

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Cedral-Matehuala
(2407), Estado de San Luis Potosí***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CCCXCV REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "CUENCAS CENTRALES DEL NORTE"

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					

ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

2407	CEDRAL-MATEHUALA	17.5	1.3	19.729229	15.9	0.000000	-3.529229
------	------------------	------	-----	-----------	------	----------	-----------

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



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 CEDRAL-MATEHUALA (2407), ESTADO
DE SAN LUIS POTOSÍ***

México, D.F., enero 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.....	4
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1. Provincia fisiográfica.....	6
3.2. Clima.....	7
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1. Estratigrafía.....	10
4.2. Geología estructural.....	16
4.3. Geología del subsuelo.....	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.1. Tipo de acuífero.....	18
5.2. Parámetros hidráulicos.....	18
5.3. Piezometría.....	19
5.4. Comportamiento hidráulico.....	19
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	20
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	21
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	23
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	24
7.1. Entradas.....	25
7.1.1. Recarga natural (Rn).....	26
7.2. Salidas.....	28
7.2.1. Bombeo (B).....	28
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	28
7.2.3. Salida a través de manantiales (Dm).....	29
8. DISPONIBILIDAD.....	30
8.1. Recarga total media anual (Rt).....	30
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM).....	30
8.3. Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS).....	30
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA.....	31

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

Cubriendo una superficie de 1954 km² de la porción norte del estado de San Luis Potosí, el acuífero Cedral-Matehuala está definido con la clave 2407 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA. Geográficamente, el área se ubica aproximadamente entre los paralelos 23° 29' y 24° 14' de latitud norte y entre los meridianos 100° 27' y 100° 51' de longitud Oeste, comprendiendo la totalidad del municipio Villa de la Paz y la mayor parte de los municipios de Cedral y Matehuala y pequeñas porciones de Catorce, Villa de Guadalupe y Vanegas.

Limita al norte con el acuífero El Peñuelo-San José El Palmar, al oriente con el acuífero Santa Rita-Cruz de Elorza, ambos del estado de Nuevo León. Al sur con Matehuala-Huizache y al occidente con Vanegas-Catorce, estos últimos del estado de San Luis Potosí (Figura 1).

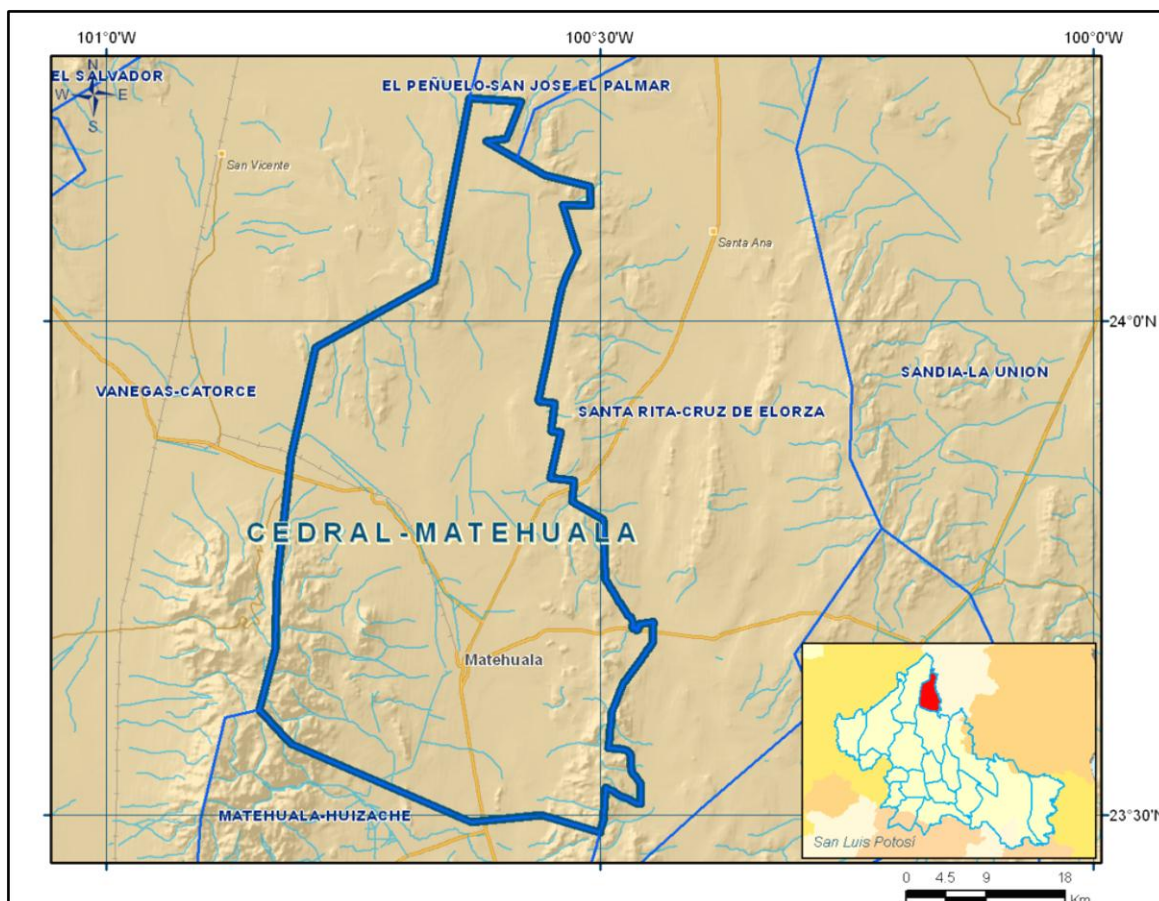


Figura 1. Localización del acuífero.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2407 CEDRAL-MATEHUALA

VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	30	0.3	23	28	55.1	
2	100	33	33.9	23	29	58	
3	100	37	49.5	23	29	33.8	
4	100	48	48	23	34	20.3	
5	100	50	41.7	23	36	26.3	
6	100	49	46.8	23	40	5.8	
7	100	49	40.3	23	44	13.4	
8	100	48	46.5	23	51	47.2	
9	100	47	18.3	23	58	24	
10	100	40	3.8	24	2	26.3	
11	100	37	56.1	24	13	31.1	DEL 11 AL 12 POR EL LÍMITE ESTATAL
12	100	35	4.6	24	9	50.8	DEL 12 AL 1 POR EL LÍMITE ESTATAL
1	100	30	0.3	23	28	55.1	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cedral-Matehuala pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local San Luis Potosí. La mayor parte de su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “*Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los municipios de Vanegas, Cedral y Matehuala*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de octubre de 1964. Esta veda es tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2010, los municipios de Cedral y Matehuala se localizan en zona de disponibilidad 3, Villa de La Paz, Catorce y Vanegas en zona 4 y Villa de Guadalupe en zona 5.

El usuario principal del agua es el sector agropecuario. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca (14) Altiplano, instalado el 21 de noviembre de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

El número de estudios disponibles relacionados con los recursos hídricos de la región de Matehuala y zonas aledañas es muy reducido, sobre todo en lo que respecta al estudio de las aguas subterráneas.

El estudio más antiguo del que se tiene registro, es el **INFORME DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR EN LA ZONA DE CEDRAL-VANEGAS, S.L.P. (1972) elaborado por Hidrotec, S.A., para la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos**. Este trabajo está compuesto por tres tomos de los cuales solo estuvo disponible el segundo, el cuál presenta: planos geológicos y de localización de perforaciones, exploraciones propuestas, pozos con muestras de agua, curvas de igual resistividad y resultados de la interpretación de 20 pruebas de bombeo. Debido a que no se logró conseguir el estudio completo no fue posible definir el objetivo ni los resultados de tal investigación.

En situación similar, en **1975**, se encuentra el estudio elaborado por la **empresa Geohidrológica Mexicana, S.A., para la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos**, denominado **SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS, EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, ZONA EL SALADO, ZONA CEDRAL-MATEHUALA, ZONA VANEGAS-ESTACIÓN BERRENDO**, el cual consta de dos tomos y sólo se tuvo acceso al segundo, que consiste en una serie de planos. Se desconoce también cuáles fueron los objetivos

y resultados obtenidos; sin embargo, al igual que en el caso anterior los planos identificados se utilizaron para tener una idea general de las diversas condiciones hidrogeológicas (direcciones de flujo, propiedades hidráulicas, calidad del agua).

En 1979, la empresa Geohidrológica Mexicana, S.A., elaboró el estudio llamado SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DE CHARCO BLANCO-MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ, elaborado para la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El objetivo de este trabajo consistió en determinar la localización de conductos cársticos en las formaciones calcáreas aflorantes, las cuales están relacionadas con las zonas de mayor permeabilidad, y proponer sitios para pozos exploratorios. Otro objetivo consistió en realizar un censo de aprovechamientos de aguas subterráneas y determinar su calidad.

En 1981 la empresa Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A. elaboró el ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CON FINES DE ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD DE MATEHUALA, S.L.P., para la entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas y tuvo como objetivos principales: i) determinar las condiciones de explotación del acuífero de la zona "Matehuala-Cedral-Vanegas", S.L.P.; ii) cuantificar la recarga para establecer la factibilidad de extraer volúmenes adicionales de agua subterránea, sin inducir efectos perjudiciales; iii) definir a nivel anteproyecto las características constructivas y de operación de las captaciones subterráneas con fines de abastecer a la ciudad de Matehuala; y, iv) analizar mediante un modelo simplificado, la posible repuesta piezométrica del acuífero ante varias políticas de extracción.

Razo Soto, 2002, en su tesis de maestría, titulada EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE METALES Y DEL RIESGO EN SALUD EN UN SITIO MINERO DE SULFUROS POLIMETÁLICOS: CASO DE VILLA DE LA PAZ-MATEHUALA, S.L.P. (MÉXICO), demostró la existencia de una elevada contaminación por arsénico en el área de descarga del acuífero localizada al nororiente de la ciudad de Matehuala. Esta agua es captada en un sistema de canales subterráneos y es conducida por gravedad hasta salir a superficie cerca de la comunidad de Cerrito Blanco, en el centro del valle. Este estudio registra elevados valores de arsénico en algunas muestras de agua superficial y subterránea, además de muestras de suelos, pero no demuestra su proveniencia ni su comportamiento en las zonas próximas al área de ese estudio.

Bueno Pedroza, 2005, en su tesis de maestría titulada INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE LA PARTE NORTE DEL ALTIPLANO POTOSINO, identifica la distribución de las características químicas del agua subterránea en el acuífero Cedral-Matehuala, estableciendo las limitantes que presenta en relación con el uso al que se le destina y las modificaciones geoquímicas que se han producido debido al manejo al que hasta ahora ha estado sujeto.

Castro Larragoitia y colaboradores, 2005, en el reporte final del proyecto APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA PARTE NORTE DEL

ALTIPLANO POTOSINO concluyeron, entre otras cosas, que con el aumento de la profundidad de las extracciones disminuye la transmisividad del acuífero libre, por lo que los nuevos aprovechamientos presentan menores gastos con aumento de la profundidad, así mismo muestran que la principal zona de explotación en los alrededores de Cedral se está extrayendo agua con edades superiores a los 1000 años, y esta edad aumenta en dirección al SE al igual que la concentración de iones disueltos por lo que se presenta la necesidad de replantear el esquema de extracción y distribución una vez que se disponga de un modelo numérico confiable.

Pérez Morán, 2006, en su tesis de licenciatura titulada **DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS CON MÉTODOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS EN EL ACUÍFERO CEDRAL-MATEHUALA, S.L.P.**, se enfoca en la determinación de la distribución espacial de parámetros hidráulicos, específicamente la conductividad hidráulica, mediante la interpretación de pruebas de bombeo utilizando métodos analíticos y numéricos.

Núñez Pérez, 2007, presentó su tesis de licenciatura denominada **DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO CEDRAL-MATEHUALA**, en la que utilizando modelos básicos de vulnerabilidad obtiene resultados que señalan a la zona colindante al N de la ciudad de Matehuala como una de las más vulnerables para impactar el acuífero subyacente.

En 2007 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó, a través de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la **ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN EL ACUÍFERO CEDRAL-MATEHUALA, S.L.P.**, para el Organismo de Cuenca “Cuencas Centrales del Norte”, Dirección Local en San Luis Potosí. El proyecto tuvo como objetivo general, el conocimiento de las condiciones geohidrológicas mediante un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, así como contar con información necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y establecer la disponibilidad media anual de agua subterránea. Además, conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona, determinar la calidad del agua a partir de parámetros fisicoquímicos medidos en campo y en laboratorio.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El área se localiza en su totalidad a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental (INEGI, 2002) la cual abarca desde la frontera norte del país hasta la provincia del Eje Neovolcánico, en las inmediaciones de Pachuca, Hidalgo. Tiene una orientación preferencial paralela a la costa del Golfo de México, pero a la altura de Monterrey, N. L., una parte de ella cambia su dirección hacia el oeste para extenderse hasta la Sierra Madre Occidental, al norte de Cuencamé, Durango.

Comprende parte de los estados San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz.

La Sierra Madre Oriental es una cordillera cuyo relieve se relaciona con la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal, que fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste formando pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide. A lo largo del frente de este cinturón se distinguen varios sectores que tienen variantes internas en el estilo y orientación de deformación.

El levantamiento del frente de la Sierra Madre Oriental es impreciso, nuevos datos radiométricos revelan que el sepultamiento máximo y levantamiento en ese frente, pudo ocurrir en el Eoceno Superior, con deformación máxima compresiva y levantamiento en el frente de montaña durante el Eoceno Tardío–Oligoceno Temprano, pero la migración de la deformación de la zona interna hacia la zona externa está poco documentada.

En un mayor detalle es posible establecer que la zona pertenece a la Subprovincia Fisiográfica Sierras y Llanuras Occidentales de la Sierra Madre Oriental, que comprende el occidente de la mitad sur de la Sierra Madre Oriental, en la Subprovincia se encuentran sierras en las que predominan rocas calizas, orientadas norte–sur y generalmente enlazadas por brazos cerriles que siguen la misma dirección o son oblicuos a las sierras. Esta configuración produce una especie de red de sierras entre las cuales se encuentran llanuras cubiertas de aluvión. Las llanuras del norte se encuentran a unos 2000 msnm; las del sur a unos 1500 msnm. El territorio de la Subprovincia se distribuye entre los estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas.

La Sierra de Catorce, al pie de la cual está ubicada la ciudad de Matehuala, define el límite occidental de la Subprovincia y es la de mayor importancia y magnitud. No se encuentra ligada con las otras sierras cercanas y su cumbre más elevada es la del Cerro Grande que está a 3180 msnm. El Cerro de Picacho Alto, que pertenece a la Sierra Azul, al norte del área de estudio, tiene una altitud mayor a los 2330 msnm. Todas estas sierras son escarpadas y más o menos alargadas. Esta zona de interés sobresale por ser la más árida del estado de San Luis Potosí, donde no hay una red de drenaje bien organizada.

Al oriente y sur de las Sierras de Catorce y Coronado, se localizan los sistemas de topofomas de bajadas con lomeríos; bajadas de menor extensión y sin lomeríos o con llanuras se encuentran dispersas en la Subprovincia.

3.2. Clima

Esta zona sobresale por ser la más árida del estado de San Luis Potosí. Debido a los altos índices de evaporación (1600 a 2300 mm/año) y las bajas precipitaciones (270 a 525 mm/año), el área está clasificada como semiárida a árida. La región se caracteriza por presentar dos climas

generales característicos: i) en la zona de sierra el clima templado y ii) en las planicies el clima seco. Como se describe en la clasificación de climas de Köppen modificado por García (1983), para las condiciones de la República Mexicana, en el área se determinaron las siguientes regiones climáticas:

Las zonas templadas se localizan en las Sierra de Catorce, donde sus flancos se caracterizan por ser subhúmedos con lluvias en verano C(Wo (x'), a diferencia de la zona topográfica más alta que es semifrías, subhúmeda con lluvias en verano C(E)(W1). Los climas secos preponderantes incluyen el seco semicálido con lluvias en verano (BS0hw(x') para la zona de Matehuala, con precipitación y temperatura medias anuales de 534 mm y 18.8° C respectivamente.

Se registra el clima seco templado con lluvias en verano (BS0kw(x'), para la franja adyacente que rodea a la Sierra de Catorce y el clima seco templado con lluvias escasas (BS0kx') al norte de Cedral.

Por último, se tiene el clima seco semicálido con lluvias escasas todo el año (BS0hx') con precipitación y temperatura medias anuales de 300 mm y 17.7° C, para la zona de Estación Vanegas, en la región noroeste de la zona.

Se obtuvo información climatológica (precipitación evaporación y temperatura) de las estaciones ubicadas en Cedral, Vanegas y Matehuala, solo en esta última se consiguió información completa de evaporación, en las dos restantes los registros fueron muy esporádicos por lo que no se consideraron.

La temperatura media anual en el área del acuífero es de 17.6° C, mientras que la precipitación media anual es de 412 mm.

3.3. Hidrografía

Esta región presenta escasas corrientes que se forman en la temporada de lluvias (la mayor parte de ellas dentro de los meses de mayo a octubre) y su curso es de muy corta longitud, ya que comúnmente desaparecen en las llanuras debido a procesos de evaporación y/o infiltraciones. Este drenaje pertenece a las cuencas interiores de la Región Hidrológica No. 37 El Salado, que abarca la parte centro y norte del estado de San Luis Potosí, es decir, la altiplanicie septentrional del país, a la altura del Trópico de Cáncer. Específicamente, la zona está emplazada en la cuenca hidrográfica No. 37-BRH Matehuala que cubre una superficie de 7284 km² de extensión.

Los escurrimientos que se presentan en esta cuenca provienen de las sierras de Catorce y San Bartolo. De las pocas corrientes con alguna denominación, se tienen los arroyos La Maroma, El Astillero y Las Pilas. Dentro de esta misma cuenca se localizan las subcuencas Matehuala (37-BA), Huertecillas (37-BB) y Catorce (37-BC). (INEGI, 2003).

Con esto se establece que la zona de recarga se encuentra en la parte oeste y norte del área, es decir, en la Sierra de Catorce y Cedral-Vanegas respectivamente, mientras que la zona de descarga la constituye la parte sur del área.

3.4. Geomorfología

En la zona se observa que existen sierras bajas alargadas, con orientación preferencial norte-sur, como evidencia de las diversas estructuras de sinclinales y anticlinales por plegamiento de rocas sedimentarias mesozoicas. Aunque no existe una red hidrográfica bien definida, la zona se caracteriza por presentar una severa etapa de erosión que ha desaparecido importantes espesores de rocas sedimentarias de las zonas topográficamente mayores. Excepto la Sierra de Catorce, que es alta y abrupta, la mayor parte de las restantes sierras se caracterizan por ser redondeadas. Por otra parte, las llanuras conforman cuencas endorreicas rodeadas de diferentes abanicos aluviales que tienden a unirse formando laderas de pendiente suave.

4. GEOLOGÍA

En las inmediaciones de la zona se detecta la presencia de diversas unidades geológicas, con origen y naturaleza variadas, que incluyen rocas sedimentarias marinas y continentales, así como rocas ígneas y metamórficas de contacto.

Las rocas sedimentarias constituyen las unidades geológicas de mayor distribución tanto en la superficie como en el subsuelo. Las de origen marino afloran ampliamente en las elevaciones que se presentan en los flancos oriental y occidental de la zona, dispuestas en estructuras plegadas de orientación preferencial N-S, conformando las mayores elevaciones topográficas. Los materiales sedimentarios de origen continental se presentan, preferentemente, en las zonas topográficas de menor elevación, distribuyéndose en las zonas de pie de monte de los cerros y en la planicie central Huizache-Matehuala-Cedral.

En lo que se refiere a las rocas ígneas intrusivas, existen al menos dos afloramientos importantes. Uno de ellos se presenta en los alrededores del poblado de la Paz y el otro en Real de Catorce, poblaciones cuyos yacimientos minerales están íntimamente ligados con estas rocas intrusivas. Las rocas ígneas extrusivas comprenden pequeños derrames de basaltos que tienen una extensión muy limitada, presentándose en la zona de Cedral-Vanegas. Las rocas metamórficas afloran en el flanco oeste de la Sierra de Catorce, cercanas al poblado de Real de Catorce. Figura 2.

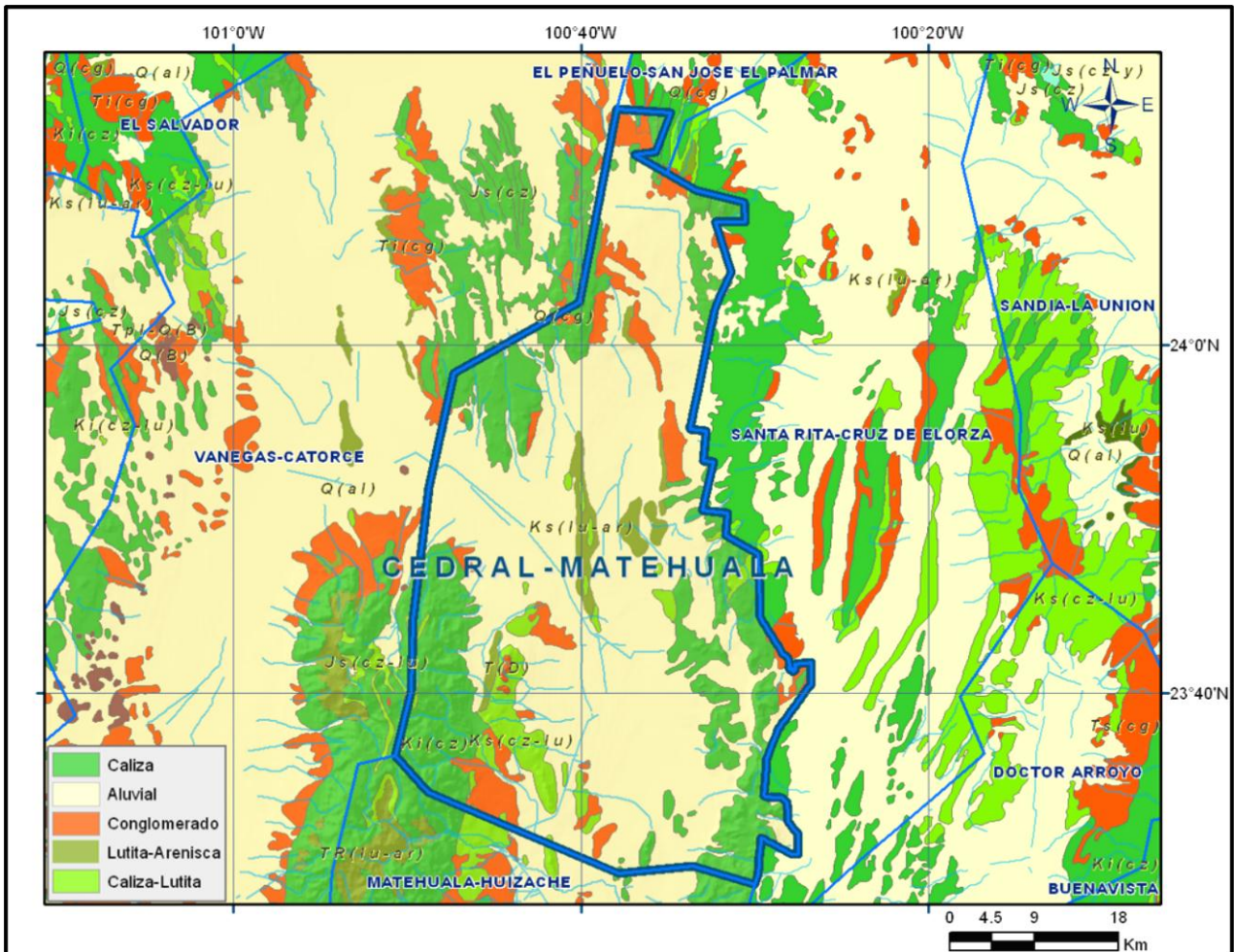


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

A continuación se presenta una descripción de las diferentes formaciones estratigráficas que afloran en el área

Unidades Pre-Mesozoicas

Rocas Metamórficas del Paleozoico (Ps F-E)

A pesar de que la mayoría de las perforaciones para pozos profundos no han registrado afloramientos de rocas Pre-Mesozoicas, existen algunos afloramientos de estas rocas dentro de La Sierra Madre Oriental, los más famosos se localizan en el Anticlinorio Huizachal-Peregrina cercano a Ciudad Victoria, Tamaulipas. Estos afloramientos consisten de rocas metamórficas de origen ígneo como el gneis Novillo (Precámbrico), esquisto Granjeno (Paleozoico) y sedimentos Paleozoicos no metamórficos de edad Siluriano y Pérmico Inferior. Dentro de la zona solo se encuentra un pequeño afloramiento de rocas metamórficas (filita-esquisto) en la Sierra de Catorce, específicamente al noroeste del municipio de Real de Catorce.

Unidades Mesozoicas

Formación La Joya (JsJ)

Secuencia clástica continental constituida en la base por conglomerados y limonitas, y en la parte superior por arcillas rojas, limonitas y areniscas conglomeráticas, que aflora en el Anticlinorio Huizachal-Peregrina, al oeste de Cd. Victoria, Tamaulipas, y cuya localidad tipo se encuentra en el rancho La Joya Verde, en el Cañón del Huizachal.

La Formación La Joya se encuentra expuesta en la parte central y en el flanco noroeste de la Sierra de Catorce.

Sobreyaciendo a una secuencia vulcanogénica correlacionable a la Formación Nazas que aflora en los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas se encuentra una secuencia de depósitos continentales de espesores variables pero que llegan a alcanzar los 200 m. Consiste de un conglomerado polimíctico, que contiene fragmentos subredondeados de las rocas volcánicas y metasedimentos subyacentes, con diámetros de los clastos que van desde los 3 hasta los 10 cm, de areniscas conglomeráticas, areniscas finas de color café rojizo, de limolitas y lutitas de color rojo violáceo a café rojizo en la parte superior, con manchones de color amarillento y verdoso debido a alteraciones hidrotermales posteriores e intemperismo; estas limolitas y lutitas se presentan en capas de 20 a 30 cm con un marcado clivaje pizarroso o en parte masivas. Hacia el tope de la secuencia se observa un intenso cizallamiento y milonitización de la unidad, lo mismo que en la base de la Caliza Zuloaga que la sobreyace concordante y transicionalmente, esto es consecuencia de un corrimiento que ha tenido lugar entre ambas unidades.

Por sus relaciones estratigráficas, esta secuencia se considera de la base del Jurásico Superior a la parte alta del Jurásico Medio, correlacionándola con la Formación La Joya del Anticlinorio Huizachal-Peregrina.

Formación Zuloaga (JsZ)

En el área del acuífero esta Formación aflora amplia y principalmente en la porción central de la Sierra de Catorce.

Constituida por una secuencia calcárea, consistente en su base de calizas intensamente cizalladas de estratificación delgada. En la parte superior de la formación la secuencia está representada por calizas de color gris claro a gris oscuro en fractura fresca que intemperiza en tonos de amarillento y rojizo, con textura de grano fino en capas de 0.3 a 0.4 m de espesor con abundantes estilolitas paralelas a la estratificación, así como nódulos y lentes de pedernal negro y horizontes fosilíferos arcillosos. Aflora en espesores de hasta 300 m.

Se le asigna una edad Oxfordiana del Jurásico Superior. La Formación Zuloaga se correlaciona con los sedimentos de la misma edad y similares relaciones estratigráficas en el Altiplano y la Sierra Madre Oriental.

Formación La Caja (JsC)

Secuencia de 82 m de espesor, compuesta de calizas delgadas y margas, que afloran en la Sierra La Caja, ubicada en el norte de Zacatecas. Su contacto con las calizas gruesas de la subyacente Formación Zuloaga es de tipo discordante. La localidad tipo es designada como la Vereda del Quemado, en la Sierra La Caja al norte de Mazapil, Zacatecas, donde está constituida por una secuencia de 82 m de caliza limolítica de color ocre y blanquecino, bandas de pedernal, limonitas calcáreas, limonitas calcáreas con pedernal, calizas arcillosas fosfatadas, pedernal calcáreo fosfatado, caliza gris rojiza y limonitas calcáreas con concreciones fosilíferas.

En la zona esta unidad tiene una distribución asociada con la Formación Zuloaga, aunque con un espesor y ubicación más restringidos.

Consiste de limolitas, limolitas con pedernal y calizas negras recristalizadas con gran cantidad de fósiles (pelecípodos principalmente). Una característica sobresaliente hacia la base de la unidad, es la presencia de un horizonte de pedernal color gris rojizo de 2 a 3 m de espesor. En la porción superior está constituida por limolitas y limolitas con pedernal, con concreciones de caliza oscura y material fosfórico. Su espesor total varía de 30 a 40 m.

La edad que se le asigna a la Formación La Caja en base a su contenido faunístico es Kimeridgiano - Titoniano del Jurásico Superior.

Formación Taraises (Kit)

Su localidad tipo se encuentra en la parte occidental de la Sierra de Parras, donde consideró dos miembros: uno superior que consiste de 67 m de calizas en estratos delgados y calizas nodulares arcillosas y el miembro inferior que consiste de 64 m de calizas grises, que sobreyacen a las areniscas de la Formación Las Vigas.

En la zona, aflora en zonas aisladas en los flancos norte y sureste de la Sierra de Catorce, presenta un espesor aproximado de 80 m de rocas Mudstone-Wackstone ligeramente arcillosos de color gris plomo a amarillento. Se consideró a la Formación Taraises de edad Valanginiano al Hauteriviano, de acuerdo a su contenido faunístico.

Formación Cupido (Kic)

Secuencia de calizas de color gris con estratificación delgada y de 400 a 500 m de espesor. Su localidad tipo se encuentra en el flanco norte del Cañón del Mimbres, a 65 km al sureste de Parras, Coahuila.

Aflora principalmente en la parte central y en el flanco norte de la Sierra de Catorce, y de forma aislada en su flanco este. Igualmente se presentan algunos afloramientos en el flanco sur de la Sierra El Jicote.

Consiste en calizas de color gris a gris claro con capas de 0.5 a 0.6 m de espesor; con concreciones de pirita oxidada y estilolitas. Aisladamente se localizan capas pequeñas de margas y lutitas de color crema rosada.

La edad que se le asigna a la Formación Cupido es Hauteriviano-Barremiano en base a su contenido faunístico. Se correlaciona principalmente con la Formación Tamaulipas Inferior y Superior del Cretácico Inferior.

Formación La Peña (Kip)

Paquete de sedimentos que presenta en su parte inferior calizas de color gris medio y oscuro, en estratos medianos a delgados, con algunas intercalaciones de arcillas y limolitas con abundante nódulos de pedernal y en su parte superior tiene calizas y lutitas calcáreas, de color gris claro a amarillentos.

Aflora en gran parte de la zona, principalmente en los flancos este y oeste de la Sierra de Catorce, en el flanco sur de la Sierra El Jicote y en la parte noreste de la zona, cerca de la comunidad Tanque Nuevo.

De acuerdo a su posición estratigráfica y la fauna que contiene, a la Formación La Peña se le asigna una edad Aptiano y se considera correlacionable con el Horizonte Otates de la Sierra de Tamaulipas.

Formación El Abra (Kid)

La Formación El Abra, está dividida en "Taninul Phace" y "Miliolita Phace". Esta unidad se estudió dentro de la Plataforma Valles-San Luis que consiste de calizas de ambiente de plataforma de edad Valanginiano-Cenomaniano denominándolas Formación El Abra. La localidad tipo se encuentra al oriente de Ciudad Valles, S. L. P. en el poblado El Abra.

Dentro de la zona las rocas de esta Formación se encuentran en la región oriental y constituyen la denominada Sierra El Azul, también se encuentra en el flanco este de la Sierra de catorce y en algunos lomeríos dispersos en la planicie.

Fue medida y descrita en el área de Prospecto El Huizache, en la comunidad de Bustamante, donde definen dos unidades: la primera de 212 m de espesor, consiste de Packstone-Grainstone de miliólidos y pellets de color gris plomo a gris claro, presenta estratificación gruesa en la base a masiva hacia la cima con restos de moluscos en su superficie de erosión. La segunda de 214 m de espesor consiste de Mudstone a Wackstone de miliólidos de color gris plomo a gris claro, en estratificación gruesa de 1.0 y 2.5 m a masiva en algunas partes.

Regionalmente su edad es considerada del Valanginiano al Santoniano de acuerdo a la fauna que presenta. Esta Formación se encuentra distribuida en toda la extensión de la Plataforma Valles-San Luis y es correlacionable a las Formaciones Tamabra de facies de talud y Cuesta del Cura de facies de cuenca.

Formación Cuesta del Cura (Kcc)

Calizas compactas en capas delgadas y bandas de pedernal negro que constituyen las capas más altas que forman las montañas de la Sierra de Parras y sobreyacen estratigráficamente a las calizas arrecifales de la Formación Aurora e infrayacen a las calizas arcillosas y lutitas de la Formación Indidura. La sección tipo está aproximadamente a 6.4 km al oeste de Parras, Coahuila.

En la zona aflora ampliamente en los flancos norte y oeste de la Sierra de Catorce, en las elevaciones que se encuentran al norte del municipio de Cedral en el flanco sur de la Sierra El Jicote, así como en la parte norte de la Sierra El Azul.

El espesor de esta formación es de aproximadamente de 64 m y consiste de capas delgadas y medias de una caliza compacta de color gris crema y gris pardo que intemperiza en tonalidades violeta y gris claro, presenta horizontes de limolitas rojizas, así como bandas y nódulos de pedernal negro. Son característicos de esta formación los pliegues de tipo Chevrón.

Por su posición estratigráfica y su contenido faunístico, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano y probablemente su parte inferior sea Aptiano Superior. La Formación es correlacionable con la Formación Tamaulipas-Superior de la Sierra de Tamaulipas, con las Formaciones Aurora y Cuesta del Cura del Norte de México y con la Formación El Abra en la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Formación Indidura (Ksi)

Secuencia de lutitas y calizas delgadas de edad Turoniano.

Aflora principalmente en los flancos norte y este de la Sierra de Catorce, al sur y al norte del municipio de Matehuala y distribuida de manera irregular en el flanco norte de la Sierra el Azul.

Consiste en capas alternadas de calizas arcillosas y lutitas de color gris, con tonalidades que van del rojo violáceo al amarillo verdoso en superficie intemperizada. En la base de la unidad las capas son gruesas reduciéndose su espesor a capas de 5 a 10 cm en la cima.

Por su contenido faunístico, a la Formación Indidura se le asigna una edad Turoniano y se correlaciona con la Formación Agua Nueva hacia el oriente y con las Formaciones Eagle Ford, Boquillas y Ojinaga del Norte del país. De forma lateral es equivalente al miembro inferior de la Formación Tamasopo, en la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Formación Caracol (Ksc)

Serie de lutitas y calizas que sobreyacen concordantemente a la Formación Indidura. Esta descripción la realiza en el arroyo del Caracol en la Sierra de San Ángel, al oriente de Parras, Coahuila.

En la zona se presenta principalmente en la parte oriental del municipio de Cedral. Descrita como capas de lutitas calcáreas de color gris pardo en superficie fresca y amarillenta en superficie

intemperizada y escasas areniscas a diferencia de otros afloramientos descritos hacia el suroeste. Las areniscas son de grano fino y se presentan en capas delgadas con laminación paralela y oblicua curvada. Ocasionalmente pueden ocurrir capas delgadas margosas. Esta unidad se encuentra sumamente plegada y con la cima erosionada en la mayor parte de los afloramientos por lo que resulta complicado medir su espesor.

Por su posición estratigráfica se considera que la Formación Caracol tiene una edad Coniaciano-Santoniano.

Unidades Cenozoicas

Rocas Intrusivas del Paleógeno-Neógeno (Te Gd-Mz)

En diversas partes de la zona (Cerro del Fraile y la Sierra de Catorce) existen porciones de cuerpos ígneos intrusivos que consisten en rocas de composición félsica a intermedia que afectan a diversas formaciones de rocas sedimentarias, además de que tienen estrecha relación con los yacimientos metálicos que se explotan en la zona. Dentro de la Sierra El Fraile, los sedimentos calcáreos del Mesozoico son fracturados por el emplazamiento de un plutón granodiorítico de edad Mioceno que se supone es el origen de la mineralización en el distrito minero de Santa María de la Paz.

Rocas Extrusivas del Paleógeno-Neógeno (TmB)

Existen algunos afloramientos de derrames basálticos en la región noreste y noroeste de los taludes de la Sierra de Catorce que se les relaciona con el fallamiento normal en el Neógeno y el Pleistoceno. Pequeños afloramientos de rocas extrusivas del Paleógeno- Neógeno de composición máfica se presentan en las inmediaciones de Vanegas y al noroeste de Estación San Isidro. La roca consiste de un basalto de color oscuro, con estructura vesicular y en ocasiones amigdaloidal con fenocristales de labradorita, hornblenda y augita.

Materiales Sedimentarios Continentales del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario (Qal)

Con base en la información geológica disponible, es difícil diferenciar en forma definitiva la edad de los materiales geológicos semiconsolidados y sin consolidar producto de la erosión de las rocas más antiguas. Por ejemplo, adyacente a las principales elevaciones que se registran dentro de la zona, se encuentran una serie de conglomerados que constituyen abanicos aluviales y/o zonas de pie de monte. Estos conglomerados están constituidos por material clástico con tamaño que oscila entre cantos rodados, gravas y arenas empacados en una matriz areno arcillosa parcial o totalmente cementados por calcita. En otras regiones, estos conglomerados han sido definidos como del Paleógeno-Neógeno, por lo que probablemente algunos de los que se detectan en la zona (parte norte y oriente de la Sierra de Catorce) presenten esta edad; sin embargo, la información disponible no permite asegurarlo definitivamente.

Materiales sedimentarios de origen continental del Cuaternario se identifican en forma amplia en las planicies que conforman una buena porción de la zona analizada. Algunos de ellos han sido

definidos formalmente; por ejemplo, la Formación Jabonero, que aflora en la región noroeste, específicamente en la porción norte y poniente de la Sierra de Catorce. Este material consiste de gravas mal clasificadas, con clastos subredondeados a angulosos, ocasionalmente cementados por carbonatos (caliche). Otros materiales similares que se presentan a todo lo largo de las partes topográficas más bajas, consisten de arcillas, limos, arenas y gravas, intercalados y mezclados entre sí, con la importante característica de que presentan abundante material cementante que incluye yeso y/o carbonatos.

4.2. Geología estructural

La Sierra de Catorce presenta una estructura de levantamiento de edad Paleógeno, de orientación general norte-sur, delimitado por fallas de la misma orientación, notables principalmente en el lado occidental y fallas este-oeste o ligeramente oeste-noroeste, que ocurren principalmente en el extremo norte de la sierra. Internamente se reconoce una estructura plegada con varias estructuras mayores y numerosos plegamientos menores por lo que es aplicable el término anticlinorio. Los pliegues muestran ejes orientados de manera general norte-sur en muchos de los casos convergencia hacia el este.

El plegamiento de la Sierra de Catorce está representado por una serie de anticlinales y sinclinales, estructuras que tienen una dirección predominante norte-sur y nor-noroeste de dimensiones de varios metros a kilómetros. A lo largo de todo el frente occidental de la Sierra de Catorce ocurren una serie de fallas normales con dirección norte-sur originadas como producto de la extensión regional del Paleógeno y el levantamiento de la Sierra de Catorce con magnitudes del orden de unos cuantos metros hasta varios kilómetros.

Las principales fallas este-oeste a ligeramente noroeste se localizan en la parte sur de la Sierra de Catorce.

4.3. Geología del subsuelo

El acuífero en el que se emplazan la mayoría de los pozos es de tipo libre y lo conforman rellenos aluviales, predominando arcillas y limos, con base en la información geofísica alcanzan un espesor del orden de 300 a 350 m en el centro del valle, aunque no se descartan espesores mayores. Las rocas sedimentarias y carbonatadas del Cretácico y Jurásico (con excepción de la Formación El Abra) y rocas intrusivas del Paleógeno-Neógeno, funcionan como basamento del acuífero granular, aunque las evidencias de campo señalan que localmente, a través de sus fracturas, pueden proporcionar caudales menores a pozos que se utilizan para uso doméstico o abrevadero.

Las trece unidades litoestratigráficas que afloran en el área, se pueden agrupar en 4 unidades permeables y en 9 unidades de escasa permeabilidad, prácticamente nula.

Unidades permeables

(Formaciones Cupido, Cuesta del Cura, El Abra, Rocas ígneas extrusivas y materiales sedimentarios continentales). Estas unidades permeables son las principales rocas que presentan la capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades económicamente explotables.

En el caso de la Formación Cupido, se localiza principalmente en los flancos de la Sierra de Catorce, es en esta formación donde se emplaza el manantial La Maroma, que abastece a diversos poblados de la región. Por su parte, la Formación El Abra, se trata de una unidad de permeabilidad por disolución de calizas, conformando conductos preferenciales del agua subterránea.

En cuanto a las rocas ígneas extrusivas, éstas se caracterizan por presentar cierto grado de permeabilidad que le confieren las diaclasas de enfriamiento; sin embargo, su extensión es muy limitada y se alojan entre el material sedimentario que la sepulta.

Por último, se tiene a los Materiales Sedimentarios Continentales, que presentan una importante variación en su granulometría, propiedad que controla el comportamiento espacial de su permeabilidad. Un aspecto importante, son los diversos abanicos aluviales que se entrelazan o interdigitan en la llanura aluvial, lo que explica la gran heterogeneidad y anisotropía del medio.

Unidades de escasa permeabilidad

(Formaciones Zuloaga, La Caja, Tamaulipas Superior e Inferior, Agua Nueva, San Felipe, Méndez y Rocas intrusivas). Estas formaciones se caracterizan por constituirse de estratos delgados de material arcilloso, frecuentemente con pedernal, muy comunes en ambientes sedimentarios marinos de cuencas profundas.

Medio granular: Como el nombre lo indica, se refiere al flujo de agua subterránea en material granular, que en este caso es la unidad Materiales Sedimentarios Continentales del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, que es la unidad litológica donde se emplazan la mayor parte de aprovechamientos de aguas subterráneas, principalmente agrícolas. El comportamiento de este medio es notablemente variable, es decir, heterogeneidad y anisotropía importantes.

Medio fracturado: Este tipo de medio es de gran importancia: i) por ser rocas que en superficie son fuertes potenciales de infiltración de agua meteórica que pueden llegar a la zona de saturación y ii) porque en el subsuelo son una componente fundamental en el movimiento del agua subterránea a profundidades que rebasan a la unidad materiales sedimentarios continentales. A este medio pertenecen las formaciones Cupido, El Abra y rocas ígneas extrusivas.

Las Formaciones Cupido y El Abra, consisten de rocas calizas que generalmente presentan permeabilidad por disolución y por el sistema de fracturamiento magnificado por los agentes erosivos que actuaron y que en rocas expuestas en superficie aún persisten.

En lo que a la unidad de rocas ígneas extrusivas se refiere, éstas manifiestan diaclasas de enfriamiento, que facilitan el movimiento del agua subterránea, pero dada su extensión limitada, principalmente están en conexión hidráulica con el material sedimentario que la rodea.

Basamento hidrogeológico

Se considera como basamento hidrogeológico a las rocas más antiguas hasta ahora identificadas en la región, que son las formaciones Zuloaga y La Caja, de escasa o prácticamente nula permeabilidad y que en posiciones estratigráficamente normales son las más profundas, por lo que sustentan al sistema de aguas subterráneas y su dinámica a través de los materiales geológicos más jóvenes.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

El acuífero está considerado como de tipo libre conformado por arenas y gravas de gran heterogeneidad y anisotropía que rellenan las depresiones topográficas. Este material es subyacente y flanqueado por un medio fracturado formado principalmente por carbonatos mesozoicos y rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno que afloran en los altos estructurales de la zona. Casi la totalidad de los aprovechamientos existentes en el área se encuentran emplazados en el medio granular.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos se reinterpretaron 6 pruebas de bombeo, realizadas en 1981 (IEPSA) y 7 más ejecutadas como parte del estudio realizado en el 2007.

Los valores de K obtenidos por el método numérico y la capacidad específica, oscilan entre 0.01 y 20.0 m/d, con un promedio de 3.3 m/d. Comparando los valores máximos y mínimos de K con los valores promedio de K, reportados en la literatura, para el material geológico predominante en un acuífero, los valores de K determinados corresponden a los valores característicos para la arena fina a media.

Los valores menores de K (0.01 m/d) se encuentran frente al flanco norte de la Sierra de Catorce, este comportamiento se debe a que se localizan sobre un abanico aluvial que recibe un importante aporte de material fino de la Sierra hacia el valle, lo cual genera tanto reducción en la velocidad de movimiento del agua subterránea como una mayor profundidad de extracción.

Los valores de transmisividad obtenidos en las pruebas de bombeo varían desde 1.81×10^{-5} a $1.18 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. El promedio se estima en $5.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

El coeficiente de almacenamiento obtenido de la interpretación de las pruebas de bombeo, varía de 0.1 a 0.001.

5.3. Piezometría

Se cuenta con información piezométrica procedente de los estudios realizados en los años 1981, 2004 y 2007.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

Los valores de profundidad al nivel estático para 1981, muestra máximos entre 53 y 58 m, al sur y sureste del Municipio de Cedral. Respecto a la configuración para el 2004, se observan variaciones importantes con respecto a la información histórica. Principalmente se aprecia que las mayores profundidades son de más de 70 m y se localizan al noroeste del municipio de Cedral en donde se encuentran los pozos de agua potable que abastecen a la ciudad de Matehuala, cuya profundidad máxima al nivel estático es de 79 m.

La configuración correspondiente al 2007 se representa en la Figura 3. Dentro de los principales rasgos se puede apreciar un abatimiento localizado en una de la zonas de mayor extracción, ubicada al Norte de la ciudad de Cedral, que en reportes anteriores se considera una de las zonas con agua de buena calidad tanto para uso público como agrícola, por lo que a lo largo de los años se ha concentrado en ella una buena cantidad de aprovechamientos tanto para uso público-urbano como para uso agrícola. Los valores varían de 10 hasta 150 m; las profundidades mayores se presentan al noroeste de Matehuala.

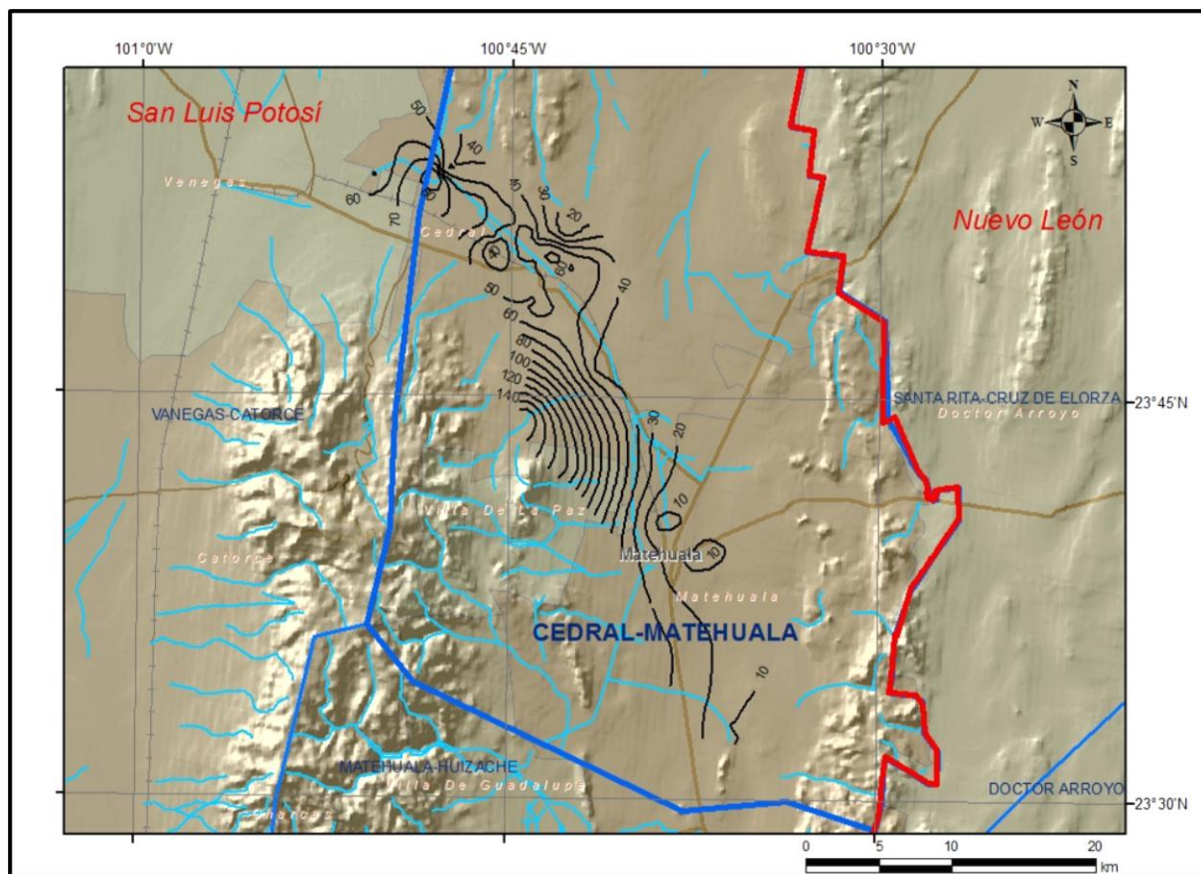


Figura 3. Profundidad al nivel estático (m), 2007

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de cargas hidráulicas para 2004 muestra una trayectoria preferencial del flujo subterráneo de sur a norte; el valor más alto de carga hidráulica es del orden de los 1751 msnm, en la porción norte de la zona.

Con respecto a la configuración para el año 2007, mostrada en la figura 4, se observan varias componentes en la dirección del flujo subterráneo, con una trayectoria preferencial NW-SE, desde la parte NW de Cedral hacia el sur.

En la porción NW del acuífero se presenta una dirección de flujo hacia la parte central de Estación Vanegas y Cedral, donde se tiene la mayor concentración de pozos, presentando dos conos de abatimiento definidos por la curva de 1630 msnm, que no se presentaban en el 2004, lo cual un descenso importante en los niveles del agua subterránea en los últimos años.

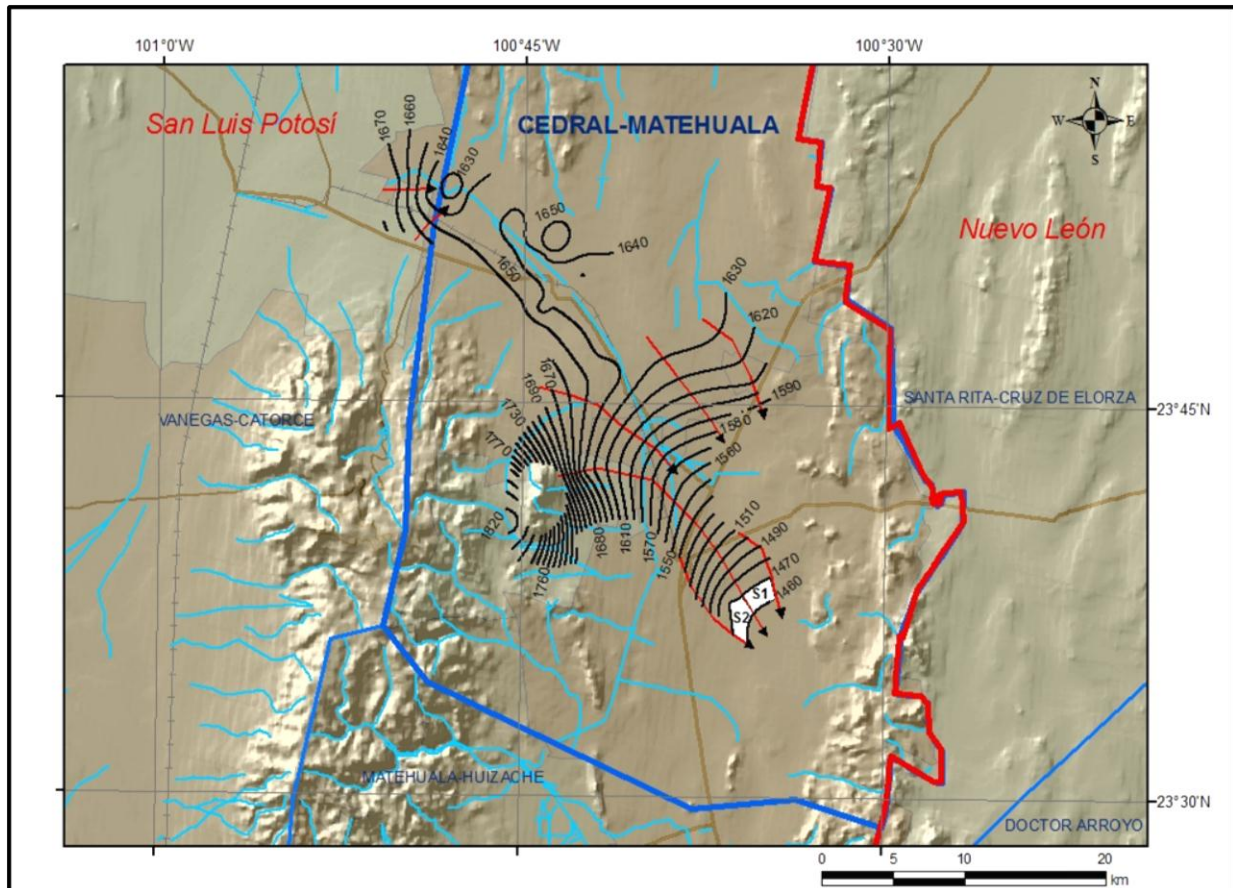


Figura 4. Elevación del nivel estático (msnm), 2007

5.4.3. Evolución del nivel estático

Para la definición de la evolución del nivel estático, se utilizó la información de los periodos 1981-2007 y 2004-2007. Para el primero de ellos (figura 5), los descensos varían de 25 a 65 m con un promedio de 45, por lo que el ritmo de abatimiento es de 1.7 m/año.

Con respecto a la evolución para el periodo 2004-2009 (figura 6), los valores registrados oscilan entre 2 y 14 m; los valores más altos se presentan en las porciones centro y sur del acuífero, donde se concentra la extracción, disminuyendo notablemente hacia el norte.

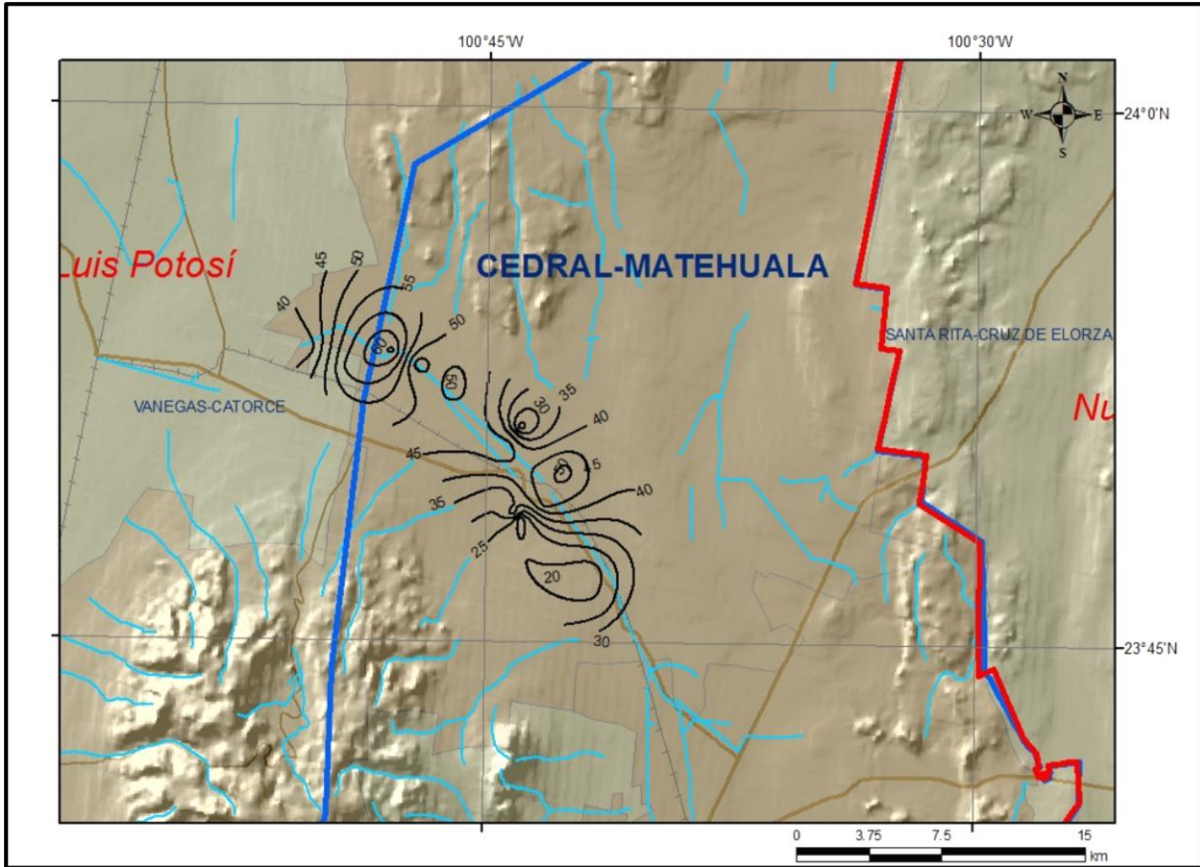


Figura 5. Evolución del nivel estático (m), 1981-2007

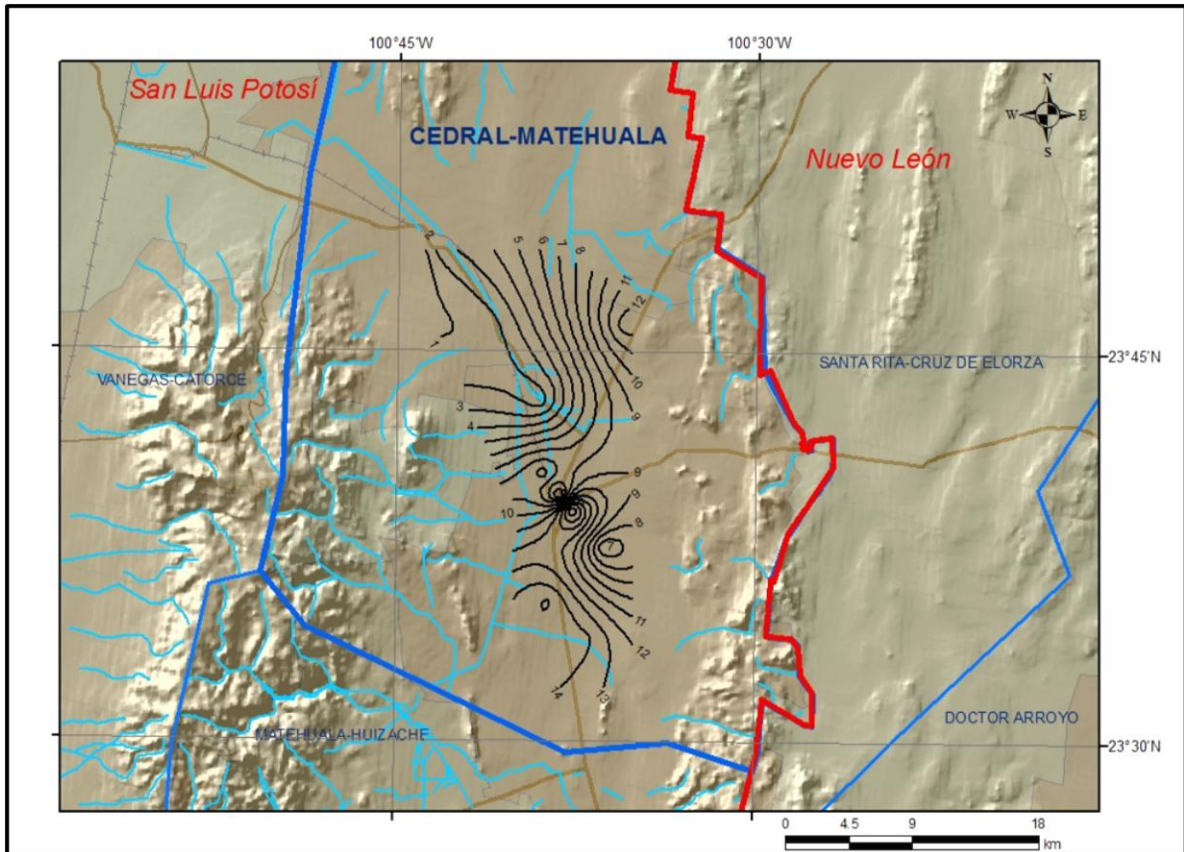


Figura 6. Evolución del nivel estático (m), 2004-2007

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron muestras de agua en 50 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayores, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis físicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Disueltos Totales (SDT) varían de 353 a 1770 ppm con un promedio de 831 ppm.

Los diagramas de Stiff permiten visualizar la trayectoria de flujo en relación con la composición química del agua subterránea. Se observa que la principal zona de recarga se encuentra localizada en la parte centro-norte de la Sierra de Catorce, en esta parte el mayor caudal se encuentra hacia el norte de la misma donde al ingresar al material granular del valle, las aguas tienen carácter de mixtas-cálcicas; al continuar por el valle, interaccionan con el medio confinante de manera que a los largo de la trayectoria va aumentando la carga de solutos, transformándose esta agua subterránea en sulfatada-cálcica.

Por otra parte, las aguas de aprovechamientos que se encuentran cerca de las rocas carbonatadas, como es el área cercana a Villa de la Paz, al oeste de Matehuala, muestran un carácter distintivo ya sea de aguas carbonatadas o mixtas-cálcicas, las cuales al circular en el material de relleno se van tornando sulfatadas.

De los 50 aprovechamientos muestreados se realizó la clasificación por familias.

Familia	%
Sulfatada-Cálcica	92
Mixta-Cálcica	4
Bicarbonatada-Cálcica	2
Mixta-sódica	2

Es importante dar seguimiento a la presencia de As en el agua. En la tesis de Razo-Soto (2002), muestra que la parte noreste de la ciudad de Matehuala se encuentra impactada por arsénico; al parecer, relacionado con actividades mineras. Posteriormente, en la tesis de Bueno-Pedroza (2004), evidencia nuevamente la presencia de elevadas concentraciones de arsénico en algunos aprovechamientos localizados al N-NE de Matehuala. En el estudio de 2007, nuevamente se observa la presencia elevada de este elemento en 2 de los pozos muestreados y coinciden con la ubicación de los casos antes mencionados.

Se identificó y delimitó la zona con mejor calidad de agua para uso público-urbano, tomando como base los límites permitidos por la NOM -127-SSA1-1994 para los parámetros de STD, SO_4 y Dureza; y sobreponiendo las zonas identificadas, esta zona se encuentra al NW de Cedral.

En lo que respecta a los aprovechamientos para uso agrícola, se observó que la calidad del agua varía entre muy altamente salina a agua con salinidad media, aunque uno de los aprovechamientos muestreados presentó agua de baja salinidad, la mayoría de los de uso agrícola tienen agua altamente salina. Sin embargo todas las muestras son bajas en sodio.

Los pozos de uso potable tienen agua de salinidad media a altamente salina con poco sodio. La mayoría de pozos con este uso son altamente salinos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2007, se registró la existencia de un total de 204 aprovechamientos del agua subterránea dentro de los límites geográficos del acuífero, 171 pozos, 32 norias y 1 manantial, de los 204 están activos 116 (56 %) y los 88 restantes se clasificaron como inactivos (44 %). Del total de obras activas, 65 son pozos, 29 norias, 18 manantiales y 6 galerías filtrantes.

El volumen estimado de extracción conjunta asciende a **15.9 hm³ anuales**, de los cuales 7.0 hm³ (44.0%) se destinan a las actividades agrícolas, 7.7 hm³ (48.4%) para abastecimiento de agua potable y los 1.2 hm³ restantes (7.6%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero, industrial y otros.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2007, en un área de balance de 1500 km², en la que están dispersos los aprovechamientos. 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:

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

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

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

Para este caso particular, debido a que no existe información derivada de prueba de bombeo en la zona cercana a los canales de flujo identificados en la configuración de elevación del nivel estático, que permita plantear un balance de aguas subterráneas en la forma “tradicional”, se optó por calcular la recarga natural por medio de métodos alternos, en lugar de considerarla como incógnita.

De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente:

$$\mathbf{Rn + B - Sh - Sm = \pm \Delta V(S)}$$

Donde:

Rn: Recarga natural (incluye la recarga vertical por lluvia (Rv) y las entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh))

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

Dm Salida a través de manantiales

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

De esta manera, como no se dispone de información confiable para estimar el cambio de almacenamiento y aunque se supone que tiende a ser nulo, su valor será despejando de la ecuación:

$$\pm \Delta V(S) = B + Sh + Sm - Rn$$

7.1. Entradas

Las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). La suma de estas componentes se considera como recarga natural (Rn).

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, aunque el volumen que se destina a los usos agrícola y público-urbano suman casi el 100 % de la extracción, se considera que el valor de la recarga inducida es despreciable.

7.1.1. Recarga natural (Rn)

En la zona se presenta un flujo bien definido proveniente de la parte norte del acuífero, en general, no se visualiza claramente la entrada de agua en forma horizontal proveniente por el pie de monte de las sierras. Si acaso en la zona de la Sierra de Catorce se llegan a apreciar alguna aportación pero que se toma en cuenta en la recarga natural.

Con el fin de conocer la composición hidrogeoquímica e isotópica del agua de lluvia, en el estudio de 2007, se establecieron seis estaciones climáticas durante la temporada de lluvias en diferentes localidades y elevaciones (desde 1617 hasta 3053 msnm) dentro del área del acuífero, con el fin de utilizar esta información para el cálculo de la recarga.

Para investigar aspectos genéticos y de evolución del agua subterránea con ayuda de técnicas isotópicas (^{18}O y ^2H), se tomaron 30 muestras, distribuidas en toda el área del acuífero. Para utilizar las técnicas radio isotópicas de ^3H y ^{14}C , se seleccionaron 5 puntos de muestreo de acuerdo a una dirección regional de flujo subterráneo deducida en base de datos piezométricos de 1972 y 2001 y cubriendo desde la zona de recarga hasta el sur de la ciudad de Matehuala.

Para la estimación de la recarga el método de balance de cloruros requiere entre otras cosas conocer la concentración del ión Cl^- en la zona no saturada del área de recarga. Para la obtención de las muestras de suelo a diferentes profundidades se realizaron una serie de perforaciones en el área Vanegas-Cedral considerada la principal zona de recarga. Una condición en estas perforaciones con el objetivo de no modificar el contenido de cloruros de los suelos muestreados fue su realización sin lubricante de ninguna especie (agua, aceite, lodos, etc.) aparte de ello se tomó en consideración su distancia a posibles fuentes de impacto antropogénicos (agricultura, irrigación, fertilizantes, etc.). Un problema importante durante las perforaciones fue el alto contenido de caliche del subsuelo que impidió lograr una mejor profundización.

Para aplicar el método del balance de ión Cloruro, es necesario considerar el contenido de cloruro en las precipitaciones. En una primera aproximación se utilizó el contenido en precipitaciones captadas 150 km al sur del área del acuífero ($\text{Clp} = 0.4773 \text{ mg/l}$). Para lograr una mejor precisión del método en áreas con climas extremos, es necesario contar con valores promedio de por lo menos 5 años (Gaye & Edmunds, 1996), por lo que los valores aquí obtenidos se consideran una primera aproximación. La precipitación promedio utilizada en esta fue la calculada del análisis de los datos climatológicos de las estaciones del área y fue de 331 mm/a.

El contenido de cloruro en el agua subterránea fue estimado de los resultados de 16 aprovechamientos muestreados dentro del área considerada como de recarga así como del Ojo de Agua de San Juan de Vanegas; la concentración promedio así obtenida fue de 13.37 mg/l.

Introduciendo estos dos parámetros en la ecuación (Allison & Hughes 1978; Lerner et al. 1990; Flint et al., 2002):

$$R = \frac{P \times Cl_P}{Cl_G}$$

Donde R: Recarga
 P: Precipitación
 Cl_P: Contenido de cloruros en la precipitación
 Cl_G: Contenido de cloruros en el agua subterránea

Se obtiene una tasa de recarga de 11.82 mm/a (0.37 L/(s*km²)) ó 3.6% precipitación. Esto se basa en que no hay escurrimiento superficial y que todo el cloruro de las precipitaciones se infiltró vertical y continuamente. Así mismo no se considera posible disolución a partir de minerales.

De las siete perforaciones practicadas en 2007, solamente una se consideró exitosa (PD-5-18.0 m) por lo que fue la única utilizada para las interpretaciones. Los resultados de las demás perforaciones se utilizaron para apoyar en la definición de la “zona de raíz”, o zona con la máxima concentración la cual se interpreta como la zona de equilibrio entre la zona de percolación, transpiración de las raíces de las plantas y evaporación, a partir de la cual se considera que la concentración de Cloruros se mantiene constante y que en este caso fue establecida a una profundidad aproximada de los 9.0 m.

A partir de esta “Línea de flujo cero” se calculó una concentración de cloruros en el agua intersticial (Cl_G) de 214.28 mg/l. Introduciendo esta concentración en la fórmula arriba descrita obtenemos una tasa de recarga de 0.74 mm/a (0.22% de la precipitación). Aplicando esta misma ecuación a los resultados obtenidos en la perforación PD-4 se obtiene una tasa de recarga de 0.63 mm/a ó 0.19% de la precipitación. Nuevamente, estos datos son una primera aproximación que pueden ser afinados por un lado obteniendo un valor más representativo a largo plazo de la concentración de cloruros en el agua de lluvia del área, así como utilizando técnicas analíticas más sensibles a las bajas concentraciones de cloruros (P.ej. Cromatografía de Iones o Ion Selectivo).

Los resultados mostraron que no hay Tritio en el agua subterránea en el área de recarga y concentraciones bajas de entre 1.5 y 2.0 U. T. en los alrededores de Matehuala.

El nulo contenido de Tritio en las muestras del área de recarga muestran que no hay “agua moderna” en explotación, por lo que nos conduce a asumir tiempos de infiltración altos (mayores de 50 o 100 años) o que la infiltración ocurre en la parte superior de la zona no saturada (que puede ser en esta zona de entre 50 a 70 m y por lo tanto no hay una recarga directa al acuífero. De esta manera el agua extraída en esta zona podría ser un agua “antigua”.

Los contenidos bajos de Tritio en la zona de Matehuala implican algo de recarga local dentro de la zona de descarga de Matehuala. Dada la poca profundidad al nivel freático estas precipitaciones

pueden llegar al acuífero en lapsos cortos de tiempo (10 – 20 a) generando un patrón de mezcla con un componente de entre 10 y 20% de agua “joven”.

Los resultados de las determinaciones de ^{14}C y ^{13}C están expresados en términos de “actividad específica reciente de ^{14}C ” (pmC, $a(t)$). Las edades del agua subterránea fueron corregidas (τ_{85}) de acuerdo a la siguiente ecuación (Moser & Rauert, 1980)

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \times \ln \frac{a_0}{a(t)}$$

Dónde:

$T_{1/2}$ es la vida media del ^{14}C

$a(t)$ es la actividad específica medida del ^{14}C (empíricamente establecida en 85 pmC)

Estos resultados apoyan los obtenidos por el Tritio que señalan a las aguas extraídas en las cercanías de la zona de recarga como “aguas viejas” y a las aguas de las cercanías de Matehuala como aguas “jóvenes”.

La recarga natural por lluvia, que se presenta en el área de las partes bajas, es del orden **17.5 hm³/año**, obtenida en un área de aproximadamente 1,500 km², con una tasa de recarga de 11.82 mm/a (0.37 L/(s*km²)) ó 3.6% precipitación. Basados en que no hay escurrimiento superficial y que todo el cloruro de las precipitaciones se infiltró vertical y continuamente. Así mismo, no se considera posible disolución a partir de minerales.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), en una pequeña región por flujo horizontal subterráneo (Sh) y por la descarga a través de un manantial (Dm).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción es de **15.9 hm³/año**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

De acuerdo con la configuración de curvas de igual elevación del nivel estático 2007 (Figura 4), el acuífero presenta una descarga por flujo horizontal subterráneo hacia el sur de la zona. El cálculo se realizó con base en la Ley de Darcy.

En la Tabla 2 se indican los valores obtenidos en cada celda y el volumen total de **13.0 hm³/año** que descarga al acuífero, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q = T * A * i$$

Dónde:

T: Transmisividad promedio (m²/s) en el canal de flujo

A: Ancho (m) del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

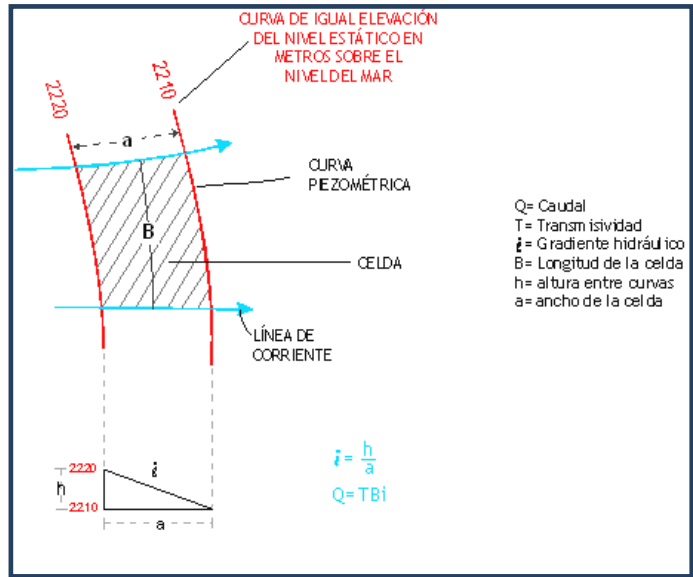


Tabla 2. Entradas de agua subterránea por flujo horizontal al acuífero

CELDA	ANCHO	LARGO	h_1-h_2	GRADIENTE HIDRÁULICO	TRANSMISIVIDAD	CAUDAL	VOLUMEN
	A	L		i	T	Q	V
	(m)	(m)	(m)		m ² /s	m ³ /s	hm ³ /año
1	6650.0	850.0	10	0.01176	0.003	0.2347	7.40
2	5573.0	950.0	10	0.01053	0.003	0.1760	5.55
							≈ 13.00

7.2.3. Salida a través de manantiales (Dm)

La descarga a través del único manantial que existe en la zona se ha estimado en **1.3 hm³/año**.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es el cambio de almacenamiento, despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$\pm \Delta V(S) = Dm + B + Sh - Rn$$

Sustituyendo valores:

$$\pm \Delta V(S) = 1.3 + 15.9 + 13.0 - 17.5$$

$$\Delta V(S) = - 12.7 \text{ hm}^3/\text{año.}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\text{DAS} = \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

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, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero. Por lo tanto para el caso de este acuífero **Rt = 17.5 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes. Para el caso del acuífero es el volumen concesionado del manantial que está comprometido **1.3 hm³/año**, como agua superficial para diversos usos.

Para este acuífero, aunque existen salidas subterráneas, éstas se evaluaron en una zona donde no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento y el agua es de mala calidad, por lo que no se considera comprometida.

8.3. Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (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 **19'125,786 m³/año**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (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 Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, 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, que de acuerdo con la expresión correspondiente resultó ser de **- 2,925,786 m³ /año.**

$$\text{DAS} = R_t - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

$$\text{DAS} = 17.5 - 1.3 - 19.125786$$

$$\text{DAS} = - 2.925,786$$

El resultado indica que existe actualmente un déficit de volumen de **2 925 786 m³ anuales.** 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.

9. BIBLIOGRAFÍA

Bueno Pedroza, A., 2005. Interpretación Hidrogeoquímica de los Sistemas de Flujo de la parte norte del Altiplano Potosino. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Castro-Larragoitia Javier, Cardona Benavides Antonio, Bueno Pedroza Angélica, Knauthe Ulrich, Pérez Morán Arturo. 2005. Aprovechamientos Sustentable de Recursos Hídricos en la Parte Norte del Altiplano Potosino.- SIHGO 2002020604.Reporte Final de proyecto, 131 pp.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Actualización Geohidrológica en el acuífero Cedral-Matehuala, SLP, Realizado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería.

Núñez Pérez, E., 2007. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el Acuífero Cedral-Matehuala. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Pérez Morán, A., 2006. Determinación de parámetros hidráulicos mediante métodos analíticos y numéricos en el Acuífero Cedral-Matehuala, S.L.P. Trabajo recepcional, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Razo Soto, I., 2002. Evaluación de la Contaminación de Metales y del Riesgo en Salud en un Sitio Minero de Sulfuros Polimetálicos: Caso de Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P. (México). Tesis de maestría. Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1979. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Charco Blanco-Matehuala, San Luis Potosí. Realizado por la compañía Geohidrológica Mexicana, S.A.

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1981. Estudio Geohidrológico con fines de abastecimiento a la ciudad de Matehuala, S.L.P. elaborado por Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1972. Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona de Cedral-Vanegas, S.L.P., elaborado por la empresa HIDROTEC, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1975. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos, en el Estado de San Luis Potosí, zona El Salado, zona Cedral-Matehuala, zona Vanegas-Estación Berrendo. Realizado por la compañía Geohidrológica Mexicana, S.A.