



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 0830 CHIHUAHUA-SACRAMENTO,
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.....	10
4.1 Estratigrafía.....	10
4.2 Geología Estructural	14
4.3 Geología del subsuelo	14
5. HIDROGEOLOGÍA	15
5.1 Tipo de acuífero	15
5.2 Parámetros hidráulicos	16
5.3 Piezometría.....	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático	17
5.4.2 Elevación del nivel estático	18
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 SUBTERRANEAS	22
7.1 Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	24
7.1.3 Recarga inducida (Ri).....	26
7.2 Salidas	26
7.2.1 Bombeo (B)	26
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	27
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1 Recarga total media anual (Rt).....	28
8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)	28
8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	28
8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS).....	29
9. BIBLIOGRAFIA.....	30

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 (REPGA).

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 Chihuahua - Sacramento, definido con la clave 0830 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción central del estado de Chihuahua, cubriendo una superficie de 1889 km². Geográficamente, la zona se encuentra ubicada entre los paralelos 28°26' y 28°56' de latitud Norte y entre los meridianos 105°58' y 106°32' de longitud Oeste.

Colinda al norte con el acuífero El Sauz – Encinillas, al este con el acuífero Tabalaopa – Aldama, al sur con el acuífero Villalba, al oeste y sur con el acuífero Alto Río San Pedro, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua (figura 1).

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios de Chihuahua y Riva Palacio.

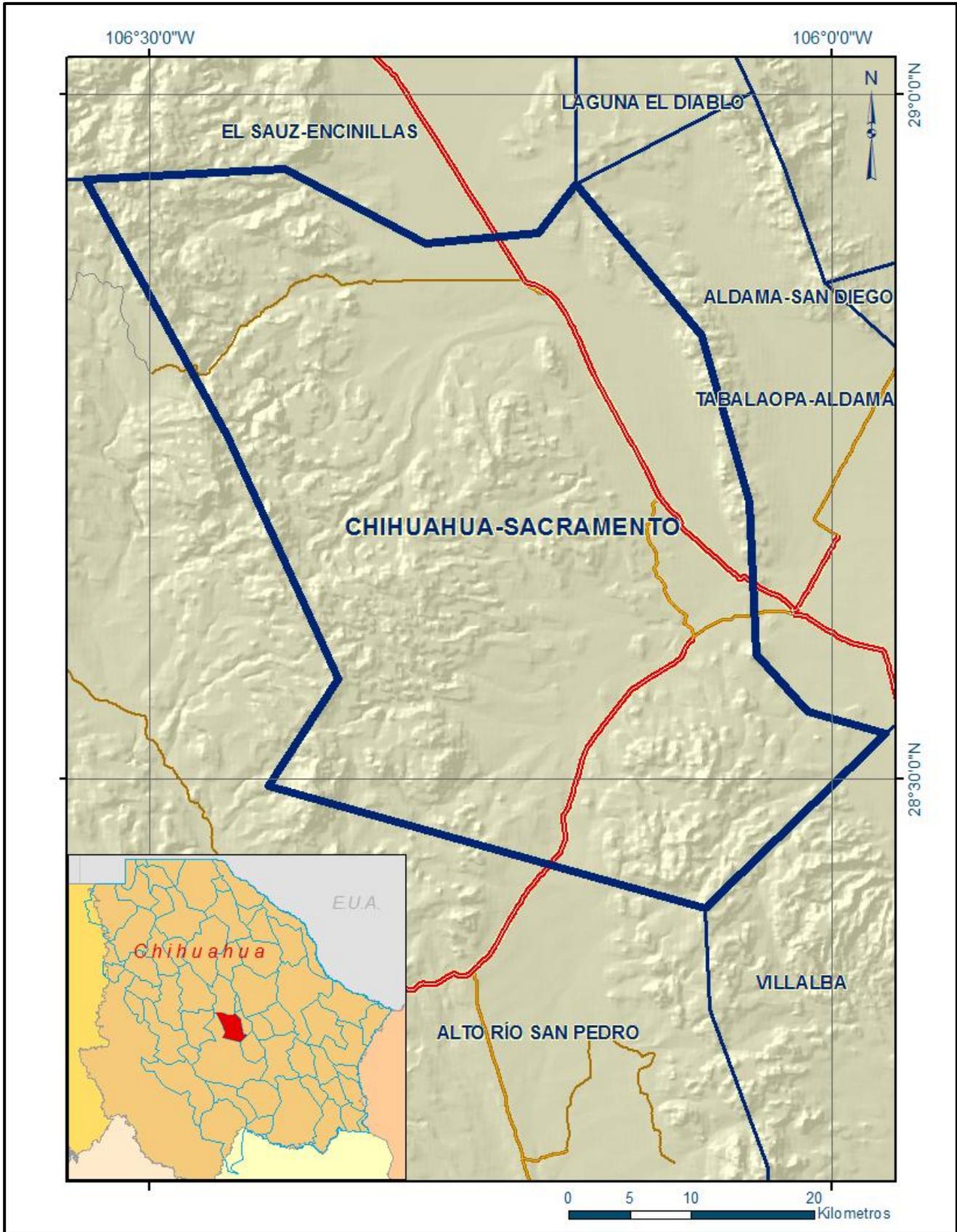


Figura 1. Localización del acuífero Chihuahua - Sacramento

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

ACUIFERO 0830 CHIHUAHUA-SACRAMENTO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	106	24	2.8	28	56	46.0
2	106	17	51.1	28	53	31.1
3	106	12	54.9	28	53	56.1
4	106	11	17.5	28	56	7.4
5	106	5	44.0	28	49	26.4
6	106	3	39.3	28	42	9.7
7	106	3	19.7	28	35	27.0
8	106	1	7.4	28	32	56.1
9	105	57	41.8	28	31	59.1
10	106	5	34.5	28	24	19.7
11	106	24	45.4	28	29	39.4
12	106	21	41.5	28	34	21.1
13	106	26	34.8	28	45	1.8
14	106	32	48.5	28	56	19.5
1	106	24	2.8	28	56	46.0

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Chihuahua - Sacramento pertenece al Organismo de Cuenca “Río Bravo” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Chihuahua. En su territorio rigen cuatro decretos de veda:

La porción nororiental del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones del *“Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región circunvecina de Villa Aldama, Chih.”*, publicado en el DOF el 31 de diciembre de 1953. Este decreto se clasifica como tipo III, que sólo permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La porción centro-oriental se encuentra sujeta a las disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en terrenos que ocupa y circundan la ciudad de Chihuahua, Chih., en la zona que el mismo delimita.”*, publicado en el DOF el 7 de febrero de 1952. Este decreto se clasifica como tipo II que sólo permite extracciones para usos domésticos y abrevadero que se realicen por medios manuales.

El extremo suroccidental, se encuentra sujeto a disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido, para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como región de*

Cuauhtémoc, del Estado de Chihuahua”, publicado en el DOF el 21 de octubre de 1967. Este decreto se clasifica como tipo III que sólo permite extracciones para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Una pequeña porción del extremo noroccidental, se encuentra sujeto a 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 12 de enero de 1978. Este decreto se clasifica como tipo II que sólo permite extracciones para usos domésticos y abrevadero que se realicen por medios manuales.

Por otra parte, en las porciones al norte, centro-occidental y sur no rige ningún decreto de veda.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2010, el municipio Chihuahua, se clasifica como zona de disponibilidad 3 y Riva Palacio zona de disponibilidad 7. El usuario principal es el sector público-urbano, a través del Organismo Operador Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS). En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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 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.

ACTUALIZACIÓN DE LAS MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS ACUÍFEROS REACTIVADOS EN 1996 (PROMMA), EN LOS ESTADOS DE SONORA Y CHIHUAHUA, elaborado por la empresa Técnicas Geológicas y Mineras, S. A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua, en 1996.

Concluye, mediante la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1996-1996, la existencia de abatimientos que varían de 5 a 2 m, los mayores se registraron al oeste de la Colonia Sacramento y los mínimos al norte y sureste de dicha esta Colonia. En la ciudad de Chihuahua se manifiestan evoluciones muy variables: abatimientos de hasta 5 m en la zona industrial y recuperaciones al sureste de la misma. También se determinó que la dirección preferencial del flujo subterráneo es de oeste a este en la porción correspondiente a la Colonia Sacramento, en la parte

central de la ciudad de Chihuahua el flujo subterráneo converge al cono de abatimiento ahí formado. En la porción sur se exhibe un aporte de agua subterránea con dirección de flujo sur a norte.

MODELO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE LOS ACUÍFEROS CHIHUAHUA – SACRAMENTO, CHIH. Y CHUPADEROS, ZAC., elaborado por la empresa Ariel Consultores, S. A., para la Comisión Nacional del Agua, en 2001. Con la información previa existente, se construyó un modelo flujo hidrodinámico, que sirvió para simular diferentes escenarios de explotación y a partir de ellos establecer la mejor alternativa de manejo del agua subterránea.

MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS DE ASCENSIÓN, PALOMAS – GUADALUPE VICTORIA, VALLE DE JUÁREZ Y CHIHUAHUA – SACRAMENTO Y CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS CHIHUAHUA SACRAMENTO Y TABALAOPA – ALDAMA DEL ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por Consultores y Constructores del Norte S. A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2005. Recaba información piezométrica para la actualización de las configuraciones del nivel estático y obtiene 43 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico respectivo.

DIAGNÓSTICO, MODELACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE SECTORES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE CHIHUAHUA, CHIH. PARTE I. DIAGNÓSTICO, elaborado por el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) para la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, Chihuahua, en 2008. Realiza el diagnóstico de la situación del sistema de almacenamiento y distribución de la red de agua potable con enfoque técnico-operativo, mediante la utilización de indicadores que evaluaron la situación integral actual, como: zonas de influencia de tanques y rebombes, eficiencias física, comercial y global y la eficiencia electromecánica de los equipos de bombeo. Por último se calcularon las pérdidas de agua a través de la realización de balances volumétricos y actualizó el catastro de la red hidráulica de agua potable.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO CHIHUAHUA - SACRAMENTO, 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 Chihuahua-Sacramento se encuentra ubicado dentro de las Provincias Fisiográficas Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras y del Norte, cuyo límite atraviesa su porción central en dirección noreste.

La provincia Sierras y Llanuras del Norte es una región árida y semiárida que se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos de América hasta cerca de Nazas en Durango y la Laguna de Mayrán en Coahuila y muestra digitaciones desde ese país hacia el extremo norte de Sonora. Dentro de territorio mexicano, al sur del Río Bravo, colinda al oeste con la Sierra Madre Occidental, al este con la Sierra Madre Oriental y tiene un punto de contacto en el extremo sur con la Mesa Central. Se orienta más o menos en dirección noroeste-sureste y abarca parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila y Durango.

El origen de la provincia está relacionado, entre otros eventos, con el plegamiento de las secuencias marinas del mesozoico que se desarrollaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico así como con el relleno de fosas tectónicas con sedimentos continentales y algunos derrames lávicos, que también dieron lugar a la formación de cuencas endorreicas.

Dentro de esta provincia, el acuífero Chihuahua-Sacramento queda comprendido en las subprovincias Del Bolsón de Mapimí y Sierras y Llanuras de Durango. En la primera dominan las llanuras aluviales y las bajadas pero existen pequeñas sierras escarpadas y plegadas así como lomeríos escarpados y ramificados orientados norte-sur. Los lomeríos en la parte norte están relacionados con rocas volcánicas ácidas mostrando fallas normales sobre sus costados y en el sur con calizas. Los recursos hidrológicos superficiales de esta porción son prácticamente nulos, mientras que la segunda forma parte del costado oriental de la Sierra Madre Occidental, en sentido aproximadamente norte-sur va desde la cabecera municipal Santa Isabel, Chihuahua, hasta Sombrerete, Zacatecas, pasando por el estado de Durango.

Con respecto a la provincia Sierra Madre Occidental, inicia prácticamente desde la frontera con Estados Unidos de América, dentro de los cuales tiene una pequeña penetración, y se extiende de noroeste a sureste hasta su límite en el sur con la provincia Eje Neovolcánico.

Este sistema montañoso tuvo su origen en el Paleógeno y Neógeno, cuando se inició la extrusión en forma extraordinaria de los materiales volcánicos que lo conforman, cuyos espesores se calculan entre 1,500 y 1,800m que sepultan las rocas sedimentarias más antiguas. La sierra que tiene altitudes hasta de 3,300m, presenta hacia el occidente un imponente eskarpe, en tanto que hacia el oriente desciende gradualmente a las regiones llanas del centro. En la franja este, las cadenas montañosas y

valles presentan una orientación noreste-suroeste, producto de los fallamientos que acompañaron a los procesos de levantamiento ocurridos durante el Pleistoceno. Sobre yaciendo, los materiales lávicos forman las mesetas típicas de la provincia.

3.2 Clima

El clima de la zona se caracteriza por ser árido y extremo. De acuerdo con la clasificación hecha por Köppen y adaptada por E. García para las condiciones de nuestro país, el clima en la zona del acuífero Chihuahua-Sacramento presenta tres subtipos climatológicos.

1. **BS₁k''w**: Clima semiseco templado que presenta lluvias en verano con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 mm.
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. **BS₁kw**: Clima semiárido, templado, temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C, temperatura.

Para el análisis se utilizó la información de las estaciones climatológicas Presa El Rejón, Majalca, San Antonio, Universidad, Presa Chihuahua y La Mesa que cuentan un con periodo de análisis de 1961 a 2003.

Con base en el análisis de los registros de estas estaciones climatológicas se determinó que la precipitación media anual es de 488.5mm. La temperatura media anual es de 15.9 °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 promedio es del orden de 2203 mm/año.

3.3 Hidrografía

Este acuífero se ubica en la región hidrológica 24 denominada "Río Bravo-Conchos", dentro de las cuencas Río Conchos – Presa El Granero, la cual abarca la mayor parte del acuífero, y Río San Pedro, que comprende una pequeña porción al suroeste del acuífero.

El río Chuvíscar es su corriente principal; nace en la serranía La Mesa Montosa, a 35km de la ciudad de Chihuahua, a una altitud de 2300m. De sus orígenes sigue una tendencia noreste atravesando la Sierra Azul y una serie de rancherías. En la parte alta de la cuenca la topografía es accidentada y de cubierta vegetal boscosa de pinos y, oyameles, principalmente. Por su alta pendiente, escasa

infiltración y tipo de cubierta, se generan avenidas importantes, que son almacenadas en la presa Chihuahua.

Aguas abajo de la cortina continúa su trayectoria hacia el noreste atravesando la ciudad de Chihuahua y a la salida de ésta descarga sus aguas al río Sacramento. Estas corrientes en conjunto continúan su trayectoria hasta Aldama, donde describen una curva hacia el sureste, cuando la topografía es plana, para descargar finalmente en la margen izquierda del río Conchos, aguas abajo de la estación hidrométrica Las Burras. Los afluentes de importancia del río Chuvíscar son: río El Rejón y el río Sacramento.

El río Sacramento se forma en la sierra alta, localizada al noreste de la ciudad de Chihuahua y desciende con una dirección con tendencia al noreste, hasta derivar su caudal a la presa San Marcos, donde es retenida la mayor parte de su escurrimiento. Aguas abajo conserva el mismo sentido hacia la localidad de Sacramento, donde su cauce cambia con dirección hacia el sureste hacia la ciudad de Chihuahua, donde su gasto es incrementado con algunos afluentes de aguas residuales hasta desembocar al río Chuvíscar. Sus principales tributarios son algunos arroyos de carácter intermitente.

El río Rejón es una corriente de régimen intermitente, cuyo origen se remonta al rasgo orográfico conocido como Mesa Montosa. La corriente principal de este río desciende desde una altitud de 2,200 m con dirección E, a través de una zona de topografía accidentada y cubierta vegetal semejante a la descrita anteriormente. El área drenada hasta el sitio de la hidrométrica El Rejón es de 178 km². También este río genera avenidas de importancia, que son controladas mediante la presa El Rejón.

3.4 Geomorfología

Geomorfológicamente el valle Chihuahua – Sacramento, constituye un amplio valle elongado con rumbo NNO-SSE, surcado por el río Sacramento cuyas aguas proceden de la zona alta de la Sierra Majalca (arroyos Calabacillas y Majalca, ubicados al NO del acuífero). Su cauce se desarrolla posteriormente muy cerca del borde occidental afallado de la Sierra Nombre de Dios, en la que se observa un relieve escarpado labrado en rocas volcánicas con menor proporción de calizas.

Así mismo, el límite occidental del valle está definido por la prolongación sur de la Sierra Majalca, que muestra igualmente un flanco oriental rectilíneo ocasionado por fallamiento normal en el que se aprecia un relieve accidentado y abrupto compuesto por numerosas cañadas y barrancas desarrolladas en su mayor parte sobre rocas volcánicas dispuestas en forma casi horizontal, que se expresan mediante una serie de mesetas o mesetillas con elevaciones máximas cercanas a los 2000 msnm (cerros El Mogote-Jesús María) que implican una diferencia de elevación moderada de unos 500m, con respecto a la altitud promedio del valle (aprox. 1500 msnm). Por lo que toca a la Sierra Nombre de Dios, ésta es de menor anchura y su relieve un poco más suave, con escarpes locales; presenta un flanco occidental con mayor pendiente que su flanco oriental.

En el valle, justo en el cambio de pendiente con las sierras adyacentes, se presenta una morfología compuesta por numerosos abanicos aluviales que se suavizan hacia la zona central del valle, donde corre el río Sacramento descargando sus aguas al río Chuvíscar, precisamente en el extremo sur de la Sierra Nombre de Dios.

4. GEOLOGÍA

El acuífero Chihuahua-Sacramento se desarrolla en los depósitos aluviales paleógenos - cuaternarios que rellenaron una fosa tectónica limitada por los bloques levantados representados por la prolongación hacia el sur de la Sierra Majalca y por la Sierra Nombre de Dios. El relleno aluvial alcanza un potente espesor en la porción norte del valle, el cual disminuye notablemente hacia el sur.

Tanto la Sierra Majalca como Nombre de Dios se componen por rocas volcánicas riolíticas del Paleógeno y Neógeno, aunque localmente afloran andesitas y basaltos principalmente en la primera de ellas. Sin embargo, las rocas calcáreas cretácicas están expuestas en el extremo sur del flanco occidental de la Sierra Nombre de Dios y en su extremo norte en la localidad minera de Estación Terrazas, con presencia de cuerpos intrusivos monzoníticos. Esta misma condición se observa en las inmediaciones de la porción sur de la Sierra Majalca, justo en la localidad Punta de Agua (unos 10 km al oeste de Estación Terrazas) (figura 2).

4.1 Estratigrafía

Cretácico

Rocas Sedimentarias

Una secuencia calcárea-lutítica del Cretácico Inferior (KiCz) se encuentra parcialmente expuesta en varias localidades dentro del acuífero, agrupando a varias formaciones: Las Vigas, La Virgen, Cupido, Peña, Aurora (equivalente a Tamaulipas Superior), Walnut y Edwards, citadas de la más antigua a la más reciente. En la porción sur de la Sierra Nombre de Dios afloran las formaciones Tamaulipas Superior, Walnut y Edwards; la primera y la última compuestas por calizas gruesas que forman las principales elevaciones abruptas de la sierra, en tanto que la segunda, con un contenido arcilloso (lutitas) mayor, presenta taludes más suaves.

En la zona mineralizada de Minillas, localizada al oeste de la ciudad de Chihuahua, sobre el flanco suroeste de la Sierra El Mogote y en la cabecera de la cuenca del arroyo de La Haciendita, se localizan pequeños afloramientos de calizas y lutitas (KiCz-Lu) que incluyen a las formaciones Tamaulipas Superior, Walnut y Edwards. Al oeste de la localidad de Minillas, casi en el límite occidental del acuífero con la cuenca hidrográfica del río Santa Rosa-Santa Isabel, está expuesta en el cerro Mariana una pequeña sección calcárea (KiCz) correspondiente a la Formación Aurora, que aflora en una de las márgenes de uno de los cauces que drena hacia la presa El Rejón.

Por último una sección importante de las rocas sedimentarias del Cretácico Inferior (KiCz) está expuesta en una estructura anticlinal llamada Sierra Azul, en el que se pueden observar las formaciones Las Vigas, La Virgen, Cupido, La Peña y Aurora, las cuales debido a su constitución calcárea con bajo contenido de lutitas, le imprimen al terreno un relieve más abrupto y elevado, destacado en la topografía la mayores elevaciones constituidas por las formaciones Cupido y Aurora. Al este de la Sierra Azul aflora un conglomerado oligomítico (KmCgo) considerado de edad Maastrichtiano, cubierto discordantemente por riolitas (KmTpR) del Cretácico Superior-Paleoceno, que afloran de manera aislada en algunos sitios.

Rocas Volcánicas y Vulcanoclásticas

En la porción noroeste del acuífero, justo al noreste de Punta de Agua (Cuauhtémoc) y en la cabecera occidental del cañón de Majalca, está expuesto un potente espesor del Cretácico Superior de andesitas, tobas andesíticas, brechas e ignimbritas (KsA-R) correspondientes al Grupo Volcánico Cañón Majalca (Mauger, 1979). Estratigráficamente sobre 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 (~ 68.0 Ma). 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 E. Esta unidad también aflora en algunos lomeríos ubicados al NO de la localidad de Punta de Agua hasta el faldeo bajo del escarpe oriental del Cerro Ranchería.

Paleógeno

Rocas Volcánicas, Vulcanoclásticas y Sedimentarias

Gran parte del área que abarca el acuífero comprende una gruesa sección de rocas volcánicas de composición variable, desde riolíticas hasta basálticas, intercaladas en algunas localidades con sedimentos vulcanoclásticos y sedimentarios continentales.

Paleoceno

Está representado por rocas andesíticas (PpaA) y riolíticas (PpaR) que constituyen la mayor parte de la Sierra Nombre de Dios hasta cerca de la localidad Estación Terrazas, las cuales sobreyacen, por discordancia erosional y estructural, a calizas cretácicas. También se encuentran afectadas por fallamiento normal y numerosas fracturas, presentan pseudoestratificación clara con ligera inclinación hacia el este y están subyacidas por brechas polimíticas sedimentarias (PpaBsp) que afloran en la margen izquierda del arroyo Majalca, justo al oeste del rancho Peñas Azules.

Eoceno

Gran parte de las sierras que se encuentran dentro de los límites del acuífero están compuestas litológicamente por tobas riolíticas (PeTR) que muestran pseudoestratificación con inclinación hacia el oriente, conformando una serie de cadenas de mesetillas separadas por estrechas cañadas,

resultando finalmente en un terreno abrupto y accidentado, principalmente en la zona occidental del acuífero. Sobre la unidad PeTR descansan basaltos y sedimentos conglomeráticos (PeB) que afloran notablemente en la Mesa La Trampa, entre la presa San Marcos y el cañón de Majalca. Sobreyaciendo a la unidad PeTR, descansan andesitas (PeA) que componen totalmente a dos elevaciones conocidas localmente como Picos Gemelos, justamente a la entrada del cañón de Majalca, lugar donde está situada la comunidad Nuevo Majalca.

Otra unidad volcánica, menos importante en extensión que la unidad PeTR, se compone por flujos riolíticos (PeR) que afloran principalmente al oeste de la localidad de Minillas, casi en el límite oeste del acuífero, constituyendo igualmente un terreno abrupto y accidentado. Aflora también al noreste de Cumbres de Majalca y localmente en algunos sitios de la Sierra El Mogote, San Marcos y oeste de la Sierra Azul.

Oligoceno

Entre la Sierra Azul y el flanco noroeste de la Sierra Pastorías, se distribuyen tobas riolíticas e ignimbritas que constituyen la unidad (PoTR-Ig), erosionadas por los arroyos afluentes del río Chuvíscar antes de llegar a la presa Chihuahua, así como en las elevaciones situadas al sur de la ciudad de Chihuahua. En el flanco norte y oeste de la Sierra Pastorías “Caldera de Pastorías” (Megaw, P. K. M., 1979), afloran conglomerados y tobas riolíticas (ToCgp-TR) originados por la formación de la caldera, los cuales presentan un echado preferencial al noroeste. En la porción central de la Sierra Nombre de Dios, se encuentran pequeños afloramientos de andesitas (PoA). Entre El Fresno y la población El Charco se localizan los cerros Batopilas y Palos Altos que están constituidos por flujos basálticos (PoB).

Rocas Ígneas Intrusivas

Paleoceno

Las rocas ígneas intrusivas afloran principalmente en la localidad Punta de Agua, casi a la entrada del cañón Cumbres de Majalca, donde se encuentran calizas marmorizadas por el emplazamiento de un intrusivo cuarzomonzonítico (PpaqMz). Al emplazarse un domo volcánico compuesto por un pórfido riolítico (TpaPR) se afectaron a las calizas de la región mineralizada de Estación Terrazas. Otros afloramientos del pórfido riolítico se localizan en la porción sur de la Sierra Nombre de Dios.

Cuaternario

Rocas Sedimentarias

Los productos de la erosión de las sierras vecinas a 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, sin embargo hacia las márgenes de las sierras se localizan numerosos abanicos aluviales (QptCgp) compuestos fundamentalmente por conglomerados no consolidados.

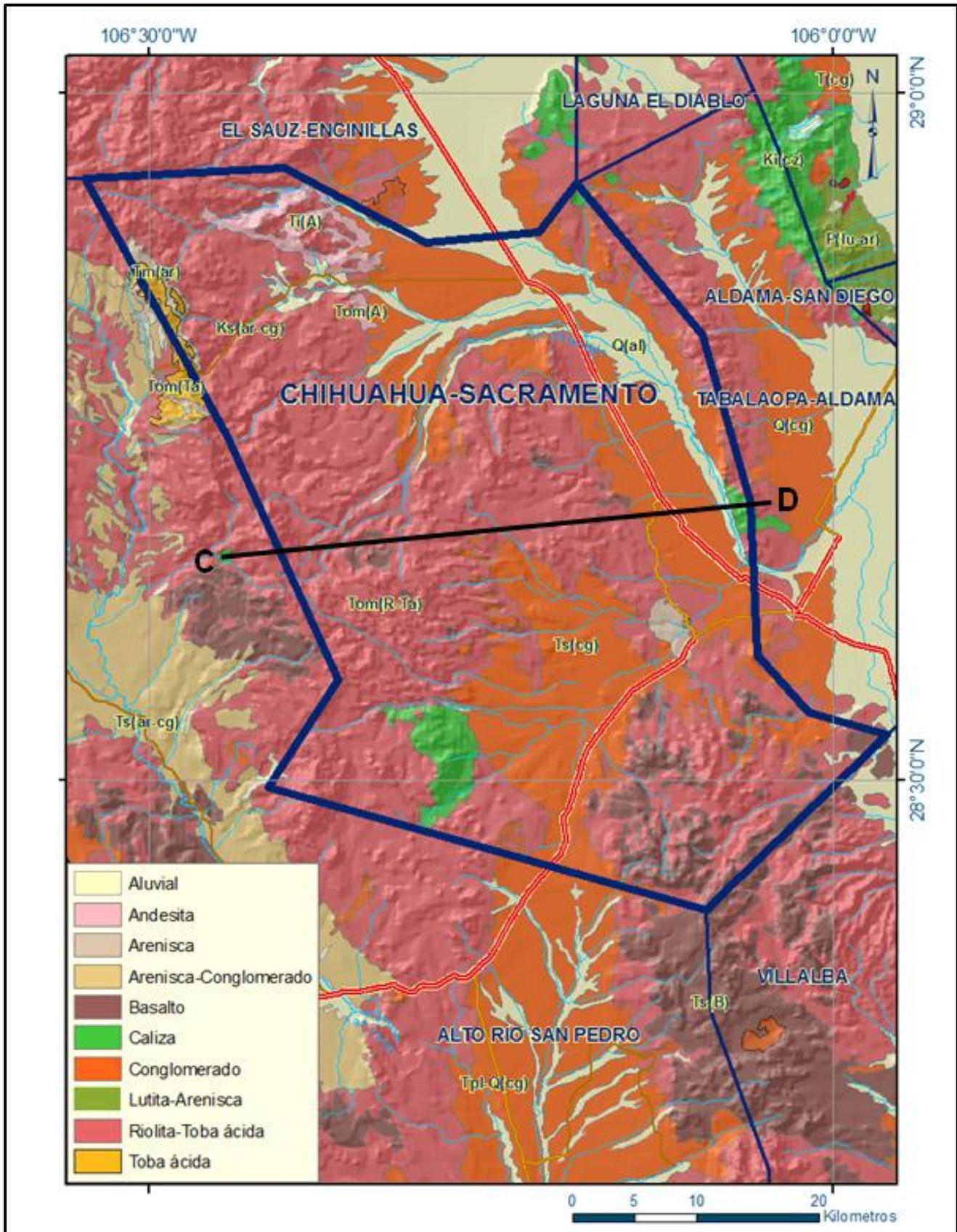


Figura 2. Geología del acuífero Chihuahua - Sacramento

4.2 Geología estructural

Las estructuras geológicas presentes en el acuífero son el resultado de los esfuerzos compresivos Laramídicos seguidos de una tectónica transcurrente y, finalmente, de un evento extensional ocurrido durante el Oligoceno-Miocénico que provocó los rasgos fisiográficos actuales de la región. Las rocas volcánicas están afectadas por fallas normales asociadas a la provincia Cuencas y Sierras con expresión de depósitos aluviales con gran espesor que rellenan a las fosas tectónicas originadas durante el Oligoceno-Mioceno. El valle Chihuahua-Sacramento representa la continuidad hacia el sur de la fosa tectónica del Sauz-Encinillas, igualmente rellena por un potente espesor de sedimentos clásticos aluviales. Se encuentra limitado hacia ambos márgenes por bloques levantados, como son la Sierra Nombre de Dios-Sacramento (bloque Sacramento), al oriente, y las serranías del bloque El Mogote al occidente. Éstas últimas regionalmente constituyen un extenso sistema de bloques afallados normalmente con un rumbo NNO-SSE ligeramente basculados. Destaca de manera general un bajo topográfico que incluye a la cuenca del arroyo La Haciendita y otras adyacentes, en cuya porción sur se localizan las presas El Rejón, Chuvíscar y Chihuahua.

En la porción norte de la cuenca La Haciendita se ubica una zona mineralizada, alojada cerca de cuerpos intrusivos pórfido-riolíticos, en la periferia de una estructura circular, conocida como “Caldera de Minillas. Otras estructuras circulares interpretadas como calderas volcánicas, se localizan en la zona de Cumbres de Majalca (Chávez *et al.*, 1981) y el arroyo Calabacillas, en la porción noroeste del acuífero, así como la caldera de Pastorías en la porción sureste.

4.3 Geología del subsuelo

El acuífero Chihuahua-Sacramento se emplaza en sedimentos clásticos de relleno de fosa tectónica (“Fosa Chihuahua”) la cual se desarrolla con un rumbo NNO-SSE, que representa la continuidad hacia el sur de la fosa tectónica del Sauz-Encinillas, limitada al oeste por el bloque tectónico Mogote-La Haciendita, y al este por el bloque Sacramento.

El acuífero se encuentra emplazado en una cuenca tectónica cuyo espesor probablemente sea mayor a 600 m, de acuerdo con los sondeos geofísicos, ya que los pozos más profundos alcanzan los 400 m constituidos por sedimentos clásticos aluviales de granulometría variable, sin llegar al basamento calcáreo-volcánico, como es el caso de los situados en los alrededores del Complejo Industrial en el norte de la ciudad de Chihuahua y en la batería de pozos Sacramento de la JMAS. Tomando en cuenta algunos cortes litológicos de pozos, se aprecian grandes espesores de sedimentos de grano grueso como arena y gravas, así como conglomerados parcialmente consolidados que presentan permeabilidad media a alta; sin embargo es de esperarse zonas con una mayor concentración de sedimentos finos como limos y arcillas que son comunes en este tipo de ambiente sedimentario. De acuerdo con información geofísica, el espesor del relleno aluvial se estima en alrededor de 300 m en la zona de Sacramento-Ejido Ocampo, que constituye el límite norte del acuífero.

El espesor del relleno disminuye hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, principalmente hacia el oeste y al sur de la cuenca, hacia el río Chuvíscar, en donde algunos pozos cortan un delgado espesor de material aluvial y el resto se desarrolla en tobas riolíticas permeables, como en el pozo de la colonia Mirador y la Universidad Tecnológica, sin embargo localmente en el pozo del nuevo Campus Universitario con 350 m de profundidad cortó sólo depósitos con granulometría de grava, en tanto que el pozo Picacho 3 situado a 1 km al oeste, después de los 40m de profundidad se desarrolla en tobas riolíticas, esto indica el desplazamiento vertical entre bloques afallados (figura 3).

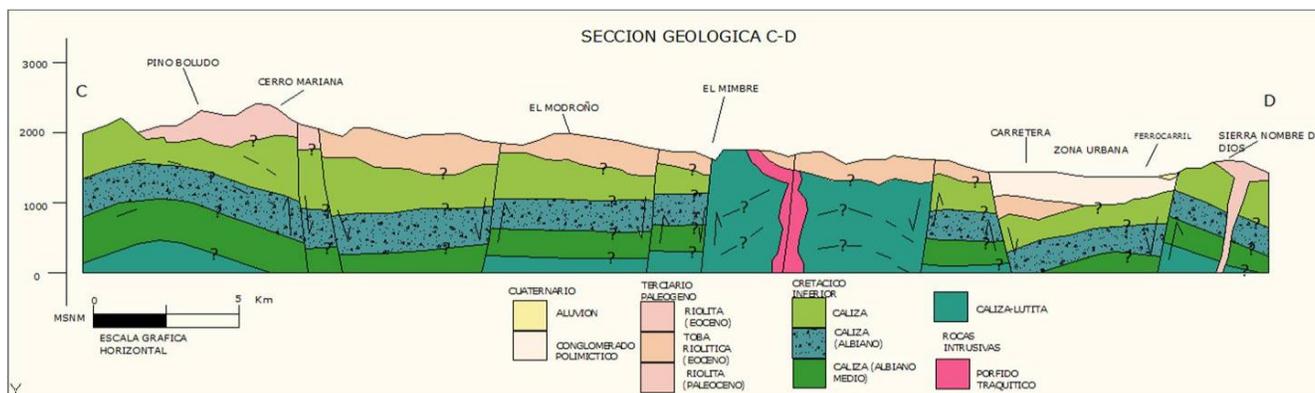


Figura 3. Sección geológica CD dentro del acuífero Chihuahua – Sacramento

Se infiere que el desarrollo de facies sedimentarias de grano fino, se concentran hacia la margen oriental del valle, debido a la mayor magnitud en extensión y en elevación del bloque occidental compuesto por las sierras del Mogote y La Haciendita, que pudieron haber presentado mayor competencia ante la acción erosiva de los arroyos procedentes del mismo, durante la evolución sedimentaria de la cuenca, en comparación con los procedentes de la sierras Sacramento-Nombre de Dios.

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

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten clasificar al acuífero Chihuahua-Sacramento como un acuífero **tipo libre a semiconfinado**, heterogéneo y anisótropo que se

desarrolla en forma conjunta tanto en el medio granular como en el fracturado, conformando una sola unidad hidrogeológica cuyo espesor varía de 350 a 750 m en sus extremos sureste y noroeste, respectivamente. Localmente, se presentan condiciones de confinamiento que provocan artesianismo.

El medio poroso se depositó en el valle que representa la fosa tectónica y tiene un espesor que varía de 150m en su porción sur a 460m en su extremo norte. El medio fracturado está representado por rocas volcánicas de composición félsica que presentan espesores que varían de 250 a 550m en las zonas de recarga; en tanto que en el valle se estima que las rocas que forman parte del acuífero tienen un espesor de 200 a 350 m.

A mayor profundidad las rocas calizas presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y constituyen otra unidad que no ha sido aún explorada, pero se tiene evidencia de ellas en los trabajos mineros, principalmente en acuíferos vecinos.

Las formaciones calcáreas Benigno y Chihuahua llegan a tener mayores espesores que las rocas volcánicas, sin embargo su limitada extensión disminuye su potencial acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades desarrolladas en el 2009, se realizaron 6 pruebas de bombeo, 3 de ellas tanto en la etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 4 a 12 horas. De su interpretación por diversos métodos, se deduce que los valores de transmisividad varían de 5 m²/d a 1200 m²/d (5.8×10^{-5} a 13.9×10^{-3} m²/s) con un valor promedio de **433 m²/d (5.0×10^{-3} m²/s)**, en tanto que la conductividad hidráulica presenta valores que oscilan entre **0.04 y 8.8 m/d (4.6×10^{-7} a 1.0×10^{-4} m/s)**.

Ninguna prueba contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener el valor del coeficiente de almacenamiento de la manera tradicional. Sin embargo, el valor de rendimiento específico S_y se estima que varía **de 0.10 a 0.16**, obtenido mediante la interpretación de las pruebas de bombeo por el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton, con un valor promedio de 0.13, que por correlación hidrogeológica coincide con los acuíferos vecinos que presentan una geología similar.

5.3 Piezometría

Se cuenta con información piezométrica generada en los años 2005 y 2009, obtenida en una red de monitoreo conformada por 23 pozos, distribuidos en la mayor superficie de explotación del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Para el año 2005 la configuración de profundidad al nivel estático muestra valores que varían de 30 a 80 m. En la zona norte (Sacramento) se registran profundidades de 30 a 60 m, en tanto que en la porción noroccidental de la ciudad de Chihuahua se presentan los valores máximos 80 metros, los cuales disminuyen por efecto topográficos hacia el límite oriental del acuífero, al aproximarse al cauce del Río Chuvíscar (figura 4).

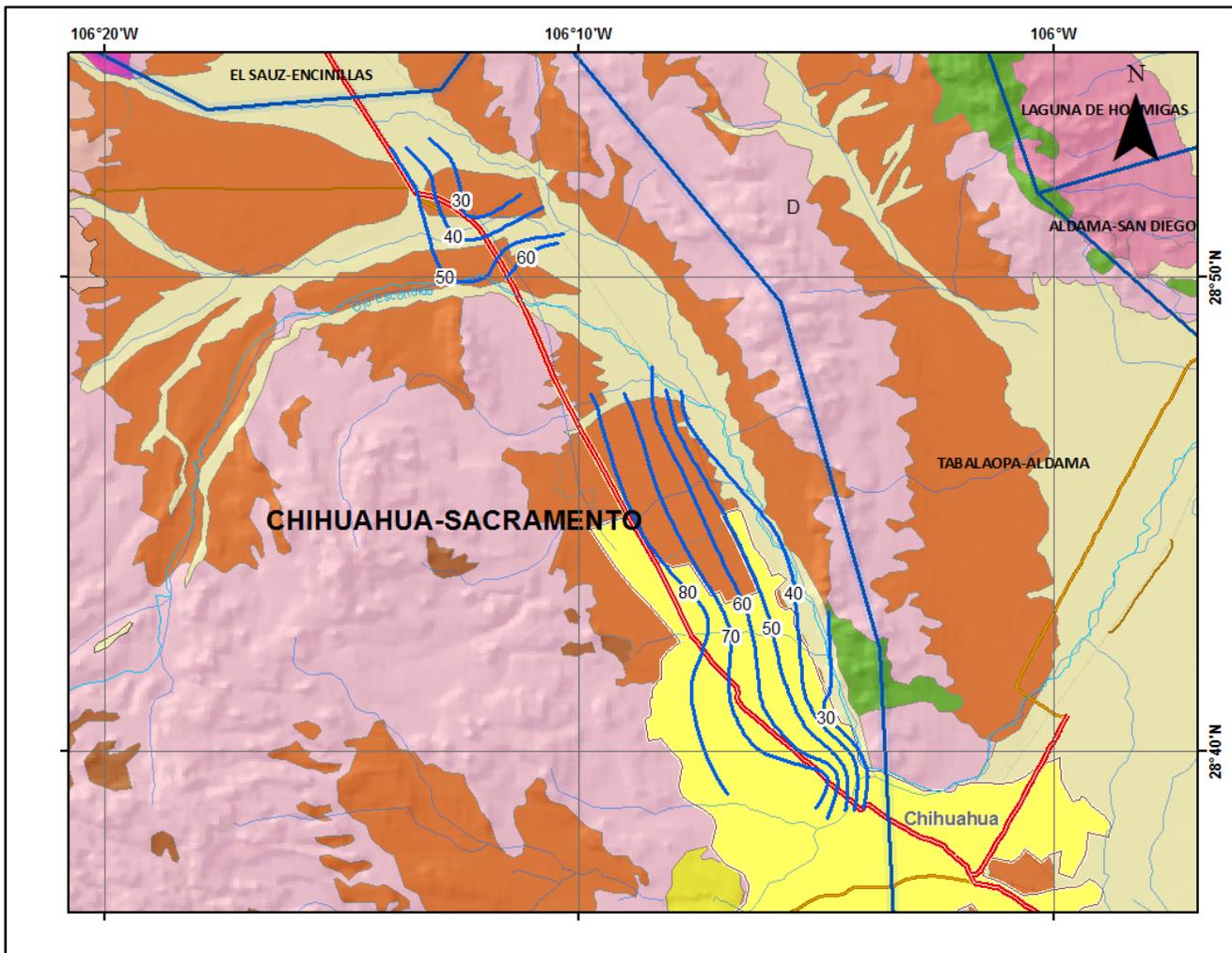


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2005)

Para el año 2009 se registraron niveles someros en localidades como Nuevo Majalca y Col. Ocampo, ubicados al norte y noroeste del acuífero, registrados en norias perforadas en el subálveo del río y que por lo tanto no representan los niveles de explotación de los pozos.

Los valores varían de 20 a 100 m, los más someros se registran en la porción norte, hacia la zona de Sacramento, y hacia el este de la ciudad de Chihuahua; los más profundos se presentan en la ciudad de Chihuahua (por concentración del bombeo) y hacia el límite occidental del acuífero por efecto topográfico (figura 5).

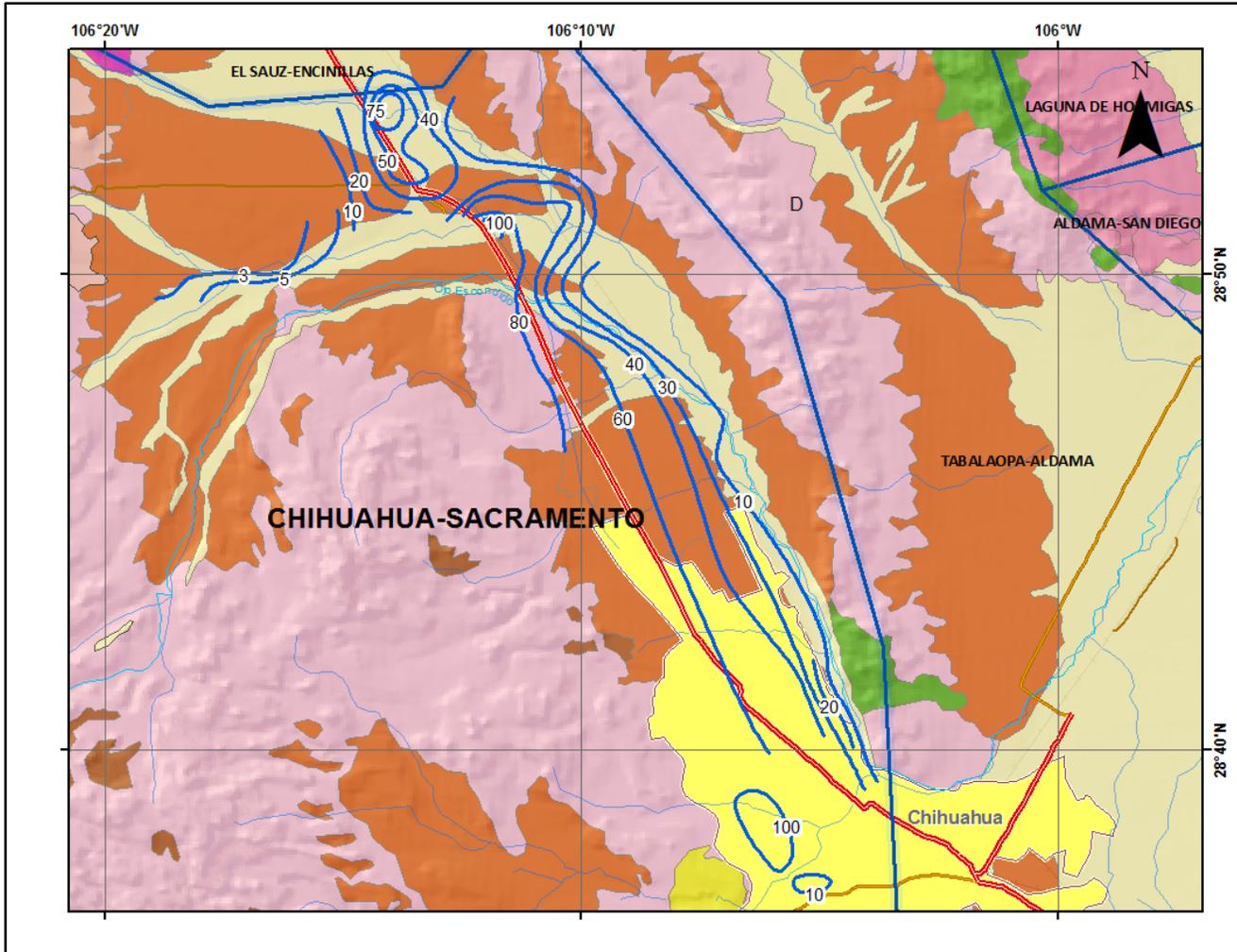


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2009)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático para el año 2005, mostrada en la figura 6, se observa que los valores varían de 1570 a 1360 msnm. Las menores elevaciones se registran en torno de la ciudad de Chihuahua, donde la extracción por bombeo genera un cono de abatimiento, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia los flancos este y oeste que representan las sierras que delimitan el acuífero y hacia el norte.

La dirección preferencial del flujo subterráneo muestra una trayectoria en sentido noroeste-sureste, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental, para finalmente converger en la

zona urbana de la ciudad de Chihuahua, en las configuraciones piezométricas recientes (2009) se aprecian dos conos de abatimiento, uno pequeño en la porción norte en las inmediaciones de la población de Sacramento y otro mayor en el área urbana la ciudad de Chihuahua.

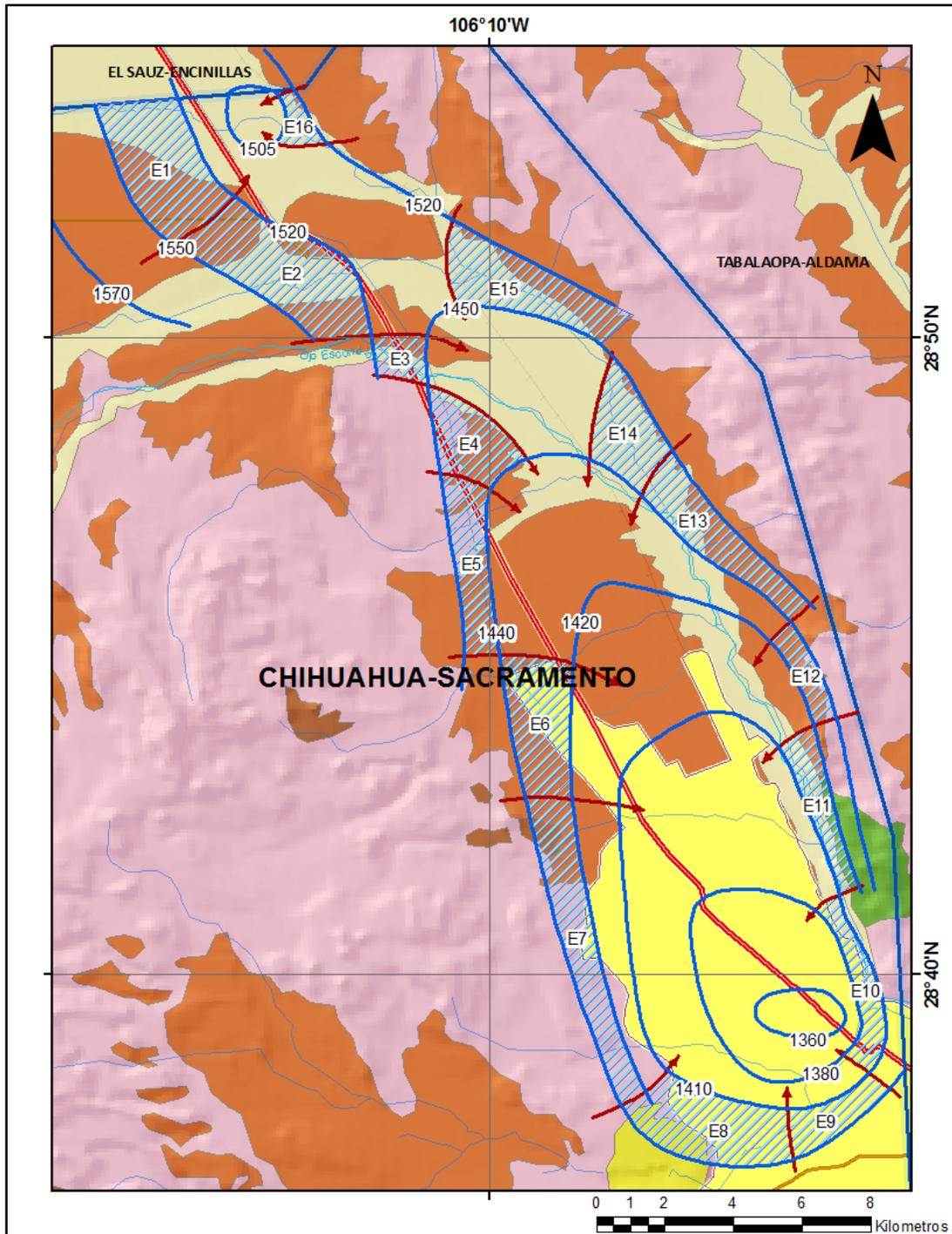


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm. (2005)

Para el año 2009 los valores de elevación varían de 1680 a 1380, mostrando la misma distribución espacial que para el año 2005 (figura 7). En la porción Norte es evidente la aparición de un cono de

abatimiento causado por la batería de pozos El Sauz. En Colonia Sacramento se presenta un cono de abatimiento con valores inferiores de 1420 msnm. Hacia la ciudad de Chihuahua los valores varían desde el norte de 1460 hasta los 1380 msnm y al sur de Labor de Terrazas se presentan valores de 1520 msnm, los cuales decrecen con rumbo noreste hacia dicha ciudad, en donde forman un cono de abatimiento que han interceptado las salidas subterráneas hacia el acuífero vecino Tabalaopa-Aldama. Esto es evidente desde la configuración del 2005.

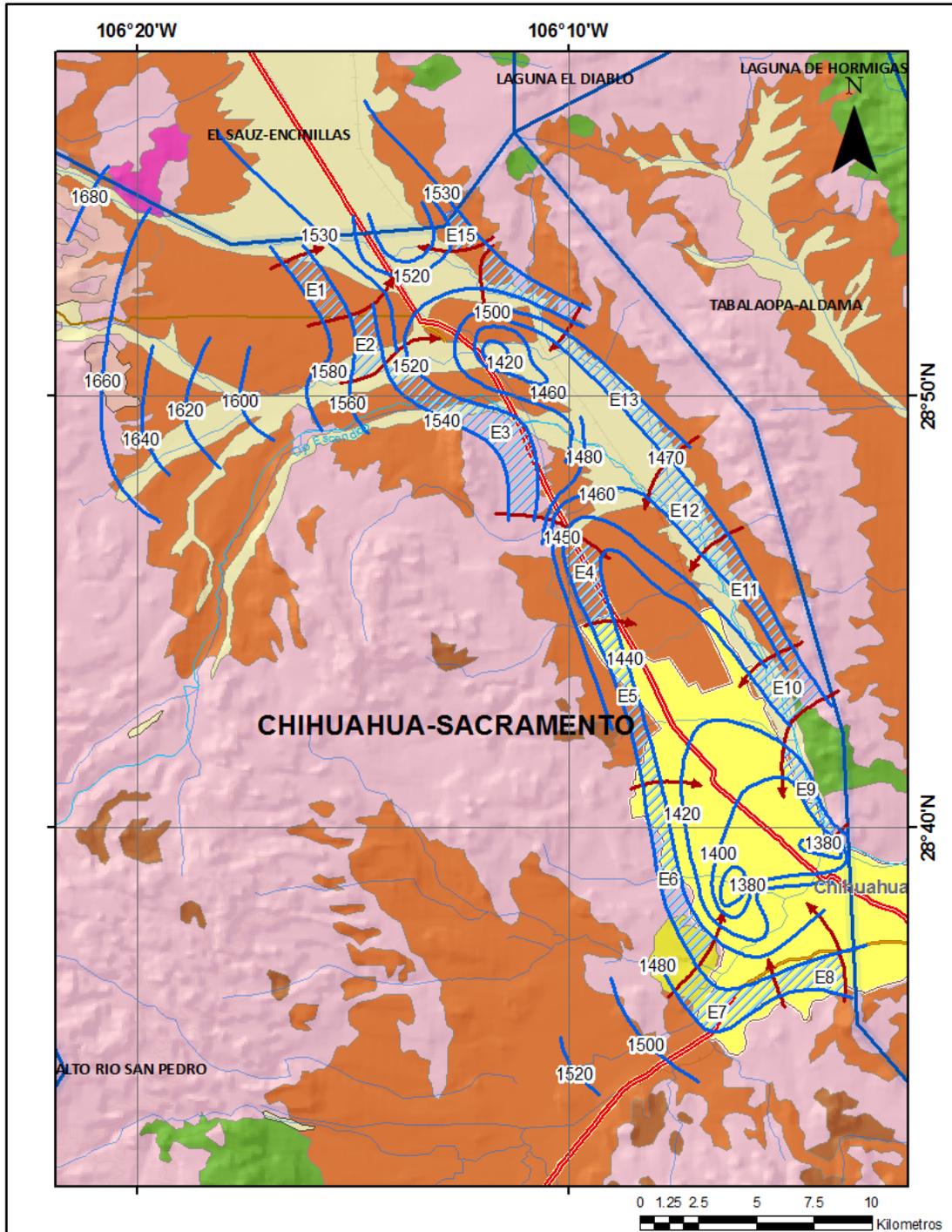


Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con la información piezométrica correspondiente a los años 2005 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 1 a 1.5, localmente hasta los 5 m en Colonia Sacramento.

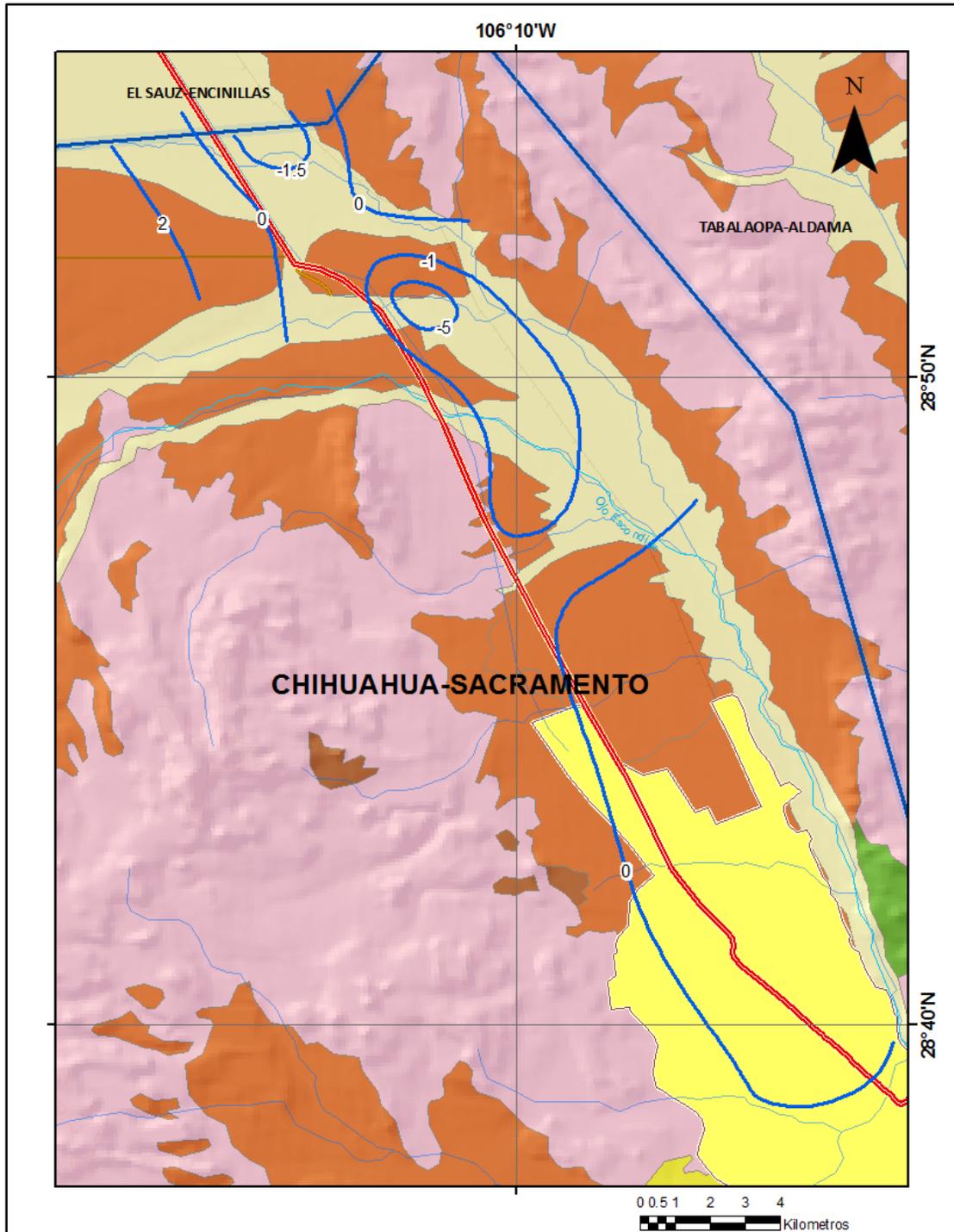


Figura 8. Evolución anual del nivel estático en m (2005 – 2009)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Para la caracterización hidrogeoquímica se consideraron los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a 73 muestras de agua subterránea, 43 obtenidas durante el estudio realizado en el año 2005 para la Comisión Nacional del Agua por la empresa Consultores y Constructores del Norte, S.A. de C.V. y 30 que fueron practicados por la JMAS en 2001 en los pozos destinados al abastecimiento de agua potable. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, Fe, Mn, As, Fluoruros, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos.

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que la concentración de Sólidos Totales Disueltos es menor a los 500 ppm, inferior a las 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 desde el norte y desde las estribaciones de las sierras hacia el centro del acuífero.

En cuanto a la concentraciones de fluoruros, se registraron valores elevados (4 ppm) en el norte de la ciudad de Chihuahua y de Arsénico con concentraciones inferiores a 0.02 ppm.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2009, en el acuífero existe un total de 602 aprovechamientos de aguas subterráneas de los cuales 331 se encuentran activos y los 271 restantes inactivos. Del total de obras 527 son pozos y 75 norias.

El volumen de extracción total calculado es de **67.2 hm³** anuales, de los cuales 52.4 hm³ (78 %) se destinan al abastecimiento de agua potable, principalmente para la ciudad de Chihuahua, 10 hm³ (15 %) para uso agrícola y los 4.8 hm³ restantes (7 %) para otros usos menores.

Es importante mencionar que el uso público urbano en años anteriores manejaba caudales más altos, ya que cuenta con una concesión del orden de los 80 hm³.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2005-2009, en una superficie de 232 km², 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:

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

Donde:

R_v= Recarga vertical;

E_h= Entradas subterráneas por flujo horizontal;

R_i= Recarga inducida;

B= Bombeo;

ΔV(S)= Cambio en el volumen de almacenamiento;

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero Las entradas están integradas por la recarga natural (R_v) 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 (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y de los retornos en pérdidas del sistema de red de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que existe información para estimar el cambio de almacenamiento (ΔV) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1).

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para los años 2005 y 2009 (figuras 6 y 7), mediante la siguiente expresión:

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

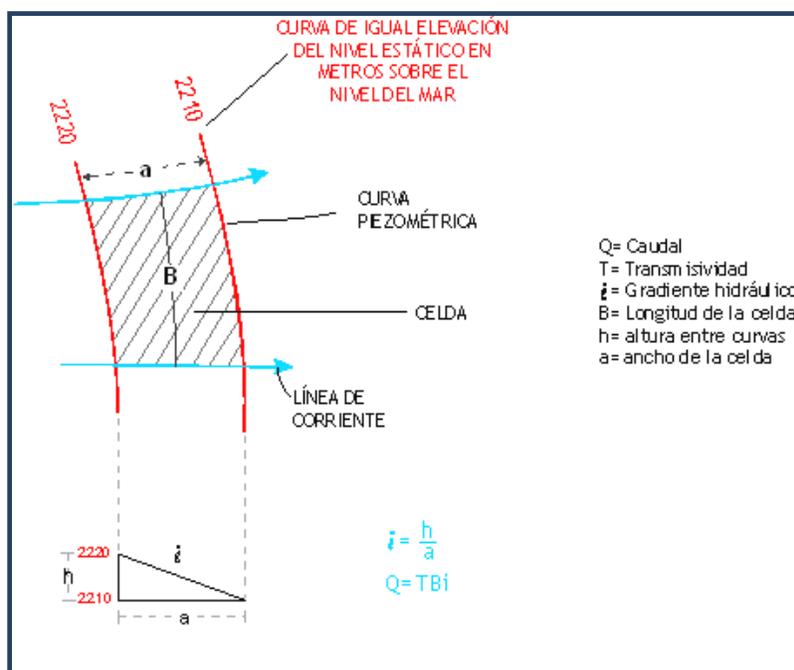
Donde:

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 2005 y 2009 se presenta en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Cálculo de flujos horizontales de recarga a través de tubos o canales de flujo año 2005

Celda	Longitud B (m)	Ancho a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T (m ² /s)	Caudal Q (m ³ /s)	Volumen V (hm ³ /año)
E1	4,015	2,117	30	0.0142	0.0012	0.0683	2.2
E2	4,967	2,072	30	0.0145	0.0012	0.0863	2.7
E3	1,255	1,287	70	0.0544	0.0006	0.0410	1.3
E4	1,977	2,320	10	0.0043	0.0012	0.0102	0.3
E5	5,123	970	10	0.0103	0.0012	0.0634	2.0
E6	4,091	1,480	20	0.0135	0.0012	0.0663	2.1
E7	9,147	928	20	0.0216	0.0006	0.1183	3.7
E8	4,273	1,953	30	0.0154	0.0006	0.0394	1.2
E9	3,061	999	30	0.0300	0.0012	0.1103	3.5
E10	5,280	682	30	0.0440	0.0012	0.2787	8.8
E11	4,672	850	10	0.0118	0.001	0.0550	1.7
E12	2,877	777	20	0.0257	0.0006	0.0444	1.4
E13	5,439	1,267	10	0.0079	0.001	0.0429	1.4
E14	1,920	2,192	10	0.0046	0.001	0.0088	0.3
E15	4,924	1,687	70	0.0415	0.001	0.2043	6.4
E16	1,654	775	15	0.0194	0.001	0.0320	1.0
Total entradas							40.0

Tabla 3. Cálculo de flujos horizontales de recarga a través de tubos o canales de flujo año 2009

Celda	Longitud B (m)	Ancho a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T (m ² /s)	Caudal Q (m ³ /s)	Volumen V (hm ³ /año)
E1	3,124	1,110	20	0.0180	0.0012	0.0675	2.1
E2	2,709	1,106	20	0.0181	0.0012	0.0588	1.9
E3	8,766	1,309	20	0.0153	0.0006	0.0804	2.5
E4	3,611	1,250	10	0.0080	0.0012	0.0347	1.1
E5	7,151	716	10	0.0140	0.0012	0.1198	3.8
E6	7,643	1,023	10	0.0098	0.0006	0.0449	1.4
E7	4,004	1,809	30	0.0166	0.0012	0.0797	2.5
E8	2,650	1,358	30	0.0221	0.0012	0.0703	2.2
E9	3,780	826	20	0.0242	0.001	0.0915	2.9
E10	2,643	1,951	30	0.0154	0.001	0.0406	1.3
E11	5,317	1,013	10	0.0099	0.001	0.0525	1.7
E12	3,655	1,633	10	0.0061	0.001	0.0224	0.7
E13	6,522	849	30	0.0353	0.001	0.2305	7.3
E14	4,010	1,134	10	0.0088	0.001	0.0354	1.1
E15	1,600	1,090	10	0.0092	0.001	0.0147	0.5
Total entradas							32.9

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. Debido a que se elaboraron dos configuraciones del nivel estático para los años 2005 y 2009 que muestran una red de flujo similar, para el cálculo de entradas se tomará un valor promedio de ambas.

El valor total promedio de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **36.5 hm³ anuales**.

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 las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. A 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. Para este caso, se consideró que un 20 % de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando una profundidad media al nivel del agua subterránea de 80 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo, la recarga por retornos de riego es de 2.0 hm³ anuales.

Según información del año 2008 presentada en el estudio Diagnóstico, Modelación y Planificación de Sectores en la Red de Distribución de Agua Potable de Chihuahua, Chih. Parte I. Diagnóstico, IMTA – JMAS, de un volumen de 109.8 hm³ anuales destinado al uso público-urbano, se estimó un volumen de 15.7 hm³ como fugas en la red de distribución de agua, que representa el 14.3% del volumen extraído. Si consideramos que un 60 % del volumen de fugas se logra infiltrar al acuífero, y lo aplicamos a las pérdidas por infiltración, se obtiene que la recarga por fugas en la red de agua potables es de 4.5 hm³ anuales.

Por lo tanto la suma de las recargas por retornos de riego y por fugas en la red de agua potable es el volumen total de recarga inducida que recibe el acuífero y asciende a **Ri = 6.5 hm³ anuales**.

7.2 Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para este caso ocurren únicamente por bombeo (B). No existen salidas subterráneas horizontales (Sh), descargas por evapotranspiración, flujo base ni manantiales. Por lo que **Sh = 0**.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **67.2hm³/año**, destinando en su mayor parte al uso público-urbano.

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 2005 - 2009. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.13 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, la posición del nivel piezométrico ha descendido en algunas zonas y aumentado en otras, propiciando variaciones tanto positivas como negativas del almacenamiento. El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento anual (2005 - 2009)

Curva de evolución	Área de influencia	Volumen hm^3	S_y	$\Delta V S_y (\text{hm}^3)$
2	6.60	13.20	0.13	1.72
-1.5	3.90	-5.85	0.13	-0.76
-1	38.00	-38.00	0.13	-4.94
-5	10.20	-51.00	0.13	-6.63
0	173.20	0.00	0.13	0.00
SUMA	231.9	-81.7	0.7	-10.6

El cambio neto de almacenamiento es de $\Delta VS = - 10.6 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Solución a la ecuación de balance

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

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

$$R_v = - 10.6 - 36.5 - 6.5 + 67.2$$

$$R_v = 13.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned}R_t &= R_v + E_h + R_i \\R_t &= 13.6 + 36.5 + 6.5 \\R_t &= 56.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 siguiente expresión:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

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 **56.6 hm³/año**.

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 Chihuahua – Sacramento no se consideran descargas naturales comprometidas. Por lo tanto la **DNCOM = 0**.

8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

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 101'738,018m³/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.

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)}$$

$$DAS = 56.6 - 0.0 - 101.738018$$

$$\mathbf{DAS = - 45.138018 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

El resultado actual indica que no existe disponibilidad de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones. Por el contrario su **déficit es de 45'138,018 m³ anuales** que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

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 hacia los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior, para su actualización.

9. BIBLIOGRAFIA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos. 1980. Prospección Geofísica de los Valles El Sauz y Tabalaopa, Chihuahua, para Proporcionar Agua en Bloque a la Ciudad de Chihuahua, Chih. Elaborado por la empresa PROYESCO, S. A.

Comisión Nacional del Agua. 1996. Actualización de las mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en 1996 (PROMMA), en los estados de Sonora y Chihuahua. Elaborado por la empresa Técnicas Geológicas y Mineras, S. A. de C. V.

Comisión Nacional del Agua. 2001. Modelo de Simulación Hidrodinámica de los acuíferos Chihuahua – Sacramento, Chih. Y Chupaderos, Zac. Elaborado por la empresa Ariel Consultores, S. A.

Comisión Nacional del Agua. 2005. Monitoreo Piezométrico de los acuíferos de Ascensión, Palomas – Guadalupe Victoria, Valle de Juárez y Chihuahua – Sacramento y Calidad del Agua de los Acuíferos Chihuahua Sacramento y Tabalaopa – Aldama del estado de Chihuahua. Elaborado por la empresa Consultores y Constructores del Norte S. A. de C. V.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento, Chihuahua. 2008. Diagnóstico, Modelación y Planificación de Sectores en la red de distribución de Agua Potable de Chihuahua, Chih. Parte I. Diagnóstico. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

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.