



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MOCTEZUMA (2210) ESTADO DE
QUERÉTARO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGIA.....	8
4.1. Estratigrafía	8
4.2. Geología estructural.....	11
4.3. Geología del subsuelo.....	12
5. HIDROGEOLOGIA	13
5.1. Tipo de acuífero	13
5.2. Parámetros hidráulicos.....	14
5.3. Piezometría	14
5.4. Comportamiento piezométrico.....	15
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	15
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA	16
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16
7.1. Entradas.....	17
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	17
7.2. Salidas.....	23
7.2.1 Bombeo (B).....	23
7.2.2 Descarga por manantiales (Dm).....	23
7. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	24

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Moctezuma, definido con clave 2210 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo oriental del Estado de Querétaro, entre las coordenadas 20°44' y 21°04' de latitud norte y 99° 21' y 99° 35' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 239 km². Limita al noreste, este y sureste con el acuífero Zimapán, ubicado en el Estado de Hidalgo; al norte, noroeste, oeste, suroeste y sur con el acuífero Tolimán, del Estado de Querétaro (figura 1).

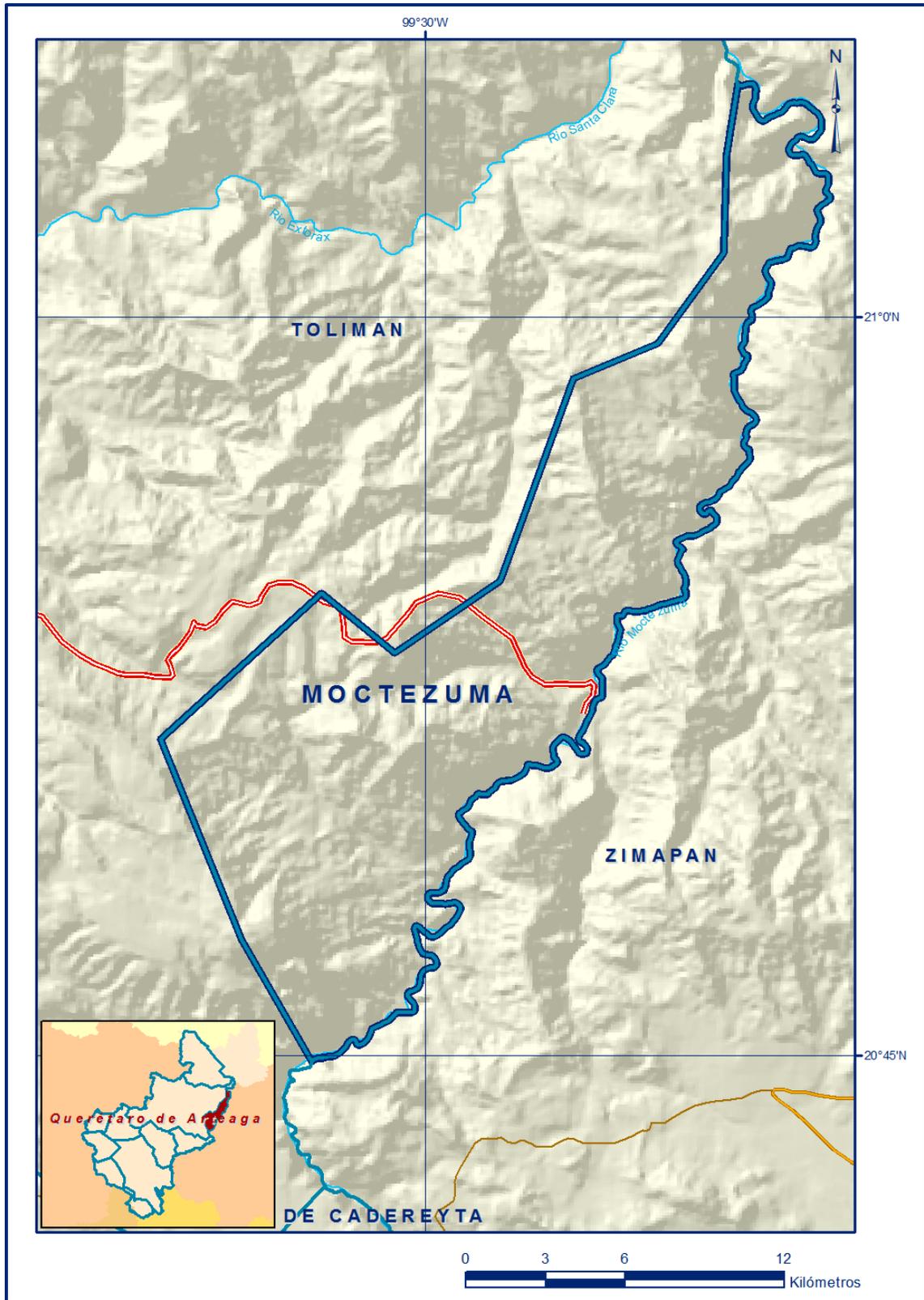


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero se localiza prácticamente en su totalidad en el municipio Cadereyta de Montes y sólo una pequeña superficie de su porción noreste pertenece al municipio San Joaquín.

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 que delimitan el acuífero

ACUIFERO 2210 MOCTEZUMA							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	32	17.7	20	44	52.5	
2	99	33	43.7	20	47	21.1	
3	99	35	22.6	20	51	26.2	
4	99	32	6.3	20	54	23.9	
5	99	30	37.4	20	53	10.8	
6	99	28	28.4	20	54	38.2	
7	99	26	59.6	20	58	44.7	
8	99	25	16.4	20	59	27.7	
9	99	23	56.1	21	1	18.1	
10	99	23	53.7	21	3	16.8	
11	99	23	39.3	21	4	44.2	DEL 11 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	99	32	17.7	20	44	52.5	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Moctezuma pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Querétaro. El acuífero se encuentra parcialmente vedado. Casi la totalidad de su territorio está sujeto a las disposiciones del “Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos de la zona circunvecina a los Valles de Querétaro y San Juan del Río, Qro.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 06 de febrero de 1976. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Sólo pequeñas porciones de sus extremos nororiental y occidental, no están regidas por ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

La porción no vedada del acuífero Moctezuma, clave 2210, se encuentra sujeta a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca “Río Pánuco”, instalado el 26 de agosto de 1999. El principal usuario del agua subterránea es el doméstico. En el acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno, 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 han llevado a cabo algunos estudios de carácter regional y con fines principalmente mineros, geológicos y geofísicos. A continuación, se describen los principales estudios elaborados en la región:

PROYECTO SIERRA GORDA DE QUERÉTARO. Elaborado por el Área de Espeleología del Instituto Politécnico Nacional (IPN), para la Asociación de Excursionismo y Montañismo del Instituto Politécnico Nacional en 2008. El informe de este estudio describe las principales zonas de carsticidad en la Sierra Gorda, para desarrollar las actividades de ecoturismo

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS TAMPAÓN ZONA DE SIERRA Y MOCTEZUMA. Elaborado por el Instituto Tecnológico Superior de Cosamaloapan para la Comisión Nacional del Agua en 2011. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Este estudio fue la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), la superficie del acuífero se ubica en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, en la subprovincia Sierras Altas, la cual está formada por un conjunto de sierras menores de estratos plegados de antiguas rocas sedimentarias marinas (de edad Cretácico y Jurásico Superior), entre las que predominan las calizas y en segundo término, areniscas y lutitas. De acuerdo con la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Geografía (INEGI, 1997), el acuífero se ubica en la Discontinuidad denominada Carso Huasteco”.

La topografía es abrupta, el relieve montañoso es accidentado y está conformado por grandes sierras alargadas y plegadas con orientación preferente noroeste-sureste, constituidas por rocas calcáreo-arcillosa, separados por valles angostos que generalmente corresponden a sinclinales.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García (1981), para las condiciones de la República Mexicana, el clima que predomina en la mayor parte del acuífero es el templado subhúmedo ((A)c(w1)), con temperatura media anual entre 18 y 22°C, régimen de lluvia de verano en el que el periodo de máxima precipitación se presenta entre mayo y octubre, mientras que en el extremo sur se registran climas semiseco semicálido (BS1hw) y semiseco templado (BS1kw(w)). Para la determinación de las variables climatológicas se analizó la información de dos estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero: El Doctor y San Joaquín. De acuerdo con los registros de estas estaciones para el periodo 1953-2000 (47 años), utilizando el método de polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **910 mm** y **13.1 °C**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica RH 26, Río Pánuco, Subregión Hidrológica Alto Pánuco, cuenca del Río Moctezuma (26 D) y en la Subcuenca del Río Moctezuma.

La cuenca Río Moctezuma cubre una superficie de 6,508 km², sus principales afluentes son los ríos Extóraz y San Juan, así como los arroyos Seco y Galindo.

Esta cuenca es muy importante en la zona por su extensión y porque un gran volumen de agua superficial se emplea en el Distrito de Riego 023 San Juan del Río.

El Río Moctezuma es el afluente más caudaloso dentro del acuífero, es perenne y desemboca en el Río Pánuco.

Este río cambia de nombre a lo largo de su recorrido, adoptando el nombre de Moctezuma en el Valle de México, sirviendo como canal de desagüe para el drenaje profundo de la Ciudad de México; posteriormente sus aguas circulan por el Río Tula y pasan por las presas Requena, Endhó y Tlamaco, continuando su recorrido hasta llegar al embalse de la presa de Zimapán, en Hidalgo.

3.4 Geomorfología

Las geoformas están controladas principalmente por rocas calcáreas y arcillosas, las primeras dan origen a relieves fuertes con drenaje paralelo, ocupan las partes topográficas más altas; las rocas arcillosas originan relieves suaves con drenaje de tipo dendrítico a subdendrítico, formando bajos topográficos, los conglomerados forman lomeríos redondeados y las rocas volcánicas pequeñas mesetas.

Las características geomorfológicas presentes en el área evidencian los diferentes eventos geológicos que modelaron el paisaje característico de la región.

El proceso geológico más evidente está representado por la Orogenia Laramide, causado por esfuerzos tectónicos compresivos y distensivos que dieron lugar a la formación de un paisaje accidentado, que se caracteriza por su relieve y pendientes, con altitudes que varían desde 900 msnm en las márgenes de la cañada que forma el cauce del Río Moctezuma, hasta más de 3250 msnm en las inmediaciones del Cerro El Espolón, localizado en la porción suroriental del acuífero.

Otros cerros con elevaciones considerables son: El Gallo con más de 2 700 msnm, ubicado el noreste del poblado Maconí, el Cerro Tierras Coloradas que alcanza más de 2 000 msnm y se encuentra al sureste del poblado Santo Tomás, así como el Cerro Volantín, localizado al noreste, en los límites del acuífero, cuya elevación es de 2100 msnm.

Debido al relieve escarpado en la zona serrana, geomorfológicamente, se considera que esta zona se encuentra en una etapa de juventud tardía, con topografía abrupta y cañones profundos.

4. GEOLOGIA

La geología de la zona está representada por rocas sedimentarias que afloran en las sierras de topografía abrupta, mientras que en los valles y pie de montes existen depósitos de origen aluvial (figura 2).

4.1. Estratigrafía

En la superficie del acuífero afloran rocas sedimentarias y volcánicas cuyo rango estratigráfico varía del Jurásico Superior al Reciente. La descripción de las diferentes unidades litológicas se presenta a continuación, de la más antigua a la más reciente:

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Las Trancas

Está constituida de calizas, calizas arcillosas y filitas, dispuestas en capas muy delgadas con superficies brillantes lustrosas, colores variables del negro al blanco, pasando por todos los grises, que contienen abundantes plagioclasas con reflejos rosados. Aflora en una serie de franjas con dirección preferente noroeste-sureste.

Contiene intercalaciones de lutitas y limonitas que alternan con capas delgadas de caliza. Hacia la cima se observa disminución de los estratos de lutitas que se adelgazan (menores a 5 cm) y las capas carbonatadas incrementan su espesor, hasta 20 a 30 cm.

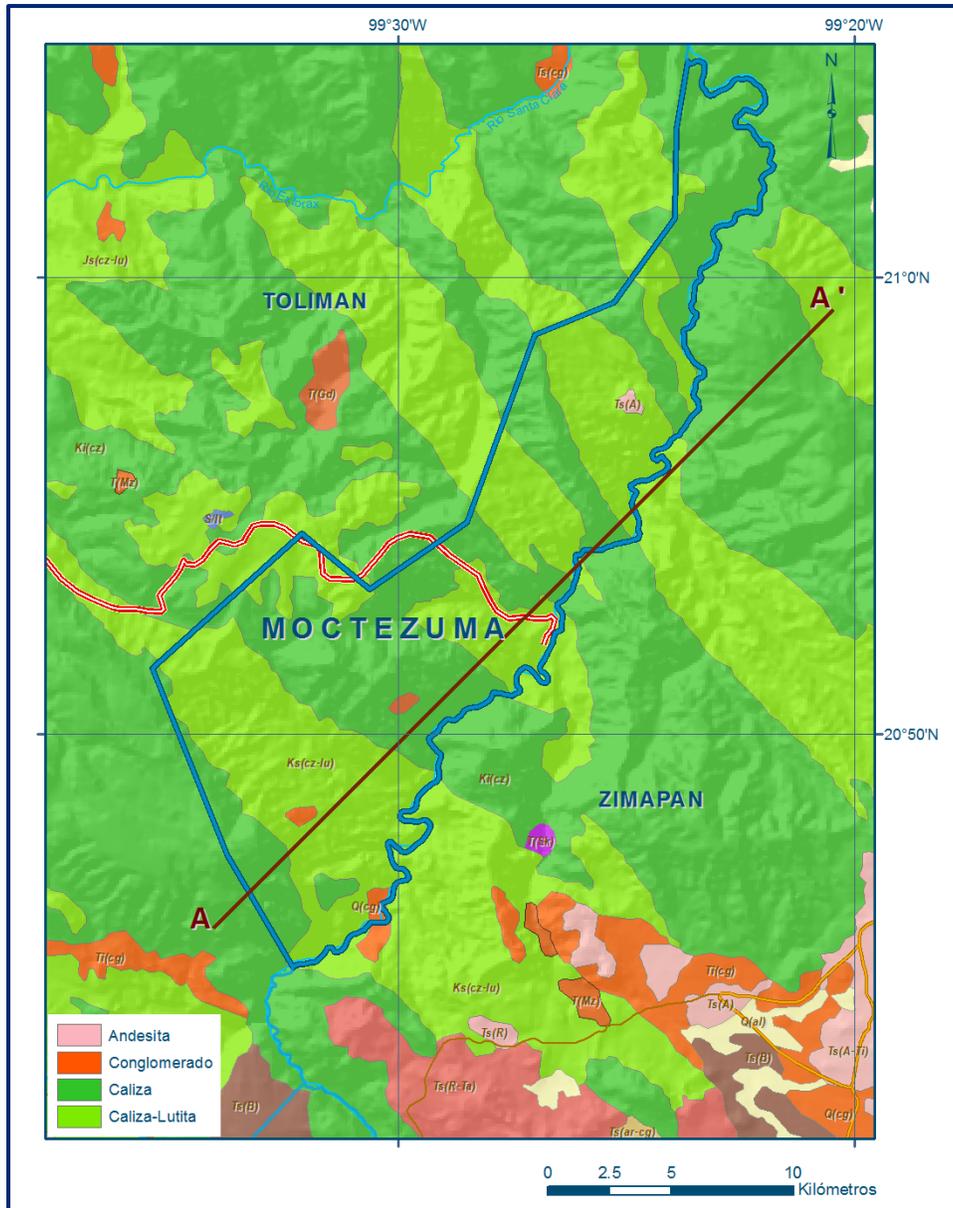


Figura 2. Geología general del acuífero

CRETÁCICO

Formación El Doctor

Es la unidad con mayor distribución en el acuífero, está representada por calizas con estructuras y texturas variadas, formadas en diferentes ambientes de depósito como plataformas carbonatadas representadas por el banco calcáreo El Doctor que se localiza al suroeste del área y representado por las facies Ladrón y Socavón, y la plataforma de la cuenca Valles-San Luis Potosí, ubicada al noroeste del área, representada por las facies San Joaquín y La Negra.

Esta formación sobreyace concordantemente a la Formación Las Trancas, se distribuye en una serie de franjas orientadas preferentemente al noroeste. En la porción suroriental del acuífero se observan bancos de calizas relacionadas con un arrecife de crecimiento vertical, en el cual se han distinguido cuatro facies: i) *Cerro Ladrón*: masa lenticular de caliza constituida por lodos calizos litificados de estratificación gruesa, ii) *Socavón*: calcarenitas de estratificación gruesa y conglomerado de grano fino, con abundante presencia de coquina clástica, iii) *San Joaquín*: es una caliza gris oscura de estratificación gruesa con abundantes nódulos de pedernal negro, iv) *La Negra*: estratos de caliza de 10 a 20 cm de espesor, depositada en aguas más profundas, correlacionable con la Formación Cuesta del Cura del Noroeste de México.

Formación Soyatal-Mexcala

Al igual que la mayoría de las unidades litológicas, está distribuida en franjas orientadas en dirección preferencial noroeste-sureste.

Tiene una litología variada con cambios de facies laterales y verticales que se diferencian en el contenido de materiales calcáreos y clásticos. Está representada por una alternancia de calizas arcillosas de color gris oscuro, interestratificadas con lutitas grises o rojizas; estratos de calizas puras y bandas de pedernal. Sobreyace en forma concordante a la Formación El Doctor, al suroeste del área se encuentra subyaciendo en forma discordante a rocas ígneas extrusivas de la Formación Las Espinas, de edad Terciario Superior y al conglomerado del Grupo El Morro, al sur del área.

En la base de esta formación se observan contactos tectónicos con otras formaciones, principalmente con la Formación El Doctor por medio de fallas inversas y normales de extensión regional, como el caso de los sinclinales Maconi, El Fraile y Jiliapan.

Formación Las Espinas

Constituida principalmente por una secuencia de lavas andesíticas y basálticas, en menor proporción por tobas; sobreyace concordantemente al Grupo El Morro y sus afloramientos son de reducidas dimensiones, como sucede en la zona minera conocida como Santa Gorgonia-San Pascual. Al noroeste del área forma una meseta angosta que descansa sobre rocas jurásicas de la Formación Las Trancas. Uno de los afloramientos característicos de esta unidad forma una meseta de rocas basálticas al suroeste del Rancho Sombrerete.

Grupo El Morro

Se trata de un conglomerado polimíctico litológicamente uniforme, constituido preferentemente por fragmentos angulosos y subangulosos de caliza de color gris de 2 a 20 cm de diámetro y en menor proporción de 45 a 30 cm. Su matriz está constituida por arena calcárea, en menor proporción cuarzo, feldespato y micas.

Su contacto inferior es mediante una discordancia angular sobre rocas de la Formación Soyatal-Mexcala. Presenta echados menores de 20° y su contacto superior con las rocas volcánicas de la Formación Las Espinas es mediante interdigitaciones locales.

TERCIARIO

Rocas Intrusivas

Están presentadas por rocas de composición granodiorítica a diorítica, que afloran de manera aislada en localidades dentro de la superficie del acuífero en forma de stocks y diques que intrusionan al paquete sedimentario del Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

RECIENTE

Está representado por conglomerados polimícticos de pie de monte, aluviones y suelo residual. El conglomerado está constituido por fragmentos de caliza provenientes del banco calcáreo El Doctor y en menor proporción por lutitas de la Formación Soyatal-Mexcala. Los aluviones están formados por gravas, arenas y limos producto de la erosión de las rocas que afloran en la superficie del acuífero.

El suelo residual proviene de la alteración meteórica de los diferentes tipos de roca. Se encuentra rellenando las partes topográficamente más bajas, el espesor de esta unidad es inferior a 50 m.

4.2. Geología estructural

El análisis de imágenes de satélite permite identificar curvilineamientos en una franja orientada en dirección noroeste-sureste, posiblemente relacionados con grandes cuerpos intrusivos sepultados, cuyas manifestaciones superficiales corresponden a los troncos y diques que afloran en la región, en la cual se desarrollaron una serie de plegamientos isoclinales asociados a cabalgaduras de grandes dimensiones.

Éstas son características de la Sierra Madre Oriental, destacando la Cabalgadura El Doctor (Carrillo-Martínez y Suter, 1982), desarrollada a lo largo del borde oriental del Banco El Doctor, su traza en superficie tiene un rumbo al NW. La Cabalgadura de Jiliapan (Carrillo-Martínez y Suter, 1982), que se desarrolló a lo largo del borde occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, con rumbo al NW, aflora en la porción noreste. Entre estas dos cabalgaduras se formó una serie de pliegues isoclinales de grandes dimensiones, que se extienden por varios kilómetros de noroeste a sureste, los más importantes son el Anticlinorio El Piñón y el Anticlinal Bonanza (Segestrom, 1862). El primero está limitado por el Sinclinorio de Macomí, al suroeste, y por el Sinclinal El Aguacate al noreste, esta estructura es asimétrica con amplitud de 11 km. El Anticlinal Bonanza tiene una vergencia hacia el noreste y cabalga sobre el Sinclinal El Fraile, su flanco noreste está cortado por la Cabalgadura El Fraile, su plano de falla es de 23° al SW, está limitado al suroeste por el Sinclinal El Aguacate y al noreste por el Sinclinal El Fraile. Los Anticlinales están constituidos en su núcleo por areniscas, lutitas y calizas de la Formación Las Trancas, mientras que sus flancos están conformados por las calizas de la Formación El Doctor.

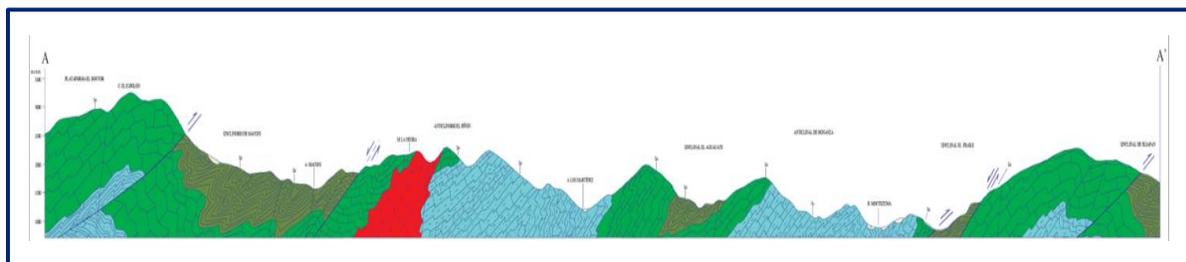
Los Sinclinales están constituidos por lutitas de la Formación Soyatal-Mexcala. Dadas las características geométricas de las estructuras descritas, se interpreta que los esfuerzos tectónicos que las originaron, actuaron de suroeste a noreste. Estos esfuerzos compresivos han sido atribuidos a la deformación Laramide de fines del Cretácico y principios del Terciario. Las Intrusiones son postectónicas y emplazadas después de la deformación laramídica, asociadas a fracturas de rumbo sensiblemente norte-sur. Finalmente, se desarrolló un fracturamiento y fallamiento normal conjugado de direcciones NE y NW (Carta Geológico-Minera San Joaquín F14C58, escala 1:50,000. SGM, 1998)

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica así como la geología superficial recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible establecer que el acuífero se encuentra constituido, en la zona de valles, por sedimentos aluviales de granulometría variable, desde gravas hasta arcillas, que conforman el cauce del Río Moctezuma, otros ríos y arroyos intermontanos, así como los conglomerados polimícticos, que han sido transportados por los escurrimientos superficiales desde las regiones topográficamente más altas. Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región

A mayor profundidad se encuentran las calizas de las formaciones Soyatal-Mexcala y El Doctor, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución; debido a que están alternadas con lutitas y limolitas, presentan condiciones de confinamiento. Este acuífero aún no sido explorado. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y disolución. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de lutitas y limonitas que alternan con capas delgadas de calizas y margas de la Formación Las Trancas y por las rocas intrusivas (figura 3).

El sistema acuífero está controlado por un conjunto de cavidades de tipo kárstico, así como por unidades calcáreas de plataforma, regidos por las complejas características estructurales, como la deformación dúctil y frágil presentes en la zona de estudio, que ocasionan la presencia de fracturas abiertas de gran tamaño en la Formación El Doctor, mientras que en la Formación Las Trancas las fracturas tienden a presentar rellenos producto de mineralización.



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-C58 "San Joaquín" Esc. 1:50,000 (SGM, 1998)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGIA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada de extensión y espesor reducido, así como por conglomerados, cuya presencia se restringe a los pequeños valles aluviales y al cauce de ríos y arroyos; la unidad inferior está conformada por calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

El sistema acuífero alojado en las calizas de la Formación El Doctor presenta gran desarrollo de carsticidad asociado a un sistema de fracturas cuyo contenido de arcillas varía de moderado a alto, dando origen a la presencia de una gran cantidad de manantiales.

5.2. Parámetros hidráulicos

En el área que cubre el acuífero no se han realizado pruebas de bombeo para la determinación de las propiedades hidráulicas del acuífero, debido principalmente al escaso número y a las características de los aprovechamientos; la gran mayoría de ellos son manantiales.

Sin embargo, de acuerdo con datos de campo obtenidos del estudio de 2011, se determinó que la transmisividad promedio para los materiales calcáreos de la Formación El Doctor es **de 0.00521 m²/s (450 m²/día)**, en la cual se ubican los manantiales de las localidades El Sarro y Socavón, con 50 y 150 lps de caudal, respectivamente. La conductividad hidráulica representativa de zonas con mayor presencia de material calcáreo y zonas con mayor densidad de fracturas abiertas es de **0.00174 m/s (150 m/día)**.

Para las facies con mayor contenido de arcillas de la Formación Las Trancas la transmisividad promedio es de **0.0011 m²/s (100 m²/día)** con un valor promedio de conductividad hidráulica de **0.00011 m/s (10 m/día)**, valores representativos para zonas donde existen manantiales con caudales de 1 a 10 lps. Para la Formación Soyatal la transmisividad promedio es **de 0.00011 m²/s (10 m²/día)** y conductividad hidráulica de **0.000011 m/s (1 m/día)**, en las zonas donde predominan las calizas compactas con fracturamiento existen manantiales con caudales de 2 lps.

El coeficiente de almacenamiento para estos materiales en las zonas más carstificadas de la Formación El Doctor se estima que es de **0.02**, mientras que en las facies carbonatadas que generan manantiales en el contacto con la Formación Las Trancas se estima un valor de **0.0005**.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el año 2011.

Además, las escasas mediciones piezométricas recabadas durante los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y la gran mayoría de los aprovechamientos censados son manantiales, que impiden realizar las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático.

5.4. Comportamiento piezométrico

No se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático debido a que la gran mayoría de los aprovechamientos son manantiales. Además, debido a las condiciones orográficas del acuífero, existen pequeños valles intermontanos esparcidos en toda la superficie del acuífero, en los que se extrae de manera incipiente el agua subterránea de los niveles freáticos someros. Debido al escaso número de aprovechamientos subterráneos existentes en el área que cubre el acuífero y al incipiente volumen de extracción, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En 2011 se tomaron muestras en 10 aprovechamientos, de los cuales 8 fueron manantiales, una noria y un aprovechamiento superficial. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, coliformes fecales y totales, etc., además de metales como aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, fierro, manganeso, mercurio y plomo, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, y por lo tanto para los diferentes usos. La concentración de STD presenta valores que varían de 184 a 602 mg/l.

Los valores de conductividad eléctrica varían de 382 a 1220 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$, para la temperatura de 14.3 a 29.9 °C y el pH de 7.1 a 8.4. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó la familia dominante bicarbonatada-cálcica, que representa agua de reciente infiltración, con tiempos de residencia muy cortos, que ha circulado a través de rocas carbonatadas. Únicamente una de las muestras corresponde al grupo de las sulfatadas-cálcicas.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como C₂-S₁, que representa salinidad media y contenido bajo de sodio intercambiable, considerada de buena calidad y apta para el riego en la mayoría de los casos y sin necesidad de prácticas de control de salinidad, aunque se recomienda utilizar en cultivos moderadamente tolerantes a la salinidad.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

En 2011 fueron censados 10 aprovechamientos, 2 pozos, una noria y 7 manantiales. La totalidad de los aprovechamientos se encuentran activos. A través de los pozos y la noria se extrae un volumen total de **0.01314** hm³ anuales, destinado en su totalidad al usos doméstico y pecuario. Del total de obras 3 (manantiales) se utilizan para uso público-urbano y 7 para usos doméstico-pecuario (2 pozos, 1 noria y 4 manantiales)

Adicionalmente, los **7 manantiales** descargan en total 206 lps que equivalen a un volumen anual de **6.5 hm³ anuales**, destinados también en su totalidad a los usos doméstico y pecuario. El manantial Socavón descarga aproximadamente 150 lps,

El Sarro 50 lps; y los restantes 6 lps provienen de 5 manantiales pequeños ubicados en zonas serranas.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

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

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

7.1. Entradas

Las entradas al acuífero Moctezuma están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv).

No existe información piezométrica actual ni histórica que cubra la zona del acuífero. La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo hechos se encuentra dispersa en tiempo y espacio, de tal manera que no es posible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas.

Aunado a esto, existen pocos aprovechamientos del agua subterránea y la superficie del acuífero está conformada en su mayor parte por sierras entre las cuales existen pequeños valles intermontanos en los que se localizan los escasos aprovechamientos.

Por estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en la superficie total de **239 km²** del acuífero, para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

V_{LL}: Volumen de lluvia;

V_{ETR}: Volumen evapotranspirado;

V_{ESC}: Volumen escurrido;

V_{INF}: Volumen infiltrado;

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

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

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (239 km²) por la lámina de precipitación media anual (910.5 mm):

$$V_{LL} = 239 \text{ km}^2 (0.910 \text{ m}) = \mathbf{217.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando el valor medio anual de precipitación de 910 mm y temperatura de 13.1 °C. Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo, define la siguiente expresión para la estimación de la evapotranspiración real:

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc, es que la precipitación no debe ser menor a la relación $0.31L$. En caso contrario se obtiene una $ETR > P$ y para estos casos se debe considerar a $ETR = P$. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración de 586 mm anuales.

$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$			
$L = 300 + 25T + 0.05T^2$			
T (°C) =	13.1		
P (mm) =	910	P ² =	828100
L =	739.90455	L ² =	547458.743
ETR (mm)	585.9		

Por lo tanto el volumen de ETR es: $V_{ETR} = 239 \text{ km}^2 (0.5859 \text{ m}) = \mathbf{140.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$.

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

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

$$\begin{matrix} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{NATURAL DE LA} \\ \text{CUENCA} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{PRECIPITACION} \\ \text{ANUAL DE LA} \\ \text{CUENCA} \end{matrix} * \begin{matrix} \text{AREA DE LA} \\ \text{CUENCA} \end{matrix} * \begin{matrix} \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \end{matrix}$$

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

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

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

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

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

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

Si K resulta menor o igual que 0.15,

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

Si K es mayor que 0.15

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

Donde:

P: Precipitación anual;

Ce: Coeficiente de escurrimiento anual;

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

De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1, 000,000 en la zona que comprende el Acuífero Moctezuma predominan los siguientes tipos de suelo: Cambisol, Feozem, Litosol, Luvisol, Rendzina y Regosol.

En cuanto al uso de suelo (figura 4), de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1,000,000, el 46% de la superficie del acuífero está cubierta por matorral, en la que el suelo es tipo B, por lo que K=0.20; 45% del acuífero presenta bosque, suelo tipo C, por lo que K=0.26; la selva se presenta en 5.5% de la superficie del acuífero, suelo tipo A, por lo que K=0.18; el área de uso agrícola con 3.5% de la superficie del acuífero, en donde el suelo es tipo A, y por lo tanto K=0.24.

$$\mathbf{K \text{ ponderado}} = 0.20 (0.46) + 0.26 (0.45) + 0.18 (0.055) + 0.24 (0.035)$$

$$\mathbf{K \text{ ponderado}} = \mathbf{0.227}$$

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.227, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

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

$$\mathbf{Ce = 0.1266}$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento: $V_{ESC} = 0.1266 (217.5 \text{ hm}^3) = 27.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$.

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

$$\begin{aligned} V_{INF} &= V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \\ V_{INF} &= 217.5 - 140.0 - 27.5 \\ V_{INF} &= 50.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 217.5 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.23, lo que da idea de la capacidad de infiltración de las rocas calcáreas carstificadas.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 50.0 hm³/año en los 239 km² de superficie del acuífero. Por lo que la **Rv = 50.0 hm³/año**.

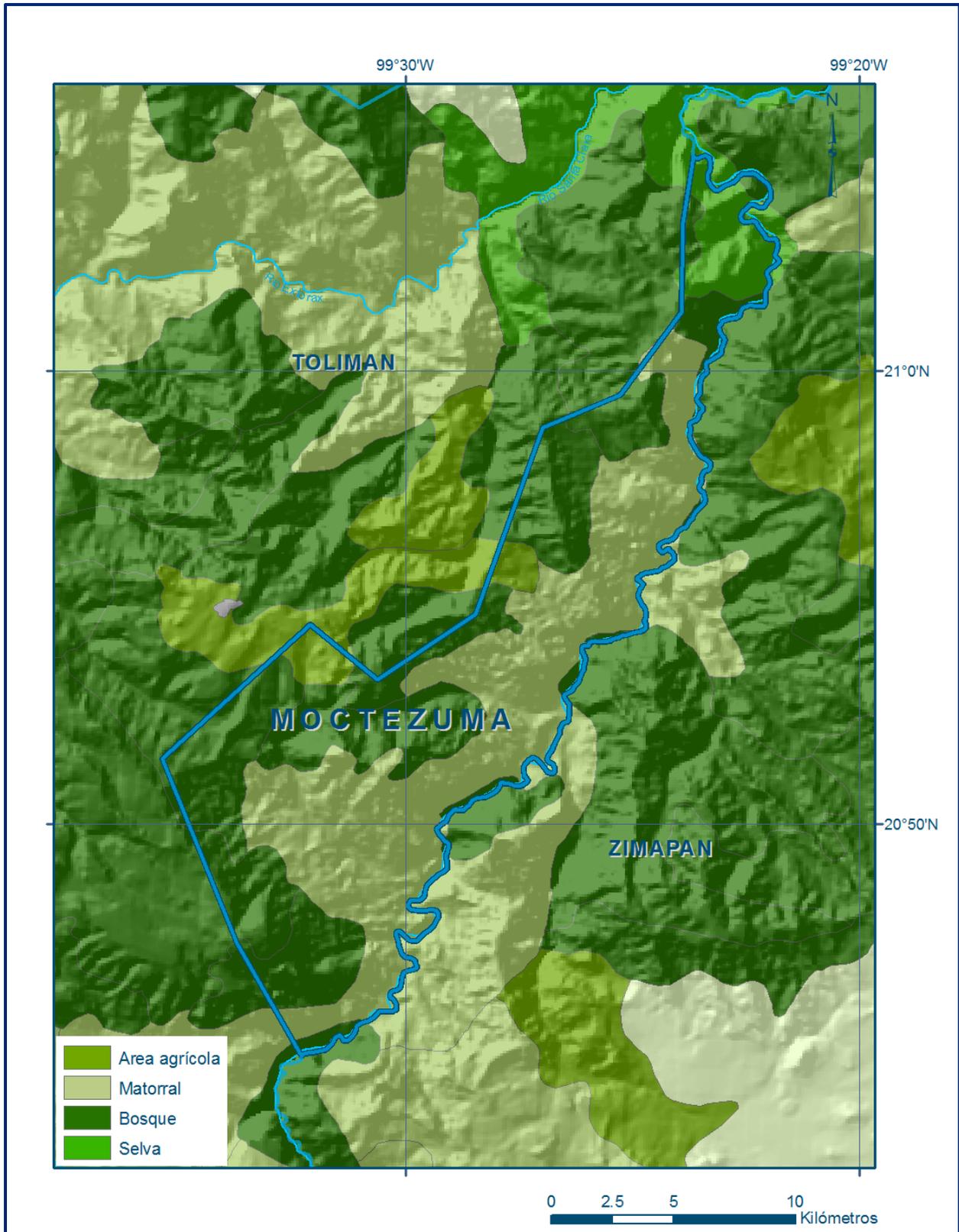


Figura 5. Uso de suelo

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **0.013 hm³ anual**.

7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificó la existencia de 7 manantiales, que en conjunto descargan un caudal de 206 lps, que representan un volumen de **6.5 hm³ anuales**.

7. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **50.0 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **DNC = 6.5 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **316,354 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 50.0 - 6.5 - 0.316354 \\ \text{DMA} &= 43.183646 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **43,183,646 m³ anuales.**