendo la secuencia anterior, se encuentran excelentes afloramientos de una secuencia andesítica (TeA-B, TeA2) que aflora prácticamente en el fondo de los cañones de Santa Clara y Bella Vista, casi a todo lo largo de los cauces que comprenden la cuenca baja, principalmente al norte del primer cañón citado hasta la localidad de Providencia, localizada en el límite noroeste del acuífero y formando parte de la cuenca hidrográfica que desciende de la sierra La Tinaja Lisa y drena hacia la laguna de Encinillas. En esta zona, la secuencia se halla afectada por una serie de fallas normales casi paralelas a la sierra (NNO-SSE).

***Oligoceno***

Comprende la secuencia de ignimbritas riolíticas con diferentes grados de soldamiento y texturas variables, tobas riolíticas, vitrófiros basales, domos riolíticos, brechas volcánicas y depósitos vulcanoclásticos intercalados, cuyo espesor alcanza 1000m conformando, el cuerpo principal de la sierra Majalca-El Nido-Paporín. Normalmente la secuencia presenta una disposición horizontal y debido a la diferente dureza y textura de las unidades, responde diferencialmente a la erosión, creando una morfología escalonada, con escarpes hacia el E. Hacia la cima de la secuencia ToTR-Ig se presentan afloramientos restringidos de flujos basálticos (ToB), sobre todo hacia la porción NE del acuífero; en lo alto de la sierra Paporín (Mesa Las Varas), constituyendo un pequeño “graben”, en el límite NE de la cuenca hidrográfica de la Laguna de Encinillas (ver sección geológica CD). Otras localidades donde están expuestos basaltos se ubican en lo alto de la cabecera del cañón de Bellavista y sobre la carretera que conduce a la población de Namiquipa. En ambos sitios se cortan excelentes afloramientos de la secuencia volcánica, desde las andesitas (TeA-B) hasta los basaltos más recientes (ToB).

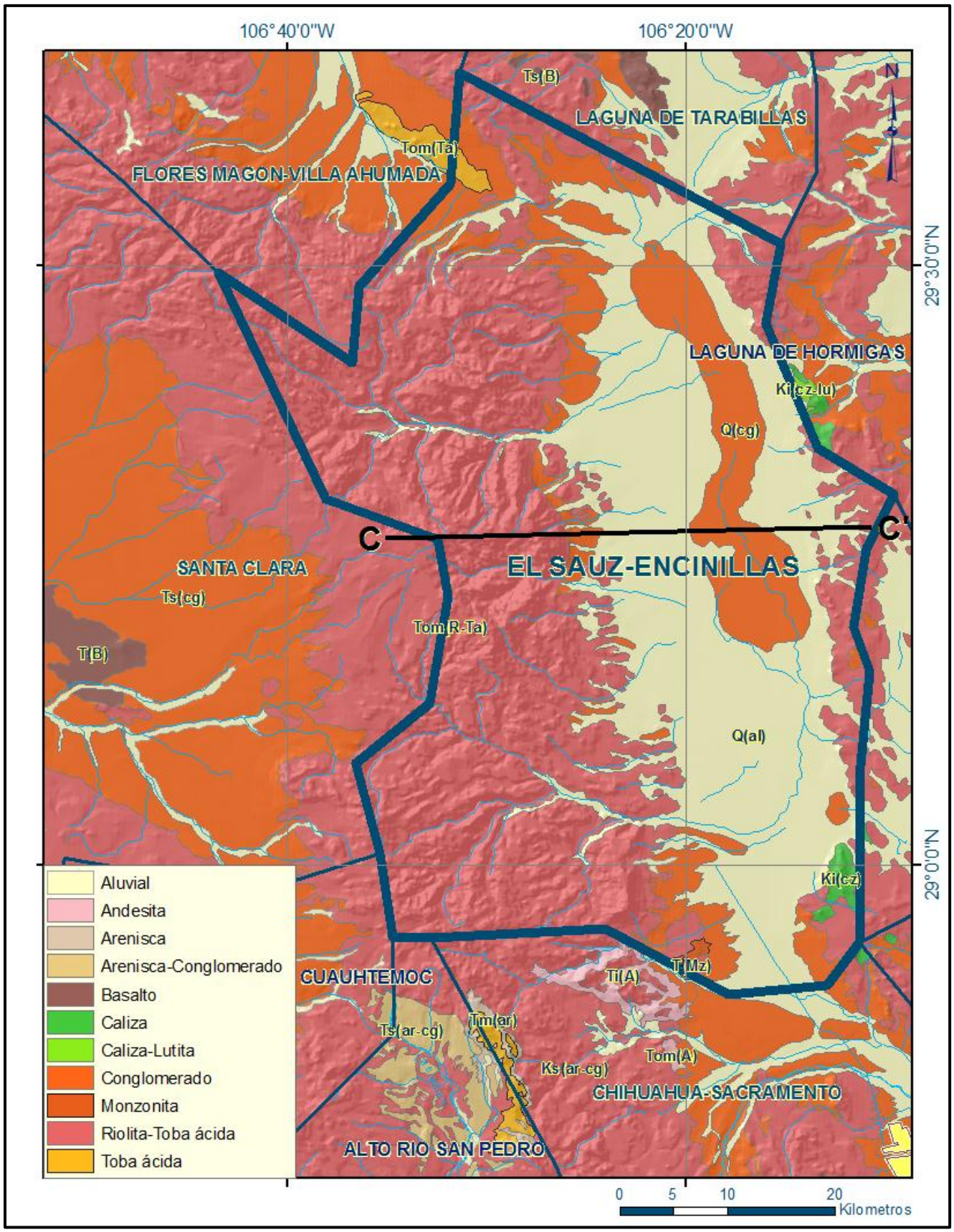



Figura 2. Geología del acuífero El Sauz – Encinillas

***Paleoceno***

***Rocas Ígneas Intrusivas***

Las rocas ígneas intrusivas afloran principalmente en la localidad Punta de Agua, casi a la entrada del cañón de Cumbres de Majalca, donde se encuentran calizas marmorizadas por el emplazamiento de un intrusivo cuarzomonzonítico (TpaqMz). Sin embargo, un evento subvolcánico, de rasgos intrusivos tiene lugar en la región mineralizada de Estación Terrazas, al emplazarse un domo volcánico, compuesto por un pórfido riolítico (TpaPR), que afecta a las calizas cretácicas.

***Eoceno***

En la porción noroccidental del acuífero, justo en la división con la cuenca de Flores Magón; están expuestos intrusivos granodioríticos (TGr) en el extremo norte de la sierra Paporín, limitados al NE por una falla normal; así como pórfidos traquíticos (TPTq), estos últimos están expuestos en el flanco suroeste de la sierra La Tinaja Lisa, formando parte de un "horst" de rumbo NNO-SSE, en cuya porción sur, dentro de la cuenca de Encinillas, se encuentra la zona mineralizada de Providencia.

***Oligoceno***

Intrusivos de naturaleza granodiorítica, se localizan en pequeñas áreas de la región mineralizada de Estación Terrazas, que transformaron en skarn granatíferos a las calizas cretácicas.

***Cuaternario***

***Rocas Sedimentarias***

Los productos de la erosión de las sierras que limitan los valles originaron potentes depósitos de sedimentos clásticos no consolidados compuestos por una granulometría variable (Qal) desde gravas hasta arcillas, de acuerdo con la facies sedimentaria fluvial en el momento del depósito. Hacia las zonas centrales de los valles predominan los sedimentos de grano fino limo arenosos, con alto contenido de arcillas y material evaporítico; sin embargo, hacia las márgenes de las sierras se localizan numerosos abanicos aluviales (QptCgp) compuestos fundamentalmente por conglomerados no consolidados.

## 4.2 Geología estructural

Al considerar de una manera regional las estructuras observadas en el acuífero, destaca el efecto importante que tuvieron los eventos tectónicos ocurridos a fines del Cretácico y principios del Paleógeno, cuando tuvo lugar el esfuerzo máximo compresivo laramídico que levanta y pliega toda la secuencia sedimentaria preexistente, provocando cabalgamientos y fallamientos de tipo inverso. Al término de los esfuerzos compresionales, durante el Oligoceno-Mioceno, ocurrió un evento de distensión tectónica importante, que causó un basculamiento notable de la sección volcánica por medio de un sistema de fallas normales, de amplia distribución y extensión, que dio lugar a la formación de fosas y pilares tectónicos que constituyen las estructuras dominantes en el acuífero.

Esta es la característica principal de la provincia fisiográfica de Cuencas y Sierras. Por lo tanto, los rasgos estructurales dominantes en el acuífero son aquellos que fueron ocasionados principalmente por la formación de la provincia de Cuencas y Sierras, de acuerdo con el evento de distensión tectónica del Oligoceno – Mioceno. De esta manera, se observan rasgos geomórfico-estructurales de rumbo NNO-SSE, que se expresan como fallas normales y fracturas a partir de las cuales se generó un vulcanismo fisural importante (figura 3). Destacan sobre el valle de relleno aluvial los bloques tectónicos levantados que forman las sierras Majalca-El Nido-Paporín y Peña Blanca principalmente.

El último evento tectónico que afectó al área del acuífero y persiste actualmente, corresponde a la formación del “Rift del Río Grande”, provocando un vulcanismo de composición basáltica, asociado a fallamiento normal (Carta Geológica-Minera Buenaventura H13-7, CRM 1991. Escala: 1:250,000).

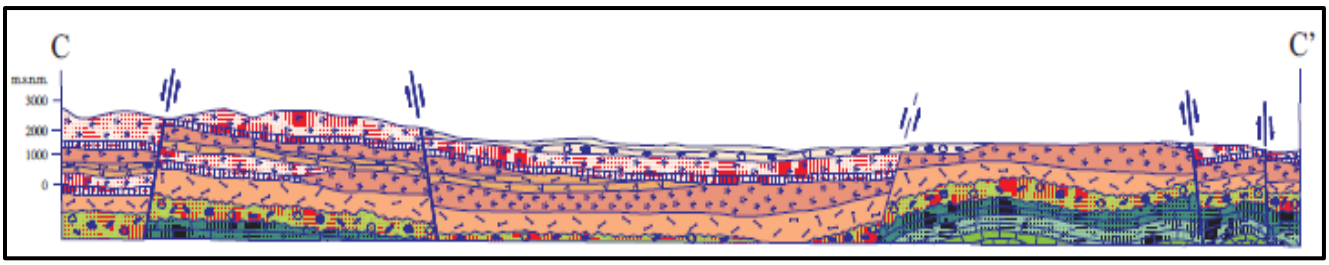



Figura 3. Sección geológica esquemática de la porción centro del acuífero
(Fuente: Carta Geológica-Minera “Buenaventura” H13-7, SGM 1998)

### 4.3 Geología del subsuelo

Para la interpretación de la geología del subsuelo, se tomó en cuenta los resultados de la sondeos electromagnéticos ejecutados como parte del estudio llevado a cabo en el año 2009, además de la información geológica de campo y de cortes litológicos obtenidos tanto es este acuíferos como en los adyacentes que se encuentran en un ambiente geológico semejante a nivel regional.

De manera general, se pude establecer que el acuífero se encuentra emplazado en una cuenca tectónica, cuyo espesor, de acuerdo con los sondeos geofísicos alcanza los 800 m en el centro del valle, constituidos por sedimentos clásticos aluviales de granulometría variable de acuerdo con las diferentes facies sedimentarias fluviales y lacustres que se desarrollaron durante la evolución del relleno sedimentario del valle. El espesor del relleno disminuye hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero. Este es la unidad que actualmente se explota, sin embrago existen pozos que han perforado las rocas volcánicas fracturadas, las cuales no han sido aún exploradas.

El basamento y las fronteras al flujo subterráneo del acuífero están constituidos por ignimbritas de composición riolítica compactas y la secuencia volcánica predominantemente andesítica. Estas unidades muestran en general baja permeabilidad en el subsuelo, pero cuando presentan fracturamiento constituyen zonas de recarga en superficie, ya que conforman las sierras que limitan al

valle. A mayor profundidad, las rocas calizas cretácicas conforman el basamento regional y presentan buena permeabilidad, ya que en los trabajos de mina ocasionan la inundación de las obras.

# 5. HIDROGEOLOGÍA

## 5.1 Tipo de acuífero

El sistema acuífero es heterogéneo y anisótropo, en general de **tipo libre**, con condiciones locales de semiconfinamiento, debido a la interdigitación de estratos de baja permeabilidad. Está alojado en una fosa tectónica (graben) rellenada por sedimentos de diferente granulometría cuyo espesor máximo alcanza los 800 m de sedimentos aluviales y disminuye hacia la laderas de las sierras limítrofes, donde se presentan los abanicos aluviales. A mayor profundidad las rocas volcánicas y calizas presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y constituyen otra unidad que no ha sido explorada, pero se tiene evidencia de ella en trabajos mineros, principalmente en acuíferos vecinos.

## 5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades desarrolladas en el estudio de 2009, se ejecutaron 8 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 4 a 12 horas como máximo. De su interpretación por diversos métodos, se deduce que los valores de transmisividad varían de 24 a 455 $m^2$/día (**0.3 a 5.3 x $10^{-3}$ $m^2$/s)**, con un promedio de 191 $m^2$/d ó **2.2 x $10^{-3}$ $m^2$/s**, que al considerar un valor de espesor saturado de 170 m se traduce en un valor promedio de conductividad hidráulica de 1.1 m/día (**1.3. x$10^{-5}$ m/s**).

En lo que respecta al coeficiente de almacenamiento *S*, para la zona central del valle el valor promedio es **7.1 x$10^{-4}$** y para el rendimiento específico *Sy* los valores varían de **0.06 a 0.21.**

## 5.3 Piezometría

Aunque existe información piezométrica dispersa en tiempo y espacio, no es precisa su correlación espacial. Sólo para los años2001 y 2009 se logró correlacionar las lecturas piezométricas en buena parte del acuífero.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2001, mostrada en la figura 4, los valores varían de 5 a 70 m, las más someras se registran en el extremo norte del acuífero, en torno de la laguna de Encinillas, aumentando gradualmente hacia la estribaciones de las

sierras que lo delimitan conforme se asciende topográficamente. Las mayores profundidades se presentan en los extremos noroeste y suroeste.

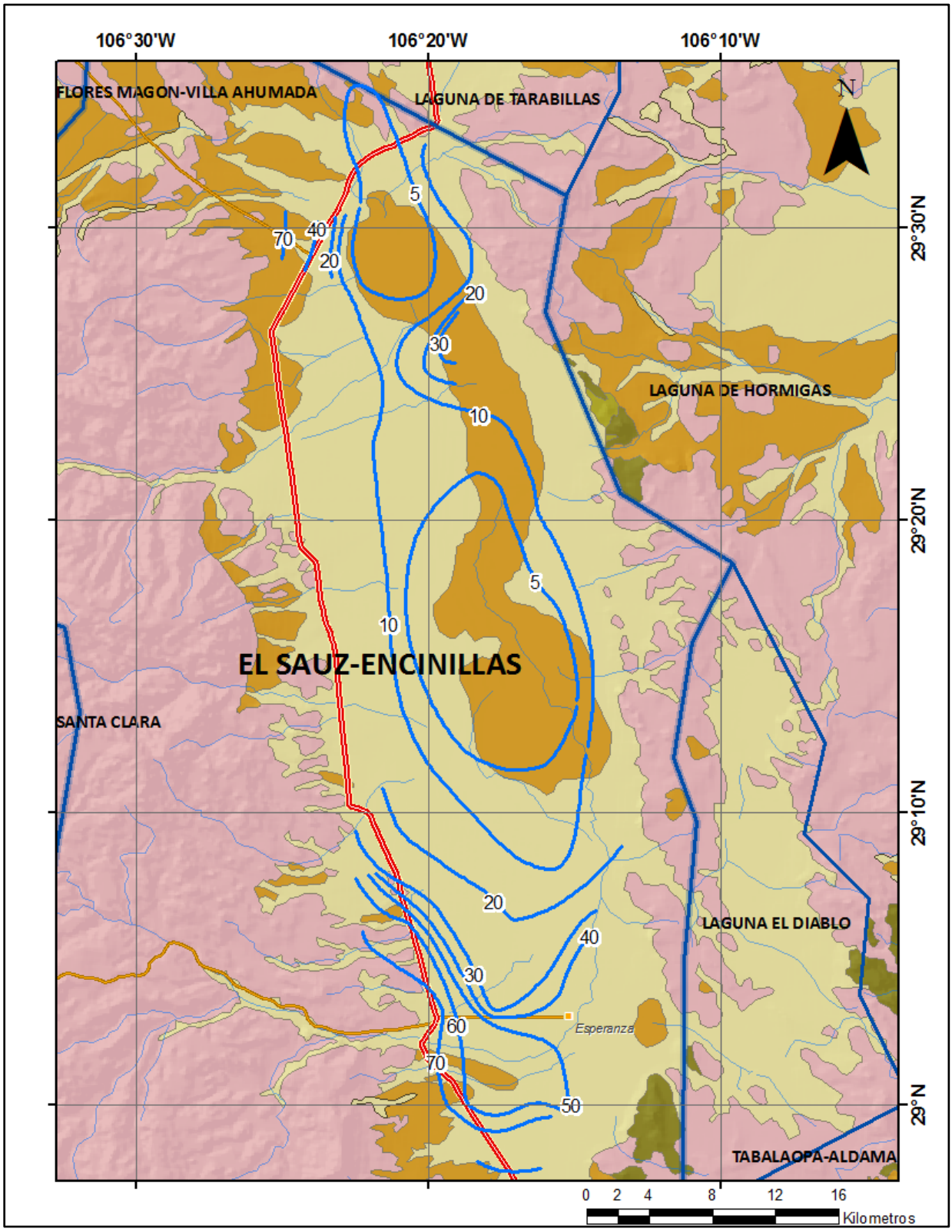



Figura 4. Profundidad al nivel estático en metros (2001)

Para el año 2009 los valores varían de 5 a 120 m (figura 5), los más someros se presentan en las inmediaciones de los poblados Encinillas y Ejido Nuevo Delicias (centro y norte del acuífero). Al sur varían entre 20 y 120 m, las mayores debido al efecto topográfico. En el extremo, donde se localizan los pozos que abastecen el acueducto El Sauz-Chihuahua, se registran profundidades de 10 a 80 m.

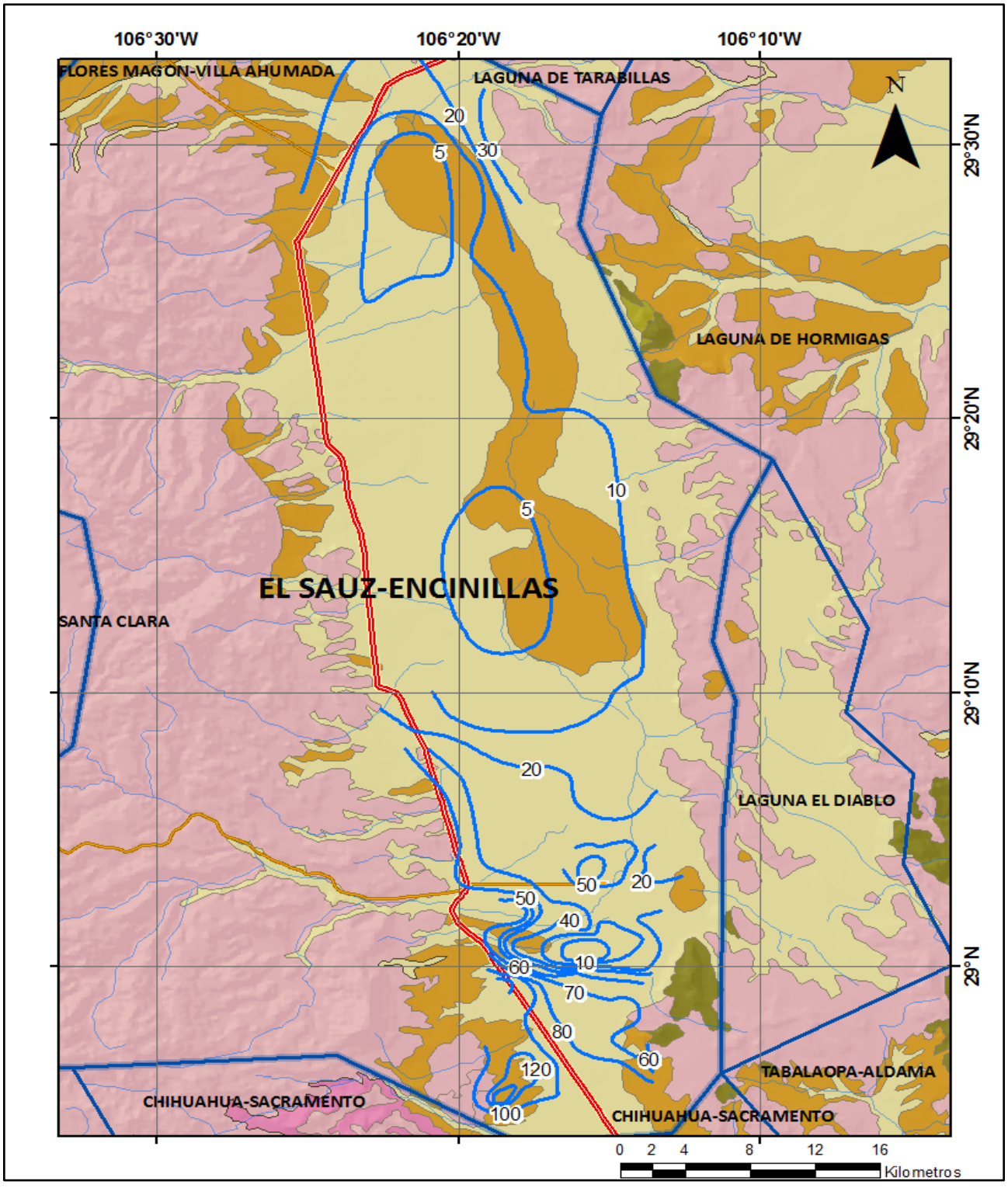



Figura 5. Profundidad al nivel estático (m) (2009)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático para el año 2001 (figura 6), se observa que los valores varían de 1510 a 1570 msnm, donde las elevaciones menores bordean a la laguna de Encinillas y partir de ellas se incremenatn gradualmente conforme se asciende hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el valle. De esta manera se muestra una red de flujo radial concéntrica hacia la laguna Encinillas y hacia el cono de abatimiento generado al sur del acuífero.

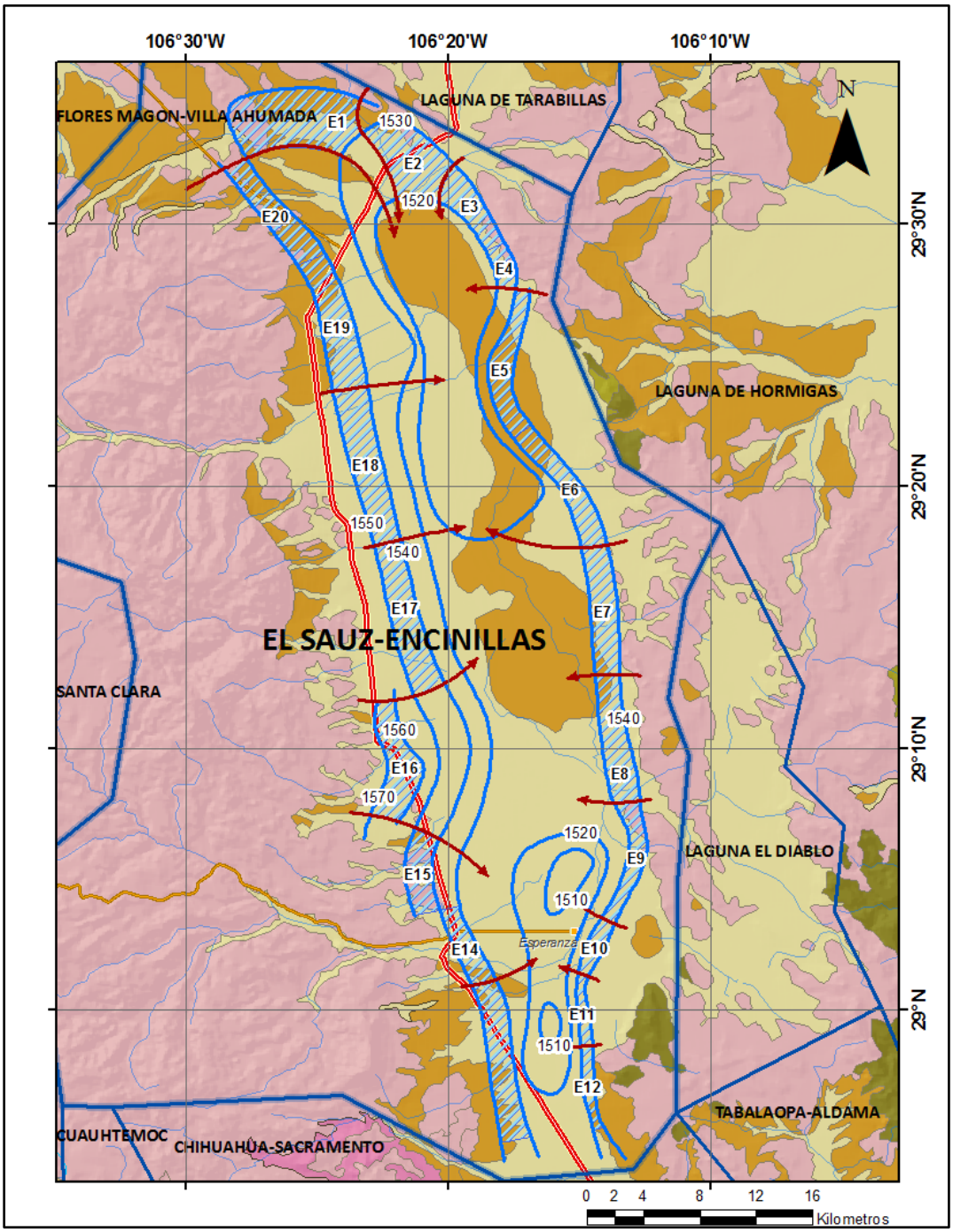



Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2001)

Para el año 2009 se observan elevaciones no muestran un cambio significativo en su valor ni en su disposición espacial, variando sus valores de 1515 hasta 1570 msnm (figura 7), conforme se asciende topográficamente desde el valle hacia las estribaciones de la sierras. En la porción sur, el cono de abatimiento se hace más evidente al extenderse su superficie.

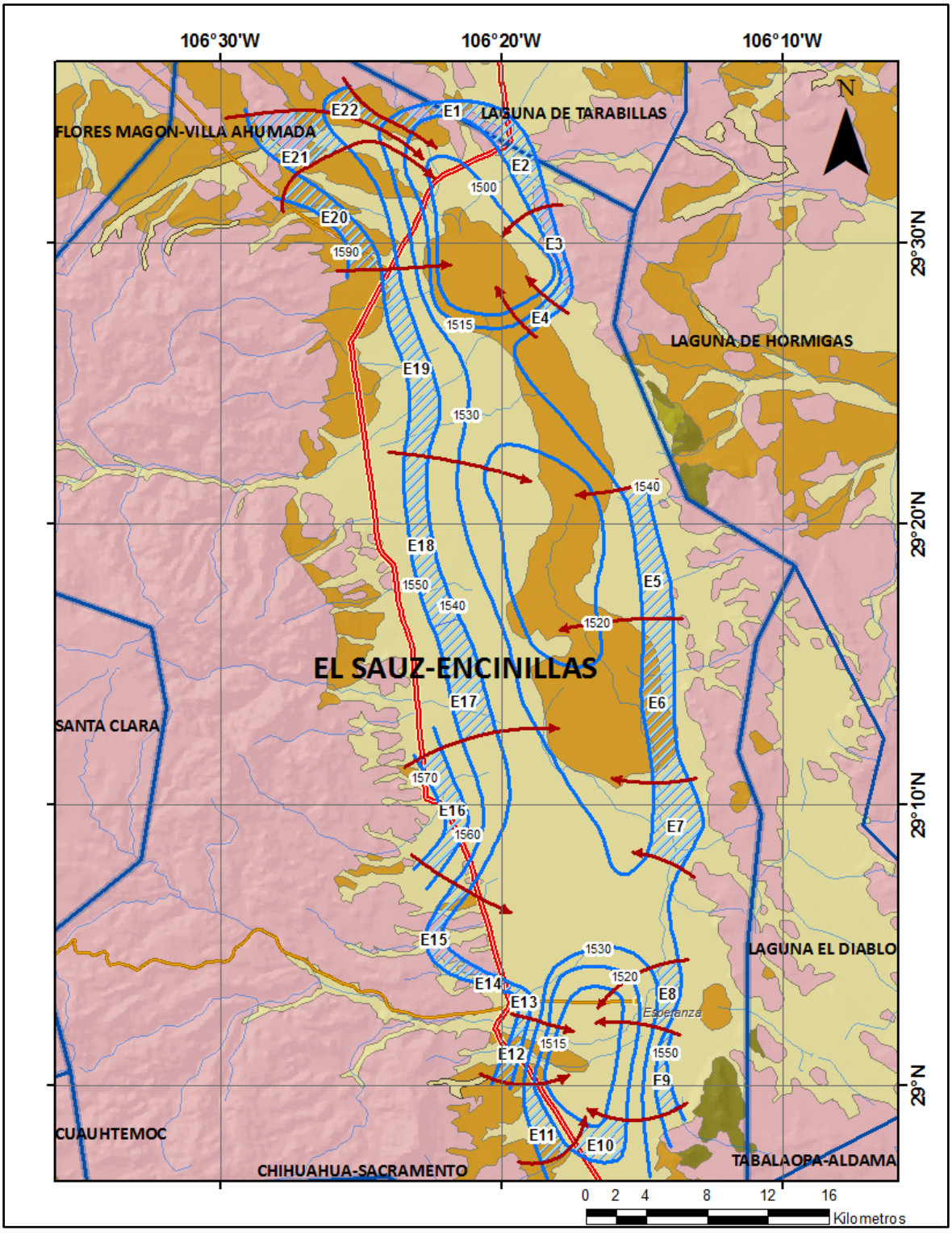



Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Con la información piezométrica correspondiente a los años 2001 y 2009, se elaboró la configuración de la evolución del nivel estático mostrada en la figura 8. En ella se muestra que los valores de abatimiento medio anual varían de 0 a 3 m. Como es normal, los mayores abatimientos se registran en el extremo sur del acuífero, donde se presenta el cono de abatimiento causado por la concentración de pozos que conducen agua potable hacia la ciudad de Chihuahua.

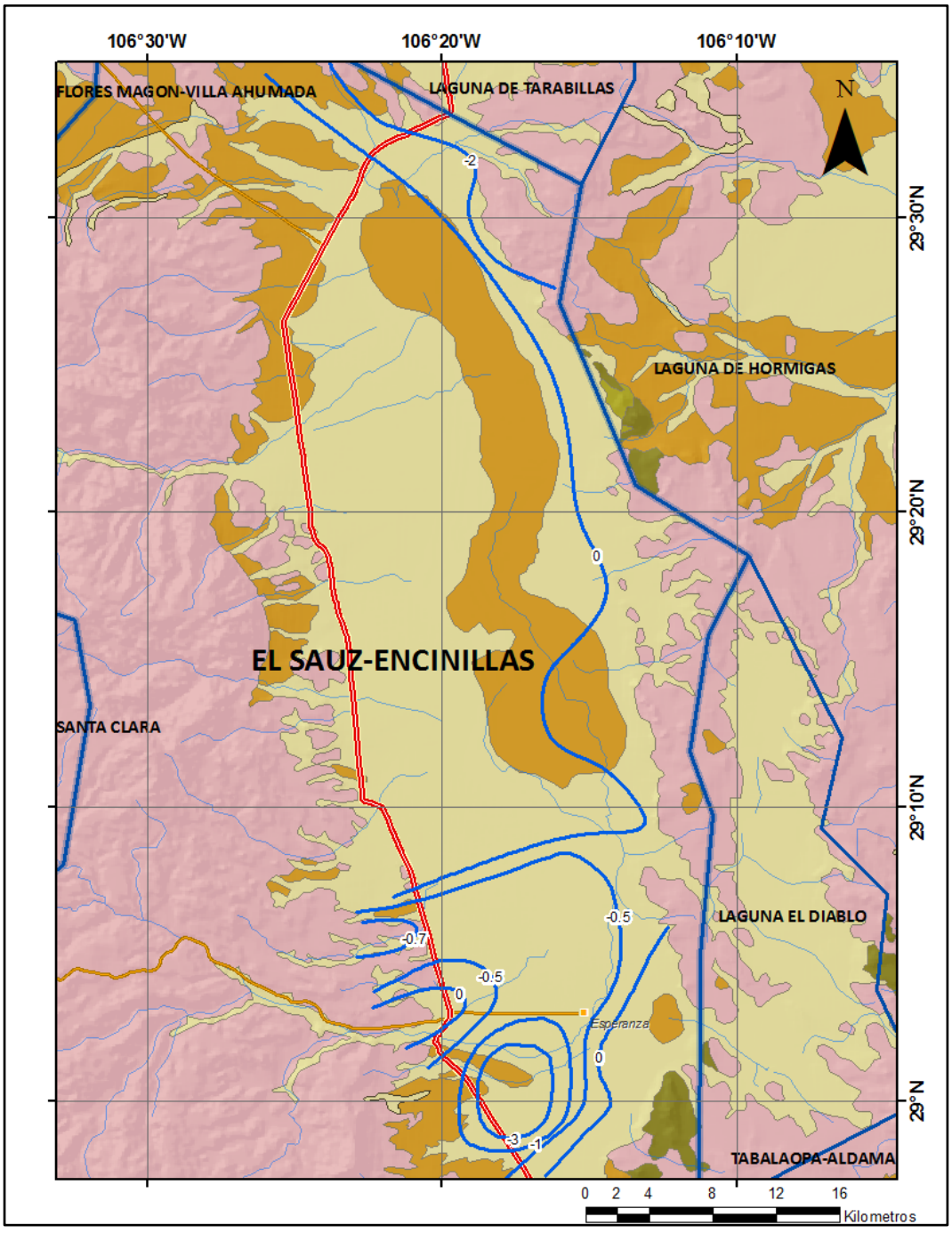



Figura 8. Evolución anual del nivel estático en m (2001- 2009)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Para la caracterización hidrogeoquímica se consideraron los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a 136 muestras de agua subterránea tomadas en años anteriores: 101 corresponden al estudio realizado en 1985, 15 del estudio de 1988 y las 20 restantes del que se realizó en 1996. Adicionalmente, en el estudio realizado en el año 2008 (JMAS/IMTA) se practicaron análisis fisicoquímicos a 20 muestras de agua subterránea, en 12 de las cuales se determinó la concentración de Tritio. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, Fe, Mn, As, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos. En resumen, se cuenta con información 156 muestras de agua analizadas por parámetros fisicoquímicos y 12 muestras por isotopos radioactivos.

De acuerdo con los resultados de los análisis físicoquímicos, la concentración de Sólidos Totales Disueltos es menor a los 1000 ppm que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano. De manera general, las concentraciones se incrementan de las estribaciones de las sierras hacia los extremos norte y nororiente del acuífero.

Destacan concentraciones altas de nitratos en algunos aprovechamientos situados en la porción centro oriental del acuífero, el promedio de este elemento en el acuífero es de 7.4 mg/lt con un máximo de 38.5 mg/lt. El fluoruro en la mayoría de las aguas muestreada excede la norma de potabilidad, teniendo un valor medio de 3.1 mg/lt y un valor máximo de 10.6 mg/lt en un pozo situado al nororiente del acuífero. Otros elementos que exceden la norma de agua potable en algunos pozos son el fierro y el arsénico.

De acuerdo con los iones predominantes, la familia del agua de bicarbonatada cálcica-sódica, que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas.

En cuanto a la temperatura del agua, su valor promedio es 24°C, pero en la porción occidental los valores varían entre 27 y 37°C.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2009, se registraron un total de 623 aprovechamientos, de los cuales 523 son pozos y 100 son norias. De los pozos, 392 son activos y 131 inactivos, de las norias 30 se encuentran activas mientras 70 son inactivas.

El volumen de extracción estimado asciende a **127.2 $hm^3$ anuales**, de los cuales 105.5 $hm^3$ (82.9 %) se destinan para uso agrícola, 2.8 $hm^3$ (2.2 %) para uso doméstico-abrevadero, 18.7 $hm^3$ (14.7%) para uso público-urbano y los 0.2 $hm^3$ restantes (0.2%) para satisfacer la necesidades del sector industrial y otros.

# 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRANEAS

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 masa se expresa como:

**Entradas (E) - Salidas (S) = 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 del acuífero:

**Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento**

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2001-2009, en una superficie de **927 km$^2$**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. De esta manera la ecuación de balance propuesta para éste acuífero es la siguiente:

$$Rv + Eh + Rr - B - ETR = \pm \Delta V(S) \qquad (1)$$

Donde:
**Rv**= Recarga vertical;
**Eh**= Recarga por flujo horizontal;
**Rr**= Retorno de riego;
**B**= Bombeo;
**ETR**= Evapotranspiración real;
$\Delta$**V(S)**= Cambio en el volumen almacenado;

## 7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la

componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el agua destinada al abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Chihuahua se conduce a través del acueducto, solo se consideran los retornos del riego agrícola (Rr).

### 7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (∆V), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1).

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

$$Rv = B + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Rr \qquad (2)$$

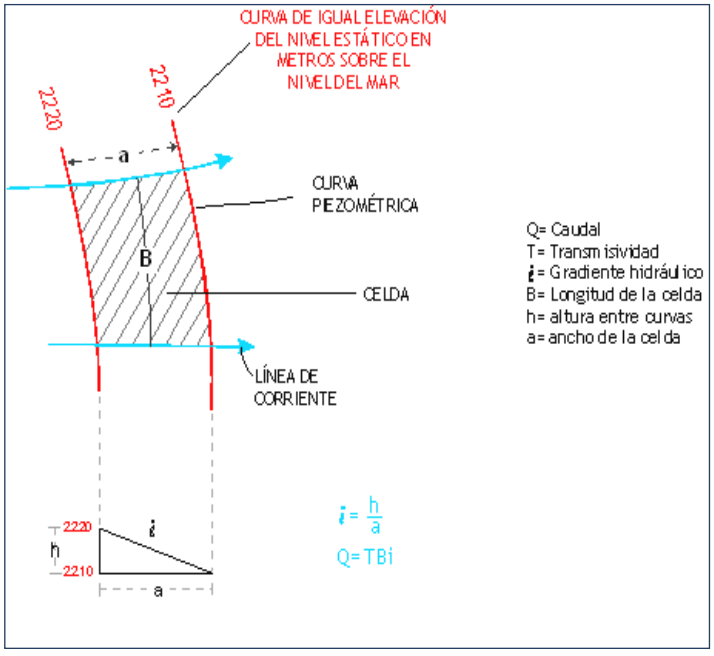
### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de las configuraciones de elevación del nivel estático para los años 2001 y 2009 (figura 6 y 7), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

Donde:
**Q**= Gasto;
**T**= Transmisividad;
**B**= Longitud de la celda;
**i**= Gradiente hidráulico;



Partiendo de esta configuración se seleccionó un canal de flujo para calcular el caudal "Q" que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas.

El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2001 y 2009 se presenta en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas (2001)

| Celda | k (m/d) | Ancho Canal (m) | Espesor Saturado (m) | Área (m) | Gradiente i | T ($m^2/s$) | Caudal Q ($m^3/d$) | Volumen V ($hm^3$/año) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E1 | 0.6 | 6,385 | 170 | 1085486 | 0.0014 | 0.001 | 911.8 | 0.3 |
| E2 | 0.3 | 4,098 | 170 | 696713 | 0.0021 | 0.00059 | 438.9 | 0.2 |
| E3 | 0.3 | 5,752 | 170 | 977922 | 0.0063 | 0.00059 | 1848.3 | 0.7 |
| E4 | 0.3 | 3,077 | 170 | 523032 | 0.0072 | 0.00059 | 1129.7 | 0.4 |
| E5 | 0.6 | 10,546 | 170 | 1792864 | 0.0063 | 0.001 | 6777.0 | 2.5 |
| E6 | 0.6 | 9,420 | 170 | 1601344 | 0.0080 | 0.001 | 7686.5 | 2.8 |
| E7 | 0.6 | 9,109 | 170 | 1548498 | 0.0058 | 0.001 | 5388.8 | 2.0 |
| E8 | 0.6 | 8,989 | 170 | 1528098 | 0.0060 | 0.001 | 5501.2 | 2.0 |
| E9 | 0.3 | 8,840 | 170 | 1502761 | 0.0089 | 0.00059 | 4012.4 | 1.5 |
| E10 | 0.3 | 4,032 | 170 | 685508 | 0.0089 | 0.00059 | 1830.3 | 0.7 |
| E11 | 0.6 | 5,066 | 170 | 861174 | 0.0148 | 0.001 | 7647.2 | 2.8 |
| E12 | 0.6 | 5,982 | 170 | 1016879 | 0.0131 | 0.001 | 7992.7 | 2.9 |
| E13 | 0.6 | 11,279 | 170 | 1917469 | 0.0064 | 0.001 | 7363.1 | 2.7 |
| E14 | 0.3 | 5,701 | 170 | 969175 | 0.0072 | 0.00059 | 2093.4 | 0.8 |
| E15 | 0.6 | 5,678 | 170 | 965286 | 0.0058 | 0.001 | 3359.2 | 1.2 |
| E16 | 0.3 | 8,668 | 170 | 1473541 | 0.0045 | 0.00059 | 1989.3 | 0.7 |
| E17 | 0.3 | 10,665 | 170 | 1813077 | 0.0055 | 0.00059 | 2991.6 | 1.1 |
| E18 | 0.3 | 11,155 | 170 | 1896353 | 0.0050 | 0.00059 | 2844.5 | 1.0 |
| E19 | 0.6 | 9,504 | 170 | 1615748 | 0.0052 | 0.001 | 5041.1 | 1.8 |
| E20 | 0.6 | 8,245 | 170 | 1401567 | 0.0062 | 0.001 | 5213.8 | 1.9 |
| | | | | | | | **Total entradas** | **23.4** |

El valor de transmisividad utilizado fue estimado con base resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio de 2009 y los caudales específicos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas (2009)

| Celda | k (m/d) | Ancho Canal (m) | Espesor Saturado (m) | Área (m) | Gradiente i | T ($m^2$/s) | Caudal Q ($m^3$/d) | Volumen V ($hm^3$/año) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E1 | 0.6 | 6,453 | 170 | 1096974 | 0.0099 | 0.001 | 6516.0 | 2.4 |
| E2 | 0.6 | 5,904 | 170 | 1003760 | 0.0059 | 0.001 | 3553.3 | 1.3 |
| E3 | 0.6 | 6,603 | 170 | 1122536 | 0.0169 | 0.001 | 11382.5 | 4.2 |
| E4 | 0.6 | 2,261 | 170 | 384365 | 0.0117 | 0.001 | 2691.3 | 1.0 |
| E5 | 0.3 | 8,782 | 170 | 1492913 | 0.0064 | 0.00059 | 2866.4 | 1.0 |
| E6 | 0.6 | 10,991 | 170 | 1868402 | 0.0055 | 0.001 | 6165.7 | 2.3 |
| E7 | 0.3 | 5,126 | 170 | 871463 | 0.0034 | 0.00059 | 888.9 | 0.3 |
| E8 | 0.3 | 4,342 | 170 | 738108 | 0.0075 | 0.00059 | 1660.7 | 0.6 |
| E9 | 0.3 | 5,451 | 170 | 926585 | 0.0144 | 0.00059 | 4002.8 | 1.5 |
| E10 | 0.3 | 3,730 | 170 | 634183 | 0.0040 | 0.00059 | 761.0 | 0.3 |
| E11 | 0.6 | 5,068 | 170 | 861596 | 0.0075 | 0.001 | 3877.2 | 1.4 |
| E12 | 0.6 | 4,499 | 170 | 764796 | 0.0123 | 0.001 | 5644.2 | 2.1 |
| E13 | 0.3 | 2,388 | 170 | 405993 | 0.0148 | 0.00059 | 1799.0 | 0.7 |
| E14 | 0.6 | 2,186 | 170 | 371664 | 0.0134 | 0.001 | 2994.9 | 1.1 |
| E15 | 0.6 | 7,117 | 170 | 1209948 | 0.0097 | 0.001 | 7041.9 | 2.6 |
| E16 | 0.3 | 8,250 | 170 | 1402554 | 0.0072 | 0.00059 | 3029.5 | 1.1 |
| E17 | 0.3 | 7,665 | 170 | 1303121 | 0.0047 | 0.00059 | 1837.4 | 0.7 |
| E18 | 0.3 | 11,254 | 170 | 1913163 | 0.0068 | 0.00059 | 3902.9 | 1.4 |
| E19 | 0.3 | 12,596 | 170 | 2141288 | 0.0068 | 0.00059 | 4368.2 | 1.6 |
| E20 | 0.6 | 7,482 | 170 | 1271954 | 0.0081 | 0.001 | 6181.7 | 2.3 |
| E21 | 0.6 | 3,789 | 170 | 644071 | 0.0024 | 0.001 | 942.9 | 0.3 |
| E22 | 0.6 | 1,018 | 170 | 173138 | 0.0027 | 0.001 | 280.5 | 0.1 |
| | | | | | | | **Total entradas** | **22.6** |

Debido a que se elaboraron dos configuraciones del nivel estático para los años 2001 y 2009 que muestran una red de flujo similar, para el cálculo de entradas se tomará un valor promedio de ambas.

El valor estimado de las entradas por flujo subterráneo horizontal es de **23.0 $hm^3$ anuales.**

### 7.1.3 Retornos de riego (Rr)

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 al nivel del agua subterránea mayor a los 50 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo.

Si consideramos que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero, tenemos un volumen de retornos por riego de **Rr = 21.1 $hm^3$/ año.**

### 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y a través de evaporación directa y evapotranspiración en las zonas de niveles freáticos someros (ETR.); no se presentan salidas por flujo base (Dfb) ni manantiales (Dm). La salida por flujo subterráneo horizontal ya fue interceptada, por lo que **Sh = 0**.

#### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, la estimación de extracción para el año 2009 es de **127.2$hm^3$anuales.**

#### 7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) son parámetros utilizados para estimar la recarga potencial por infiltración.

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, aunque el valor de la lámina de ETR es menor que el valor de la precipitación y por lo tanto no se cumple el criterio de restricción para la utilización de esta fórmula (la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31 L).

Debido a que en la zona de niveles freáticos someros no existe cobertura vegetal el fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera. Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos <100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse

despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son >300 cm, según White citado por Keith (1973), como se puede observar en la figura 9.

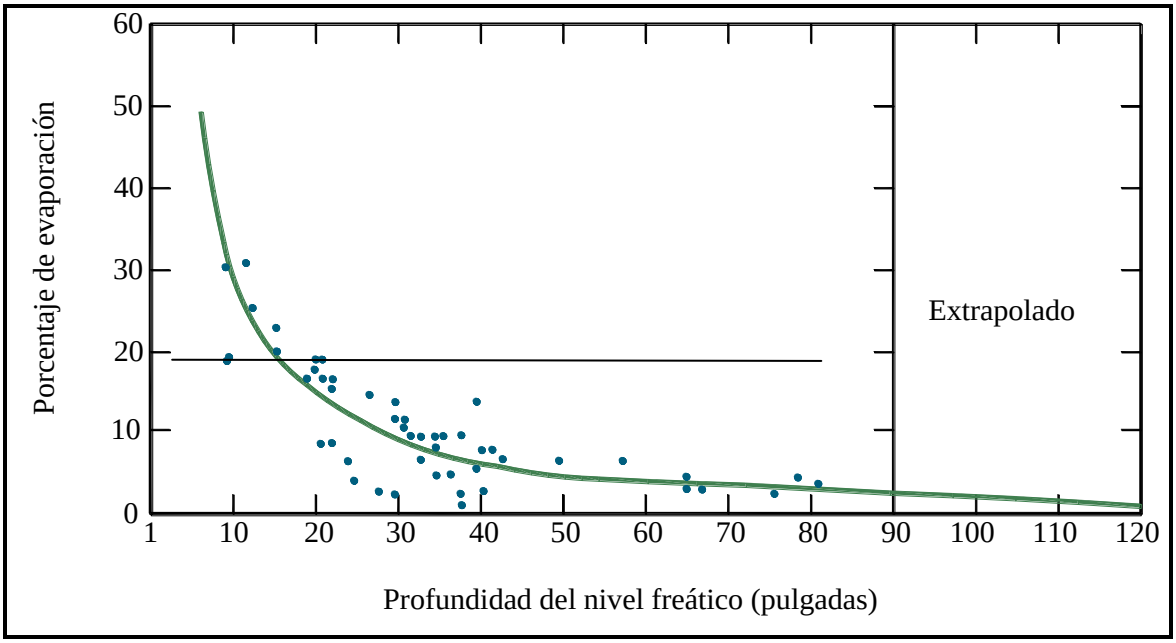



Figura 9. Evaporación del AS expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático (White)

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE menor a 2 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en laestación climatológica Majalca (CONAGUA), la cual es la más cercana al acuífero El Sauz-Encinillas, con un valor de 1675 mm anuales. El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático.

De la figura 9 se deduce que para una profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%. Considerando una superficie de 35 $km^2$ en la zona de influencia de la laguna de Encinillas y una parte al centro sur del acuífero, donde la profundidad al nivel estático se infiere menor a los 2 m y un 2% de la evaporación potencial, se obtiene que la evaporación es de **ETR = 1.2 $hm^3$ anuales**.

### 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución anual del nivel estático 2001 - 2009 mostrada en la figura 8. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.2, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:
**ΔVS=** 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 ($km^2$);
**h=** Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Como consecuencia de la explotación del recurso para el uso agrícola, la posición del nivel piezométrico ha descendido principalmente en la porción sur delacuífero, en tanto que la superficie restante ha permanecido sin cambios. El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento anual (2001 - 2009)

| Curva de evolución | Área de influencia | Volumen $hm^3$ | Sy | ΔV Sy ($hm^3$) |
|---|---|---|---|---|
| -3 | 28.25 | -84.75 | 0.20 | -16.95 |
| -2 | 70.02 | -140.04 | 0.20 | -28.01 |
| -1 | 33.35 | -33.35 | 0.20 | -6.67 |
| -0.7 | 12.93 | -9.05 | 0.20 | -1.81 |
| -0.5 | 90.53 | -45.27 | 0.20 | -9.05 |
| -0.5 | 35.06 | -17.53 | 0.20 | -3.51 |
| **SUMA** | **235.1** | **-312.5** | **1.0** | **-66.0** |

El cambio neto de almacenamiento es de **ΔVS= – 66.0 $hm^3$/año.**

**Solución a la ecuación de balance**

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

$$\mathbf{Rv = B + ETR \pm \Delta V(S) – Eh – Rr \quad (2)}$$
$$Rv = 127.2 + 1.2 – 66.0 – 23.0 – 21.1$$
$$\mathbf{Rv = 18.3\ hm^3\ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, las entradas horizontales subterráneas y los retornos de riego:

$$\mathbf{Rt = Rv + Eh + Rr}$$
$$Rt = 18.3 + 23.0 + 21.1$$
$$\mathbf{Rt = 62.4\ hm^3\ anuales}$$

# 8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \qquad (3)$$

Donde:
**DAS**= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;
**Rt**= Recarga total media anual;
**DNCOM**= Descarga natural comprometida;
**VCAS**= Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

## 8.1 Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso su valor es **62.4hm$^3$/año**, de los cuales 41.3 hm$^3$corresponden a la recarga natural y los 21.1 hm$^3$ restantes a la recarga inducida.

## 8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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 Sauz-Encinillas no se consideran descargas naturales comprometidas.

Por lo tanto **DNCOM = 0.**

## 8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen concesionado de agua subterránea, se determina sumando los volúmenes anuales de agua, asignados y concesionados por la Comisión Nacional del Agua mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) para la explotación, uso o aprovechamiento de agua en una unidad hidrogeológica, adicionando, de ser el caso, los volúmenes correspondientes a reservas y reglamentos conforme a la Programación Hidráulica.

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2010, es de 91'828,511 $m^3$/año.**

## 8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

**DAS = Rt – DNCOM – VCAS (3)**

DAS = 62.4 – 0.0 – 91.828511

**DAS = – 29.428511 $hm^3$/año**

El resultado actual indica que no existe disponibilidad de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones. Por el contrario su **déficit es de 29'428,511 $m^3$ anuales** que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero. Además, es necesario considerar que el volumen de extracción real es mayor que el volumen concesionado, por lo que el déficit es mayor.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor, sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior, para su actualización.

# 9. BIBLIOGRAFIA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980. Prospección Geofísica en los Valles de Sauz y Tabalaopa, Chihuahua Para Proporcionar Agua en Bloque a la Ciudad de Chihuahua. Realizado por la empresa PROYESCO S.A

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Captaciones y Conducciones, 1985. Estudio Geohidrológico Cuantitativo de la Zona de El Sauz para Proporcionar agua en Bloque a la Ciudad de Chihuahua.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1988. Estudio de Prospección Geohidrológica en la Zona Norte del Valle del Sauz, para delimitar las áreas de explotación de la Segunda Etapa y Etapas Sucesivas, para Suministrar Agua a la Ciudad de Chihuahua

Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas (1996). Simulación Hidrodinámica del Acuífero de El Sauz – Encinillas, Chihuahua. Realizado por la empresa Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A. de C.V. IEPSA.

Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas (1998). Reactivación de Redes de Monitoreo de los acuíferos de los valles de: Casas Grandes, Cuauhtémoc, El Sauz-Encinillas y Ascensión en el estado de Chihuahua.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2008. Diagnóstico, Modelación y Planificación en la Red de Distribución de Agua Potable de Chihuahua.

Comisión Nacional del Agua (2009). Actualización Geohidrológica de los acuíferos Las Palmas, Palomas-Guadalupe-Victoria, Los Moscos, Josefa Ortiz de Domínguez, El Sauz-Encinillas, Laguna El Diablo, Laguna La Vieja, y Chihuahua-Sacramento, en el estado de Chihuahua. Realizado por la Universidad Autónoma de Chihuahua.