

ISSN: 1665-0875

GEOCALLI

Cuadernos de Geografía

Aguas subterráneas
y los residuos
sólidos urbanos
en Celaya,
Guanajuato, México



Año 21, Núm. 42
julio-diciembre de 2020



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
Centro Universitario de
Ciencias Sociales y Humanidades
División de Estudios Históricos y Humanos
Departamento de Geografía
y Ordenación Territorial



GEOCALLI CUADERNOS DE GEOGRAFÍA



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO
DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES
DIVISIÓN DE ESTUDIOS HISTÓRICOS Y HUMANOS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
Y ORDENACIÓN TERRITORIAL

AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
EN CELAYA, GUANAJUATO, MÉXICO

Julio-diciembre de 2020

Año 21, Núm. 42

Geocalli, Cuadernos de Geografía, Año 21, núm. 42 julio-diciembre de 2020 es una publicación semestral editada por la Universidad de Guadalajara, a través del Departamento de Geografía y Ordenación Territorial, de la División de Estudios Históricos y Humanos del Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades. Avenida de los Maestros, puerta 3, Edificio N, Colonia Alcalde Barranquitas, C.P. 44260, Guadalajara, Jalisco, México. Teléfonos: (33) 38193381 y 38193386. Dirección electrónica: www.geografia.cucsh.udg.mx. Correo electrónico: revista.geocalli@csh.udg.mx, editora responsable: Mercedes Arabela Chong Muñoz. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2011-100311310400-102, ISSN: 1665-0875, otorgado por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Impresa por Pandora Impresores, Caña 3657, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, México. Este número se terminó de imprimir el 1 de julio de 2020, con un tiraje de 200 ejemplares.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad de Guadalajara.

LATINDEX-Catálogo (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal). Consultar: <http://www.latindex.unam.mx>



GEOCALLI

DIRECTORIO
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

RECTOR GENERAL
Dr. Ricardo Villanueva Lomelí

VICERRECTOR
Dr. Héctor Raúl Solís Gadea

SECRETARIO GENERAL
Mtro. Guillermo Arturo Gómez Mata

CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS
SOCIALES Y HUMANIDADES

RECTOR DEL CENTRO
Dr. Juan Manuel Durán Juárez

SECRETARIA ACADÉMICA
Mtra. Ana María de la O Castellanos Pinzón

SECRETARIA ADMINISTRATIVA
Lic. Xochitl Ferrer Sandoval

DIRECTORA DE LA DIVISIÓN DE
ESTUDIOS HISTÓRICOS Y HUMANOS
Dra. Patricia Córdova Abundis

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
Y ORDENACIÓN TERRITORIAL
Dr. Luis Felipe Cabrales Barajas

JEFA DE LA UNIDAD DE APOYO
EDITORIAL
Lic. María del Rosario Ortiz Hernández







GEOCALLI

DIRECTORA

Dra. Mercedes Arabela Chong Muñoz

EDITORES

Dra. Rosalba Castañeda Castro

Mtro. José Hildelgado Gómez Sención

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Luis Felipe Cabrales Barajas

Universidad de Guadalajara, México

Dr. Julio Muñoz Jiménez

Universidad Complutense de Madrid,
España

Dr. Miguel Ángel Troitiño Vinuesa[†]

Universidad Complutense de Madrid,
España

Dr. Luis Delgado Argote

Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada, México

Dr. Luis Chías Becerril

Universidad Nacional Autónoma
de México, México

Dr. Omar Moncada Maya

Universidad Nacional Autónoma
de México, México

Dr. Ángel Massiris Cabeza

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia, Colombia

Dr. David Robinson

Syracuse University, Estados Unidos





ÍNDICE

PRESENTACIÓN	9
ACERCA DE LOS AUTORES	11
ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO CRITERIO DE EVALUACIÓN PARA DETERMINAR LA LOCALIZACIÓN DE UN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA LA CIUDAD DE CELAYA, GUANAJUATO, MÉXICO	13
Introducción	17
El proyecto: selección del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos	20
Objetivo	21
Marco geológico regional	21
Fallamiento	25
Geología superficial, estratigrafía y acuíferos	28
Aprovechamientos de agua subterránea	34

Usos del agua en el área de estudio	40
Niveles piezométricos	45
Calidad del agua subterránea	55
Conclusiones	56
Bibliografía	60
INFORMACIÓN PARA COLABORADORES	64

PRESENTACIÓN

Uno de los problemas que requiere mayor estudio dentro del campo de la geografía es la transformación del territorio y sus relaciones con el subsuelo. El acelerado crecimiento de las ciudades, el aumento de los residuos sólidos que resultan de las actividades cotidianas de los habitantes, la búsqueda de un sitio donde localizar su disposición final sin que perjudique las aguas subterráneas indispensables para el desarrollo de las ciudades. Con todo lo anterior se pueden generar argumentos para fortalecer dicha línea de investigación, misma que puede convertirse en un insumo para instrumentar políticas públicas.

Lo importante de esta entrega titulada “Análisis espacio-temporal de las aguas subterráneas como criterio de evaluación para determinar la localización de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos para la ciudad de Celaya, Guanajuato, México”, es la evaluación de las condiciones actuales de los acuíferos desde la evolución geológica y su formación, la presión ejercida sobre esta fuente de abastecimiento, detección de los desequilibrios en el tiempo y su resultante espacial, además de los efectos en la calidad del agua. También son relevantes sus aportaciones en la identificación de los riesgos que comprometen la calidad de vida de los habitantes, el cuidado en la extracción de aguas subterráneas y mitigar los impactos en el territorio.

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya... _____

Cabe destacar que es un tema de la práctica del saber geográfico y complementado con la utilidad de la herramienta cartográfica en la ubicación del agua subterránea y las urbanizaciones involucradas en el problema. Con ello *Geocalli, Cuadernos de Geografía* pretende contribuir a la difusión de conocimiento que propicie debate público y ponga sobre la mesa un asunto territorial poco atendido.

La Directora

ACERCA DE LOS AUTORES

Mtro. Armando Chávez Hernández, profesor investigador en el Departamento de Geografía y Ordenación Territorial de la Universidad de Guadalajara. Licenciado en Geografía por el mismo departamento, magister por la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) en Gestión del Paisaje y del Territorio, cursos de posgrado en el programa de Paisaje y Territorio de la misma UAM; realizó estancia académica en la Universidad de Amsterdam en el laboratorio Hugo de Vries. Ha desarrollado trabajos de investigación aplicada de forma individual y colectiva en equipos transdisciplinarios en: análisis y gestión del paisaje, fragmentación y conectividad del paisaje, impacto ambiental, ordenamiento territorial, declaratorias de áreas naturales protegidas y ha publicado diversos trabajos relacionados con estas temáticas.

Correo: armando.chernandez@academicos.udg.mx

Mtro. Javier Rentería Vargas, profesor en el Departamento de Geografía y Ordenación Territorial de la Universidad de Guadalajara, México. Licenciado en Geografía y maestro en Economía por la Universidad de Guadalajara. Obtuvo créditos en el programa de Doctorado en Ciencias Sociales de El Colegio de Jalisco. Tiene una amplia experiencia en la docencia en la que ha participado en distintos programas de licenciatura y posgrado tanto en

la Universidad de Guadalajara como en instituciones de educación superior nacionales. Las líneas de investigación a las que se ha dedicado cubren los estudios territoriales, los procesos de urbanización periférica y la ordenación territorial, proyectos que han recibido financiamiento como instituciones externas tanto públicas como privadas. En los últimos tres años ha publicado cuatro artículos en revistas especializadas y memorias de congresos como co-autor con los miembros del Cuerpo Académico. CA-226 Geografía y Desarrollo Territorial.

Correo: Javier.renteria@academicos.udg.mx

Mtro. Carlos Ernesto Vázquez Arias, director de Planeación en la Procuraduría Estatal de Protección al Ambiente del Gobierno del Estado de Jalisco, México. Maestro en Cartografía por la Technische Universität München. Licenciado en Geografía por la Universidad de Guadalajara. Cuenta con experiencia profesional en consultoría en asuntos ambientales, de planeación territorial, cartografía y geomática. En materia de investigación, su trabajo se ha concentrado en temas relacionados con el concepto de envejecimiento en el lugar y el análisis de políticas públicas para adultos mayores en contextos urbanos. En el ámbito público, ha estado relacionado durante los últimos siete años con procesos de planeación gubernamental en temáticas como el medio ambiente y el desarrollo institucional, social y regional.

Correo: carlos.vazquez@tum.de

**ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS COMO CRITERIO DE EVALUACIÓN
PARA DETERMINAR LA LOCALIZACIÓN DE UN
SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS PARA LA CIUDAD DE CELAYA,
GUANAJUATO, MÉXICO**

Armando Chávez Hernández
Javier Rentería Vargas
Carlos Ernesto Vázquez Arias

Resumen

Esta entrega analiza diferentes condicionantes regionales –en particular aquellas que tienen que ver directamente con las aguas subterráneas– como criterios de evaluación para determinar la localización óptima de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos para la ciudad de Celaya, Guanajuato. En la región existen evidencias de deterioro progresivo de los acuíferos, por lo cual los daños potenciales, no obstante puntuales, pueden ser grandes, con lo cual se compromete el futuro desarrollo de la ciudad y sus municipios vecinos. Los impactos pueden trascender a más de un millón de habitantes, por lo que no cabe duda que la selección –bajo criterios geográficos definidos– de

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya... _____

un sitio de disposición final de residuos y su control bajo preceptos técnicos rigurosos son necesidades acuciantes que cualquier urbe debe satisfacer; sin embargo, tanto o más lo son, la preservación y la adecuada gestión de las fuentes de abastecimiento hídrico. El objetivo que se planteó este trabajo como parte de un proyecto mucho más amplio, bajo una aproximación espacial y temporal, fue evaluar las condiciones actuales de los acuíferos desde varias perspectivas entre las que destacan como elementos de análisis: a) la evolución geológica y sus efectos sobre las condiciones naturales de las formaciones acuíferas; b) la presión sobre esta fuente de abastecimiento; c) la detección de los desequilibrios en el tiempo y su resultante espacial; d) los efectos en la calidad del agua. Dichos elementos podrían ser considerados en los aspectos técnicos de diseño y operación de la infraestructura del sitio del proyecto final.

Palabras clave: Sitio de disposición final, residuos sólidos urbanos, agua, acuífero, pozo, extracción.

Abstract

This study analyses differential conditions, especially those that are connected to underground water, as evaluative criteria to determine the optimal location of a site for the urban solid waste of the city of Celaya, Guanajuato, Mexico. In the region there exists evidence of the progressive

deterioration of aquifers which would potentially be serious for the future development of the city and its neighboring municipalities. Since such impacts could affect more than a million people it is clear that the selection of the site, following well-defined geographic criteria, and its use must be under strict technical control since the preservation of hydrologic supply is critical. This study is part of a wider investigation of factors affecting the regional aquifers, including a) geological evolution and its relation to natural conditions of aquifers; b) pressure on aquifers as of water supply sources; c) detection of temporal imbalances and their spatial affects; d) effects on water quality. Such elements should be considered in the technical design and operation of the infrastructure of the site of the final project.

Keywords: Site selection, solid urban waste, water, aquifers, wells, extraction.



Introducción

El agua es un recurso escaso y desigualmente distribuido en México. Aunado a esto, la creciente contaminación de sus aguas superficiales, genera que las fuentes subterráneas se conviertan en un recurso valioso y, en ocasiones, que en algunos lugares sea la única fuente de abastecimiento del vital líquido. Este trabajo estudia las interacciones que puede tener un proyecto específico, como lo es la construcción y operación de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos; que ejemplifica la problemática de atender, de manera paralela, las necesidades de aprovisionamiento, el alto potencial de riesgo ambiental por la contaminación que puede generar un proyecto de estas características y el creciente desarrollo económico de las regiones, como es el caso del Bajío guanajuatense.

De 1990 a 2020 la población de los municipios de estudio creció¹ a un ritmo de 1.6% anual; si bien la tasa de cambio demográfico tiende a decrecer, la presión aumenta por la diversificación productiva y el crecimiento industrial.

Se asume que la presión demográfica, la actividad agrícola, pero sobre todo la diversificación de actividades económicas con base en la industria automotriz que ha experimentado el área en los últimos 50 años, influyó en el deterioro ambiental, de manera especial en las fuentes de

¹ Los cálculos se realizaron con base en los Censos de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) 1990, 2000 y 2010, así como con las estimaciones de crecimiento del Consejo Nacional de Población (Conapo, 2019).

abastecimiento de agua subterráneas, lo cual tornó más vulnerables los acuíferos de la región. A tal grado, que un proyecto proclive a generar contaminantes potencialmente peligrosos, requiere de medidas extremas, de ahí que su ubicación se vuelva un asunto de particular preocupación para las autoridades locales. Esto obliga a realizar un abordaje con dimensión espacial relacionado con las aguas subterráneas, que permita mejorar la toma de decisiones respecto de las relaciones e implicaciones de su implementación.

Lo que el lector encontrará en adelante es el análisis de la evolución del contexto geológico regional y local del área de estudio, las características de las formaciones acuíferas, los perfiles disponibles, la evolución de los niveles freáticos relacionados con la explotación de agua subterránea, la cantidad y calidad del agua, así como las posibles implicaciones de la extracción en sí y su relación con la implementación de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos (SDFRSU). Como una fuente potencial de contaminación, todos estos insumos permitirán aportar elementos que contribuyan en el razonamiento sobre tres aspectos fundamentales: a) su ubicación final, b) las posibles limitaciones del proyecto y c) la infraestructura necesaria para su correcta operación, que garanticen la preservación de la principal fuente de abastecimiento hídrico regional.

Es de particular importancia la información que aporta este trabajo para la toma de decisiones en un contexto

regional de aumento demográfico y de intenso crecimiento industrial, fenómenos vertebrados con la presencia de grandes empresas automotrices. En ese sentido, el crecimiento de los centros de población demanda servicios como contar con un lugar para la disposición segura de residuos sólidos urbanos, ante la obsolescencia, saturación y problemas operativos que presenta el sitio actual.

A partir de lo anterior, los objetivos que guían el estudio se basan en una aproximación espacial y temporal encaminada a aportar conocimiento sobre las condiciones de los acuíferos, la presión en las fuentes de abastecimiento, reales o potenciales y los desequilibrios, así como las dificultades técnicas que debe solventar el proyecto de operación de un sitio con estas características. En primer lugar, para identificar la mejor ubicación posible, y segundo, para establecer criterios de certidumbre en la construcción y manejo del sitio de acogida.

El proceso de análisis implicó la revisión bibliográfica disponible de aspectos como las condiciones geológicas, base para comprender el funcionamiento de las formaciones acuíferas, la recopilación de información de los organismos operadores de los aprovechamientos de agua subterránea y, por último, el análisis de las interacciones que han llevado a las condiciones actuales y sus consecuencias en el volumen y calidad del agua disponible. Con ello, fue posible elaborar diferentes modelos espaciales mediante interpolaciones que permiten observar los niveles freáticos, el volumen, la calidad y los niveles de contaminación

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya... _____
de las aguas subterráneas. Por último, son identificados los determinantes de los impactos posibles, actuales y potenciales del SDFRSU.

El proyecto: selección del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos

Este consiste en un nuevo SDFRSU para la ciudad de Celaya y sus municipios adyacentes; es decir, tiene carácter regional y de largo plazo ante un fuerte crecimiento poblacional e industrial. La inversión pública, por tanto, debe garantizar entre otras muchas cosas una ubicación que optimice los traslados y mantenga en su mínima expresión los potenciales daños ambientales, en especial aquellos relacionados con los recursos hídricos subterráneos. Al momento de concluir este trabajo su ubicación exacta aún no se ha determinado, ya que además de las conclusiones técnicas, interfieren procesos sociales y políticos en curso, aspectos que además están condicionados por las regulaciones que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (Semarnat, 2004).

El área de estudio comprende total o parcialmente el territorio de ocho municipios del estado de Guanajuato. Con una población de 1 119 865 habitantes en el año 2020 (Consejo Nacional de Población [Conapo], 2019), se ubica en el área comprendida entre las coordenadas extremas 20.735° de latitud Norte, 101.067° de longitud Oeste y 20.195° de latitud Norte, 100.491° de longitud Oeste. En esta delimitación geográfica, se asientan los municipios

de Apaseo El Alto, Apaseo El Grande, Celaya, Comonfort, Cortazar, Santa Cruz de Juventino Rosas, Tarimoro y Villagrán. En conjunto corresponden, en su mayor parte, a la región del Bajío en el centro de México, con límites con el estado de Querétaro (Figura 1).

Objetivo

Evaluar las condiciones actuales de los acuíferos desde varias perspectivas entre las que destacan como elementos de análisis:

1. La evolución geológica y sus efectos sobre las condiciones naturales de las formaciones acuíferas.
2. La presión sobre esta fuente de abastecimiento.
3. La detección de los desequilibrios en el tiempo y su resultante espacial.
4. Los efectos en la calidad del agua.

Marco geológico regional

El contexto geológico de los municipios del área de estudio está dominado por la evolución reciente del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) o Faja Volcánica Transmexicana (FVT) que desde el Mioceno Superior aporta los materiales volcánicos más significativos en la construcción de las estructuras del relieve que caracterizan este sector. Los materiales volcánicos sobreyacen a un basamento mesozoico e incluso de mayor antigüedad como

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya...

lo demuestran los estudios gravimétricos que determinan que en el sector oriental del cvt, al cual corresponde esta área de acuerdo con la segmentación que define Ferrari (Ferrari, Orozco Esquivel, Manea y Manea, 2012), la placa continental alcanza espesores de hasta 50 kilómetros, aunque para el área específica que tratamos es de 45 kilómetros aproximadamente (Figura 1).

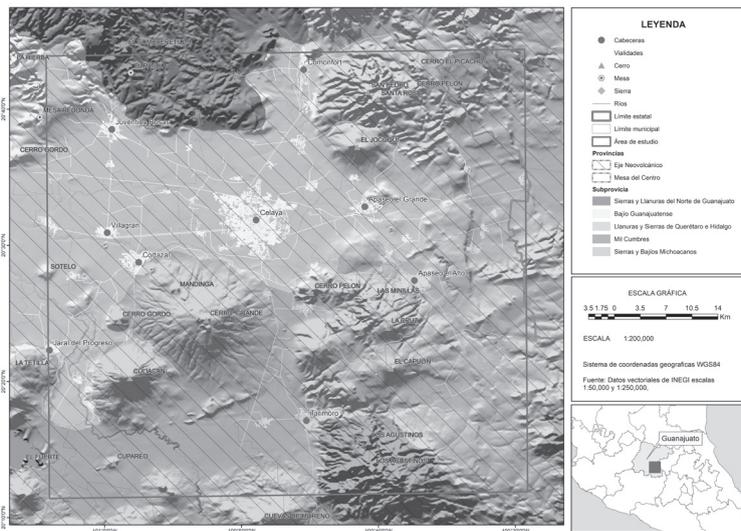


Figura 1. Provincias y subprovincias fisiográficas
Fuente: Elaboración propia.

Además de la provincia del cvt que constituye la mayor proporción del área de estudio, existe presencia de estructuras que corresponden a la Mesa Central, las cuales encontramos al norte del área, mismas que son un ejemplo de las rocas profundas que constituyen el basamento sobre el cual se depositaron diferentes materiales de la

actividad volcánica característica de la evolución del cvt y que rellenan las planicies agrícolas del Bajío.

El origen de la provincia del cvt ha sido interpretado de diversas maneras; no obstante, parece existir un mayor consenso en torno a la idea que se originó como consecuencia de la subducción de la placa del Pacífico en su choque con la placa Norteamericana, así como el dominio de una tectónica extensional (Figura 2).

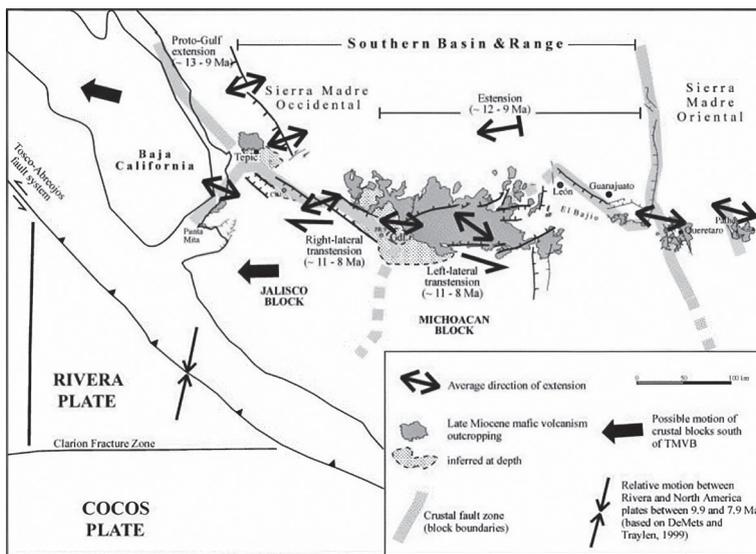


Figura 2. Configuración de placas y fuerzas entre sus límites durante el Mioceno Superior en México Central, y direcciones medias de extensión relacionadas con la reactivación de los límites de los bloques. Fuente: Ferrari et al. (2000, p. 179).

De la colisión de las placas continental y oceánica mencionadas se genera un arco volcánico continental en el

borde meridional de la placa Norteamericana, activo desde hace aproximadamente 10 millones de años; a diferencia de otros arcos volcánicos hay varias características peculiares que influyen en diferentes aspectos que condicionan las particularidades de las formaciones acuíferas, tomado de Ruiz Martínez (2004), estas son:

- (i) la gran variabilidad en el estilo volcánico y en la composición química de sus productos; (ii) la presencia de un vulcanismo alcalino de tipo intraplaca similar a los “basaltos de isla oceánica” (OIB), que proviene de un manto no contaminado por la subducción y que está, sólo en una pequeña proporción, asociado espacialmente al vulcanismo calco-alcalino dominante, que sí está relacionado con la subducción; (iii) la oblicuidad de la parte Central y Oriental del frente volcánico (dirección 98°), que forma un ángulo de aproximadamente unos 15° con respecto a la dirección de la Fosa de Acapulco o “Middle American Trench” (MAT); o (iv) la notable variación que presenta la anchura del arco (con mínimos de 65 km y un máximo de 200 km) (p. 24).

El CVT presenta una variabilidad estructural derivada de las diferencias en las direcciones de falla y los campos de esfuerzos, lo que permite dividir esta provincia en tres sectores: Oriental, Central y Occidental (Demant, 1978; Pasquaré, Garduño, Tibaldi y Ferrari, 1988), que presentan diferencias en la composición de los productos que fueron emitidos por los centros volcánicos a lo largo y ancho de la provincia del CVT.

Fallamiento

En el sector Central del cvt, entre el sistema de fallas Querétaro-Taxco y el *rift* de Colima, se desarrolla el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica o basáltico-andesítica, lo cual le da sus principales características a los acuíferos que se han desarrollado y que se explotan para las actividades agrícola en primer término y, de manera secundaria, para el abasto de agua domiciliaria e industrial.

La intensa tectónica a la que es sometido el cvt produce de manera natural la presencia de fracturas y fallas que inciden entre otras cosas, en el comportamiento y dinámica de las formaciones acuíferas de la zona.

Así, se observan (Figura 2) lineamientos preferenciales SE-NW, aunque la actividad tectónica es principalmente impulsada por una falla E-W de movimiento sinistral, que al menos desde el Mioceno Superior es la principal causante de la sismicidad del cvt (Figura 3). Todo lo anterior, en un marco regional de esfuerzos que desgarran la placa continental y genera un juego de bloques en movimiento que favorecen la emisión de una variedad de productos magmáticos y estructuras que caracterizan el relieve de la provincia del cvt (Pasquaré et al., 1988; Ferrari, Garduño, Innocenti, Manetti, Pasquere y Vaggeli, 1994a).

Es importante señalar que durante mucho tiempo se consideró que varias de las grietas identificadas, sobre

todo en la ciudad de Celaya y en sus proximidades, se atribuían a fenómenos de subsidencia, sin descartar la influencia de la sobre extracción de agua subterránea, los alineamientos se pueden asociar a un fenómeno conjugado entre la extracción, la estructura geológica y la tectónica activa del área. Por ello, la aparición de este tipo de fenómenos es un proceso complejo que no puede ser atribuido, como se hacía, de manera simple a la sobre extracción de agua subterránea (Huízar Álvarez, Mitre-Salazar, Marín-Córdova, Trujillo-Candelaria y Martínez-Reyes, 2011).

A partir del trabajo de Huízar Álvarez et al. (2011), es posible identificar un sistema de grietas y fallas que siguen dos patrones claramente diferenciados, por un lado, un conjunto de dirección NE-SW asociadas a la tectónica extensional que produce la apertura de estructuras tipo *graben*, las cuales conforman cuencas que juegan como receptores de los productos de erosión y de las emisiones volcánicas, y fallas de componente NNW-SSE que son ocasionadas por la tectónica transtensional y que en este caso podemos ver que atraviesan la mitad este de la ciudad de Celaya (Figura 3).

Es claro que el fallamiento y las fracturas modifican las condiciones de recarga y movimiento del agua subterránea. Esta situación tiene uno de sus principales impactos en el aumento de vulnerabilidad a la penetración de agentes contaminantes provenientes de las actividades humanas, pero también puede jugar un rol fundamental

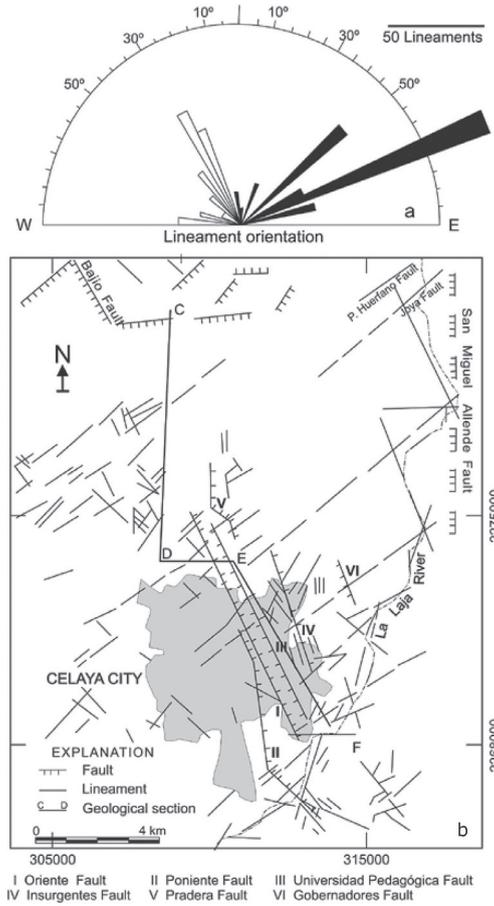


Figura 3. Lineamientos y fracturas en torno a Celaya, Guanajuato
 Fuente: Huízar Álvarez et al. (2011, p. 261).

en la comunicación del acuífero regional con los más superficiales o colgados. Esto en algunos casos pudiera resultar benéfico en cuanto a su recuperación frente a los excesos de extracción; empero, las evidencias parecen confirmar que el desbalance entre recarga y extracción

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya... _____
permiten colegir que en la actualidad en la región se está ante el aprovechamiento de aguas fósiles cuya recuperación no es posible por vía natural.

Geología superficial, estratigrafía y acuíferos

La litología del área está dominada por los productos de origen volcánico de fines del Terciario y Cuaternario. Las estructuras volcánicas compuestas de andesita y basalto destacan en el paisaje, el Cerro Gordo al NW de Celaya y el Cerro Grande al Sur son muestra del volcanismo cuaternario (3.5 a 4 millones de años), Cerro el Jocoqui al NE del volcanismo Mioceno. Existen afloramientos mesozoicos pertenecientes a la Mesa Central la cual constituye la frontera norte del área de estudio, al E de Santa Cruz de Juventino Rosas existen afloramientos de calizas cretácicas.

Otros productos un poco menos evidentes son derrames de riolita e ignimbritas terciarias. Estas últimas, juegan un rol muy importante en profundidad, ya que marcan los límites de los acuíferos.

Desde el punto de vista de las formaciones acuíferas se destacan los rellenos fluvio lacustres, aluviales y volcano-sedimentarios que ocupan todas las superficies planas y semiplanas las cuales colmataron las fosas desde Irapuato hasta Querétaro. Las formaciones acuíferas que resultan de estos rellenos no son isotrópicas, están constituidas por sedimentos interestratificados

e interdigitados con derrames volcánicos de diferente composición mineralógica y química, emitidas en distintas épocas.

Existe un referente estratigráfico que proviene del pozo más profundo de la región. Su origen es la exploración de gas natural, es un pozo relacionado con la refinería de Salamanca. Su profundidad es superior a los 700 metros (Mejía y Sandoval, 2004). Muestra la secuencia de relleno de las fosas, intercalaciones de productos de erosión, derrames basálticos, ignimbritas y tobas. De esta secuencia se puede entender que las fallas juegan un rol importante en la intercomunicación de los acuíferos (Figura 4).

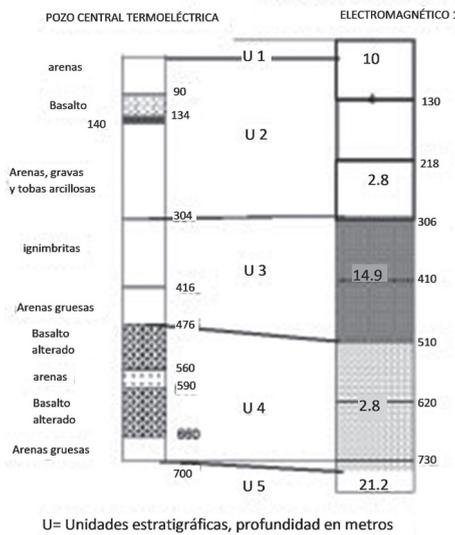
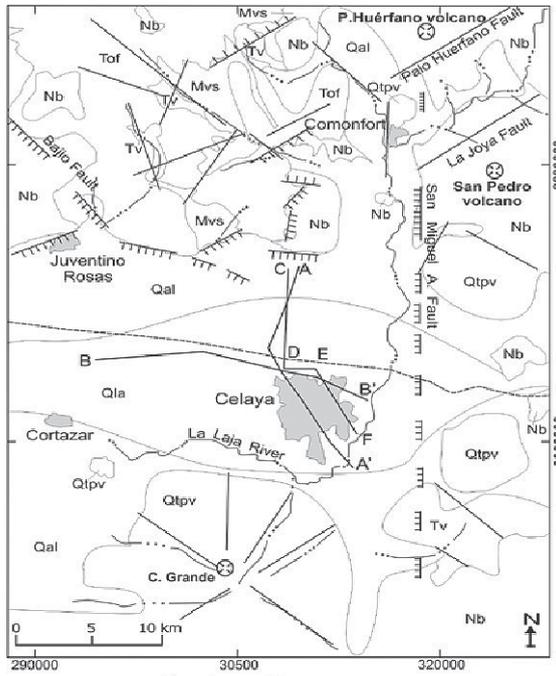


Figura 4. Columna estratigráfica del pozo de mayor profundidad en la región, ubicado en Salamanca, Guanajuato
Fuente: Mejía y Sandoval (2004, p. 314).

A partir del esquema anterior, es necesario tener una idea aún más clara de la estratigrafía del área en donde se pudiera ubicar el SDFRSU. Para ello el trabajo de Huízar Álvarez et al. (2011, p. 262), da algunas pistas, presentando la estratigrafía del área de Celaya, la cual constituye un ejemplo extrapolable a todo el ámbito sedimentario del área que hemos estudiado para determinar la ubicación óptima del SDFRSU. Se eligieron dos de los tres perfiles mediante los cuales se muestra la estratigrafía de la zona (Figura 5); estos forman, grosso modo, una cruz que tiene por centro la ciudad de Celaya. En este esquema se confirma el sistema de fallamiento que afecta a toda el área. Gracias a este entramado se produce una comunicación entre formaciones acuíferas que de otro modo deberían estar separadas o al menos con una interacción menos marcada, producto de esta situación son los contenidos químicos de las aguas subterráneas de los diferentes pozos que son explotados, así como la interacción de temperaturas de sus aguas, donde resalta el marcado termalismo.

El perfil A-A' N-SSE, muestra más de 250 metros de profundidad de la secuencia volcano-sedimentaria que es explotada para la extracción de agua, ya que la mayoría de los pozos llegan a una profundidad de perforación menor.

La secuencia muestra anisotropía horizontal y vertical. Las rocas masivas constituyen un acuícludo salvo que estén alteradas o fracturadas, tal es el caso de los basaltos que se presentan en el perfil, así proveen de una porosidad por fracturación que traslada agua de unos



Explanation

- Qla.- Lacustrine deposits (Quaternary)
- Qal.- Alluvial deposits (Tertiary and Quaternary)
- Qtpv.- Basic and intermediates rocks (Plio-Quaternary)
- Nb.- Basic rock (Oligocene and Neogene)
- Tv, Tof.- Rhyolites-Ignimbrites (Oligocene)
- Mvs.- Meta-andesites, Meta-quarzites (Mesozoic)

- Lineament
- TTT Fault
- Inferred fault
- ⊗ Volcano
- A — A' Geological section
- ~ Stream
- Highway

Figura 5. Trazo de perfiles de la estratigrafía local
Fuente: Huízar Álvarez et al. (2011, p. 258).

niveles a otros. Las arcillas constituyen un acuitardo con muy baja transmisividad y un tiempo de recuperación de conos de abatimiento largos. Las arcillas constituyen un filtro eficiente contra la penetración de contaminantes, aunque no garantiza a largo plazo su protección (Figura 6).

Del perfil se puede reconocer al menos dos acuíferos, uno regional profundo y otro más superficial. Es posible que se presenten diferentes acuíferos colgados que son explotados por pozos pequeños (menores de 50 metros de profundidad), los que al mismo tiempo son más vulnerables a la presencia de contaminantes, en especial de coliformes fecales. Sobre todo, porque en muchos de estos casos se carece de ademe adecuado que selle el conducto en toda su columna.

El acuífero superior es de tipo libre ya que carece de capa confinante o semiconfinante y el profundo es de tipo semiconfinado, por estar limitado por capas poco permeables o su permeabilidad es producida por fracturación.

El perfil B-B' representa una profundidad mayor, de más de 300 metros (Figura 6). Su estructura es mucho más compleja, es posible observar que los acuíferos colgados pueden ser frecuentes ya que presenta fuerte anisotropía. Las consideraciones son en general las mismas que las realizadas para el perfil anterior, en este es mucho más evidente el rol que juegan las fallas y fracturas en la intercomunicación de los niveles acuíferos, para bien y para mal, es una condición con la cual se debe contar para determinar las posibilidades de contaminación o de preservación de la calidad del agua que aportan los diferentes pozos que se aprovechan.

En ambos casos que presentan estos perfiles, los pozos que se aprovechan son en su mayoría del acuífero regional. Los pozos más numerosos son para uso agrícola

y aprovechan el acuífero superior. La profundidad de perforación, obtenida de los datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de 2009, de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) muestra que las mayores profundidades de pozos se encuentran en Salamanca y que, en la planicie entre esta ciudad y Celaya, las profundidades estarían entre 100 y 250 metros de profundidad en promedio.

Las diferentes consideraciones aquí vertidas no son nuevas, existen una gran cantidad de trabajos recogidos por Amézaga (2016) que dan cuenta de los hallazgos y la problemática que tiene la explotación de los acuíferos de la región. Esto será tratado en el siguiente epígrafe.

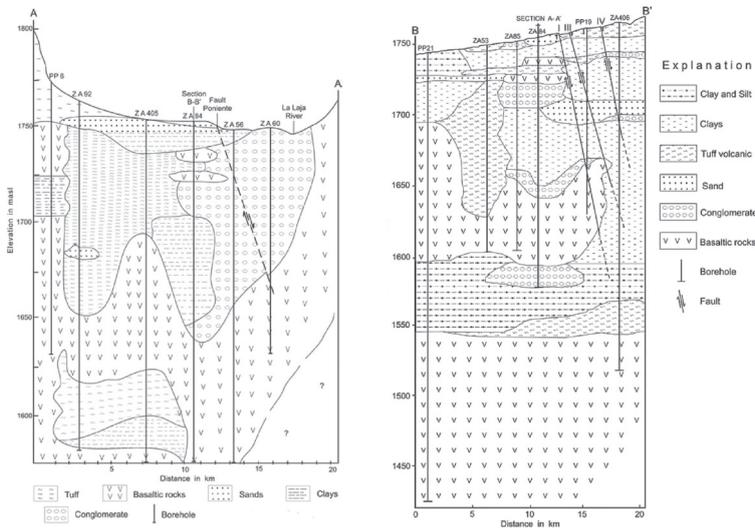


Figura 6. Secuencia estratigráfica perfiles A-A' y B-B'
 Fuente: Huízar Álvarez et al. (2011, p. 259).

Aprovechamientos de agua subterránea

La extracción excesiva en el Bajío en general y en la zona de Irapuato-Celaya en particular, ha sido motivo de preocupación desde por lo menos los años setenta; sin embargo, el deterioro y el notable decremento de los niveles de agua hicieron crisis a finales de los años ochenta, por lo que desde esas fechas se han generado una gran cantidad de estudios relacionados con estos acuíferos. El problema que salta a la luz para realizar evaluaciones precisas, es la consideración de límites administrativos de los acuíferos, lo cual no es congruente, en la mayoría de los casos, por la geometría de las formaciones acuíferas.

La presión que genera la competencia por agua de las diferentes actividades, en particular la agricultura y el abasto domiciliario frente al evidente deterioro de las fuentes subterráneas, obligaron a tomar acciones decididas que se vieron reflejadas en la creación de organismos de vigilancia, control y diseño de políticas, creados para mejorar las condiciones de aprovechamiento.

Bajo el marco de la Ley de Aguas Nacionales de 1992, que contempla la creación de organismos ciudadanos para la gestión del agua, se inició la creación de los Consejos Técnicos de Aguas (COTAS), los cuales se integraron en el Consejo Estatal Hidráulico en el año 2000 (Catoira, 2004). El COTAS de Celaya A. C. inicia operaciones en 1998 con el objetivo de “ser el instrumento social promotor de la gestión del agua concertando acciones entre los usuarios,

para buscar el uso eficiente del recurso y su preservación en cantidad y calidad” (Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, s.f.). Es a través de estos organismos que inician acciones más organizadas y decididas para afrontar los variados problemas que se estaban presentando, entre ellos dos fundamentales: la sobre extracción y el deterioro de la calidad del agua.

Como ya comentamos, los diferentes estudios realizados al acuífero de Celaya y otros adyacentes, demuestran que ha existido un desbalance entre la extracción y la recarga natural. Esto se refleja en la consistente disminución de los niveles freáticos de 2.5 a 3.5 metros anuales, también se sabe que el principal consumidor es la actividad agrícola y que la calidad de agua está comprometida por penetración de contaminantes orgánicos producto del mal manejo de las aguas residuales y los fertilizantes en la región (Amézaga, 2016, p. 30).

Así, el COTAS se dio a la tarea de disminuir o tratar de disminuir la extracción, aumentar la eficiencia en el consumo y atacar las fuentes contaminantes. Algunas de estas acciones han generado mejoras; sin embargo, los problemas aún están lejos de resolverse.

A la fecha el COTAS señala que ha reducido la extracción de manera significativa, algunos datos que mostraremos más adelante pueden constatar este hecho. En cuanto a la calidad, a partir de los datos disponibles para este trabajo, se puede afirmar que aún persiste la presencia de coliformes fecales, si bien se ha mejorado

en el control de arsénico, la vigilancia debe seguir siendo estrecha ya que las consecuencias a la salud pública pudieran ser graves.

Respecto del tema de la calidad del agua, debemos comentar que el SDFRSU al cumplir con la infraestructura de bioseguridad como impermeabilización, control y tratamiento de lixiviados, no debería contribuir a deteriorar las condiciones actuales de los acuíferos.

Por otro lado, si la extracción se ha reducido como afirma el COTAS, es difícil de explicar el descenso que aún experimentan los niveles estáticos. Estos descensos son mucho menores al promedio de años anteriores; no obstante, no son desdeñables ya que, en promedio, están por arriba del metro anual.

Las sucesivas evaluaciones de disponibilidad de agua subterránea para el acuífero del Valle de Celaya (Figura 7), realizadas por la Conagua, reconocen que persiste la sobre explotación de las aguas subterráneas. La última evaluación con base en datos de 2014 muestra que se extrae más del doble de la recarga anual (106% adicional a la recarga natural). No se respetan las concesiones, ya que la extracción excede en 40% a lo concesionado. Así las cosas, es fácil imaginar a qué se debe el deterioro del sistema acuífero como fuente de abastecimiento. Este desbalance ya era evidente, al menos desde el estudio de disponibilidad de 2003, realizado por la Conagua.

Ahora bien, si analizamos los datos de extracción de agua subterránea en un comparativo para el periodo

CDXLIX Región hidrológico-administrativa "Lerma-Santigago-Pacífico"							
Clave	Acuífero	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	Déficit
		Cifras en millones de metros cúbicos anuales					
Estado de Guanajuato							
115	Valle de Celaya	288.6	0.0	423.463169	593.0	0.000000	-136.863169

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

Figura 7. Balance del acuífero Valle de Celaya
Fuente: Conagua (2015).

2009 a 2016 con base en el REPDA² de Conagua, es posible observar cambios importantes sobre la cantidad y volumen de extracción (Tabla 1 y Tabla 2). Es posible que esta situación sea un efecto de la acción del COTAS.

Los datos aludidos previamente, muestran que el número total de pozos experimentó un descenso de 46.3% en siete años y que el volumen de agua concesionada disminuyó casi la mitad (49.8%), respecto de 2009. Lamentablemente, no podemos saber si la extracción real disminuyó, ya que ese dato no está disponible para el año 2016, pero sí podemos saber que en 2009 el volumen real de extracción era 1.5 veces mayor que la recarga calculada.

De acuerdo con los datos señalados, aun en la actualidad, los usos agrícolas continúan siendo en número y volumen los más importantes. En un segundo lugar, los usos relacionados con el abasto domiciliario y urbano, que no llegan ni a 15%, pero en términos de presión pueden ser

² Las fechas de datos se deben a la posibilidad de acceso a la información.

	usos										Total
	Agrícola	Diferentes	Doméstico	Industrial	Múltiple	Pecuario	Público	Servicios	Total		
Pozos 2009	3 396	52	98	110	136	30	446	54	4,322		
Vol. Cons. 2009	392 343	2 746.0	28.6	12 089.6	6 657.2	335.8	11 399.8	256.8	425 856.8		
Vol. Ext. 2009	570 606.5	11 072.6	121.4	49 638.4	22 788.5	660.1	61 450.6	1 149.8	717 488.0		
% Pozos	78.6	1.2	2.3	2.5	3.1	0.7	10.3	1.2			
% Vol.	92.1	0.6	0.0	2.8	1.6	0.1	2.7	0.1			
% Vol. Ext.	79.5	1.5	0.0	6.9	3.2	0.1	8.6	0.2			

Tabla 1. Aprovechamientos de agua subterránea 2009 (acuífero Valle de Celaya)

Fuente: REPDA (2009).

	Agrícola	Doméstico	Industrial	Múltiple	Pecuario	Público urbano	Servicios	Total
Pozos 2016	1 957	78	8	4	13	243	18	2,321
Vol. Cons. 2016	205 506.5	182.8	104.6	2.1	296.8	7 439.9	375.8	213 908.5
% Pozos	84.3	3.4	0.3	0.2	0.6	10.5	0.8	
% Vol.	96.1	0.1	0.0	0.0	0.1	3.5	0.2	

Tabla 2. Aprovechamientos de agua subterránea 2016 (acuífero Valle de Celaya)
Fuente: REPDA (2016).

los más significativos para obligar a la toma de decisiones y reforzar la vigilancia sobre las actividades agrícolas (deben mejorar su tecnología de riego), sobre todo si se piensa en un futuro con recursos de agua cada vez más limitados.

El dato más relevante a destacar es que al menos en términos del volumen concesionado en 2016, el volumen total es inferior a la recarga estimada; otra cosa es que la extracción real lo sea, al respecto no tenemos datos, no obstante, existen algunas dudas de que esto sea así, ya que los niveles continúan bajando.

Usos del agua en el área de estudio

Se definió un área de acuerdo con las posibilidades de implementación del SDFRSU, con la finalidad de analizar las implicaciones del consumo y del efecto que esto tiene sobre el comportamiento y dinámica del acuífero, así como sus posibles implicaciones con el proyecto (Figura 8). En el área de estudio se observa que existe una gran cantidad de pozos. Acorde con el REPDA (2016), el área de estudio cuenta con 3 013 pozos registrados, si bien son un número menor que en 2009, la magnitud de la extracción es evidente. El área comprende pozos de diferentes acuíferos desde el punto de vista de límites administrativos, de ahí que el número de pozos sea mayor que el analizado con anterioridad.

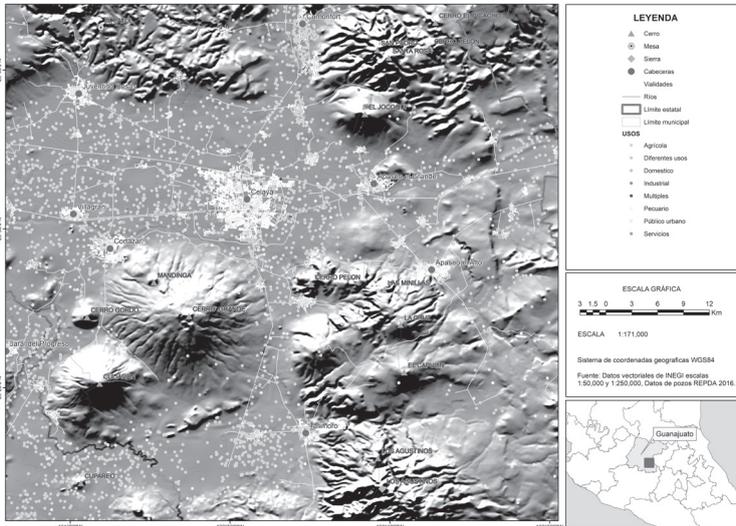


Figura 8. Pozos por uso 2016
Fuente: Elaboración propia.

Como en el caso del acuífero Valle de Celaya, los números para esta área tienen tendencias similares de reducción entre 2009 y 2016. El número total de pozos descendió en el periodo 44.2% y el volumen concesionado 47.9%. La extracción real en 2009 era 64.9% superior a la concesionada; este dato muestra un desbalance mucho mayor que lo detectado solo para el Valle de Celaya, con lo cual las condiciones de los acuíferos en la región mantenían una condición crítica (Tabla 3 y Tabla 4).

Es posible constatar que la densidad de pozos es elevada en las partes planas donde se desarrolla agricultura. Con ello, se identificó que esta actividad es la que más pozos tiene y mayor volumen reporta para 2009 con 79.8% y 92.9% respectivamente (Tabla 3).

	usos										Total
	Agrícola	Diferentes	Doméstico	Industrial	Múltiple	Pecuario	Público urbano	Servicios			
Pozos 2009	4,308	60	106	116	148	36	572	54			5,400
Vol. Cons. 2009	492 115.8	2 960.6	137.6	12 245.6	6 929.2	409.2	14 661.8	256.8			529 716.6
Vol. Ext. 2009	712 339.1	11 351.4	334.0	49 928.4	23 200.2	798.7	74 314.4	1 149.8			873 415.9
% Pozos	79.8	1.1	2.0	2.1	2.7	0.7	10.6	1.0			
% Vol	92.9	0.6	0.0	2.3	1.3	0.1	2.8	0.0			
% Vol. Ext.	81.6	1.3	0.0	5.7	2.7	0.1	8.5	0.1			

Tabla 3. Aprovechamientos de agua subterránea 2009 (área de estudio)
Fuente: REPDA (2009).

En segundo lugar, podemos agrupar a todos los usos urbanos cuyos pozos no rebasan en conjunto 20% y un volumen concesionado por debajo de 7%. La agricultura es, como ya habíamos comentado, la actividad que presiona con mayor énfasis el agua subterránea y la que requiere una mejora importante en la tecnología de riego, puesto que es ahí donde existe un mayor desperdicio.

Podemos pensar que como efecto de las políticas y la vigilancia de los organismos denominados COTAS de los diferentes acuíferos, la gestión del agua subterránea tiende a mejorar; sin embargo, como se carece del dato de extracción real, esto no deja de ser una mera especulación. En las cifras disponibles es posible observar reducciones importantes en el número de pozos y volúmenes como las que ya se comentaron, en estos decrementos la actividad agrícola fue la que mayor contracción experimentó, redujo 40% el número de pozos y 46% el volumen concesionado en siete años; no obstante, su peso relativo en los totales aumentó (Tabla 4). Cabe destacar que el único valor que se incrementó en números absolutos fue el uso doméstico. Llama la atención la drástica disminución de los rubros “Diferentes usos” e “Industrial”. Resulta poco explicable cómo las actividades industriales que actualmente se encuentran en auge en la región han reducido su consumo.

El análisis de la presión sobre el recurso agua de cara al proyecto que nos ocupa, solo intenta esclarecer dónde se encuentran los mayores problemas para definir el lugar de emplazamiento y una vez definido, las condiciones que

	USOS										Total
	Agrícola	Diferentes	Doméstico	Industrial	Múltiple	Pecuario	Público	Servicios	Total		
Pozos 2016	2 565	1	84	9	5	14	317	18	3 013		
Vol. Cons. 2016	265 706.1	99.3	146.2	105.6	2.3	324.3	9 242.2	375.8	276 001.8		
% Pozos	85.1	0.0	2.8	0.3	0.2	0.5	10.5	0.6			
% Vol.	96.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	3.3	0.1			

Tabla 4. Aprovechamientos de agua subterránea 2016 (área de estudio)
Fuente: REPDA (2016).

puede tener y hacia dónde orientar las acciones de control. En el entendido que no significará un demandante del recurso agua; si no que se trata de evitar que las actividades relacionadas consideren los puntos vulnerables en cuanto a la potencial infiltración de contaminantes, las medidas de control y monitoreo pertinentes.

Niveles piezométricos

La evolución del nivel freático o piezométrico es un indicador importante en el estado del balance entre recarga natural o meteórica y la extracción de agua subterránea. Los rápidos descensos que estos niveles experimentaron durante los decenios de los años ochenta y noventa fueron un motivo que obligó a realizar diferentes estudios para entender qué pasaba con el aprovechamiento de aguas subterráneas y sus consecuencias en todos los acuíferos del Bajío.

A partir de datos proporcionados por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (s.f.) se realizó el análisis de la superficie piezométrica del área de estudio. Los datos se refieren a 131 pozos de los acuíferos administrativos Valle de Celaya y Salvatierra-Acámbaro para el periodo 2007-2016. Como ya se mencionó, se detectó que mantienen un descenso de los niveles freáticos, si bien existen algunos pozos que aparentemente recuperan su nivel, estos no presentan ningún arreglo espacial que permita inferir la influencia de algún factor determinante para que pudiera ocurrir tal mejoría (Figura 9).

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya...

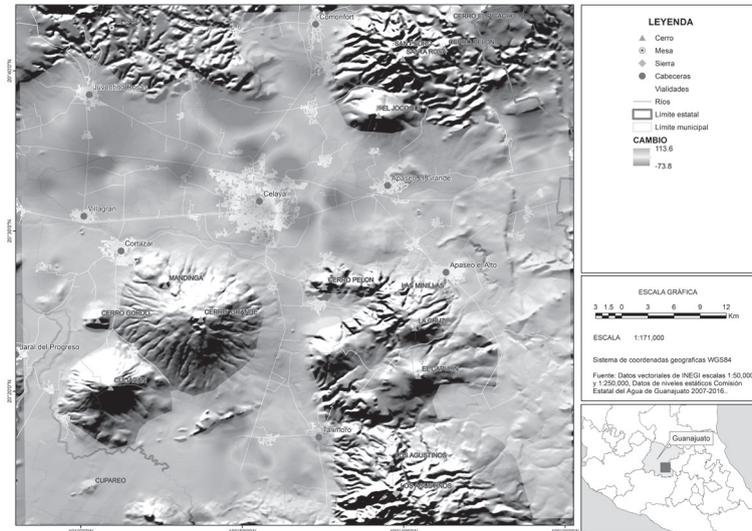


Figura 9. Cambios en el nivel freático 2007-2016
Fuente:Elaboración propia.

De 2007 a 2016 los datos muestran que existió una leve recuperación o al menos parece haberse detenido el descenso sostenido que tenían los niveles freáticos de la zona (Tabla 5). Los mayores descensos del periodo señalado se produjeron en el acuífero Valle de Celaya, el máximo registrado de 73 metros. es un poco más del doble del registrado en el acuífero Salvatierra-Acámbaro. Estos datos hacen suponer que la presión de extracción es mayor en Celaya, ya que registra el mayor descenso promedio del nivel estático con 10.4 metros. En contraposición, el de Salvatierra-Acámbaro registra la mayor recuperación por el número de pozos que mejoraron su nivel con 44.8%. Si bien es cierto, que se detecta recuperación para ambos

acuíferos, su incidencia espacial no es significativa como sí lo es el descenso.

	Salvatierra- Acámbaro	%	Valle de Celaya	%	Total/ promedio
Pozos	29	24.0	92	76.0	121
Pozos con datos	27	23.1	90	76.9	117
Pozos con descenso	14	15.9	74	84.1	88
Pozos con recuperación	13	44.8	16	55.2	29
Mayor descenso	-35.3		-73		-73
Mayor recuperación	22.7		12.5		22.7
Descenso promedio	-7.7		-10.4		-10
Recuperación promedio	4.8		3.8		4.3

Tabla 5. Superficie piezométrica 2007-2016

Fuente: Elaborado con base en datos de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (s.f.).

Por otro lado, si se analizan los datos referidos a los descensos con mayor detalle, resulta interesante observar que, pese a que el mayor descenso promedio se registra en el acuífero de Valle de Celaya, el nivel freático descendió más en el de Salvatierra-Acámbaro en 2007 respecto de 2016, nivel que por el contrario tuvo mejoría en el de

Celaya (Figura 10). Lo anterior permite comentar que los promedios pueden resultar engañosos, todo depende del punto de vista ya que, en este caso, existen varios pozos que no cuentan con datos en alguno de los años; sin embargo, al enfocarnos en los niveles freáticos efectivos, es posible aproximarnos de mejor forma a la evolución del fenómeno. Al continuar hablando de promedios, solo da una idea parcial de lo que sucede espacialmente; esto se podrá observar mejor con ayuda de los modelos espaciales elaborados de la superficie piezométrica.

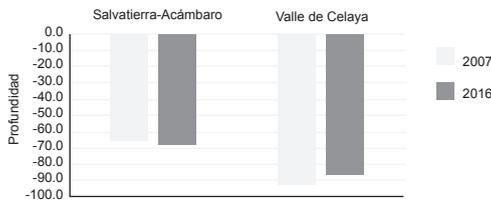


Figura 10. Comparativo nivel freático entre acuíferos
Fuente: Elaboración propia.

Con la información de 131 pozos que contaron con datos de evolución de superficie piezométrica, se elaboraron modelos espaciales de dos años distintos 2007 y 2016. Esto permite mostrar de forma más clara lo que puede estar ocurriendo con los cambios en la profundidad del nivel freático y con ello analizar las implicaciones respecto del fenómeno, así como las áreas de mayor presión o necesidad de atención.

En 2007 se observa una mayor profundidad del nivel freático en diferentes áreas, sobre todo en torno a

las localidades de Apaseo El Grande y Apaseo El Alto. Otros puntos con esta característica se observan en las localidades de Juventino Rosas y Villagrán (Figura 11). Para 2016 las áreas de mayor profundidad se mantienen, pero se experimenta un cambio en el cuadrante NW, ahí es claro que los niveles estáticos se ven afectados por la extracción. Ahora el punto con mayor presión tiende a ser un área que parece extenderse hacia Celaya (Figura 12).

Es importante asentar que la superficie freática que se modeló, es solo en relación con la extracción de pozos de abasto de agua potable. Es probable que los cambios en la superficie que se describen, se agudizaron debido a los volúmenes de extracción de otras actividades, especialmente las agrícolas que en estos puntos son más significativas. En todo caso, lo que se muestra es debido a la presión de extracción de agua potable o por la suma de las extracciones de otros usos. La evidencia demuestra que es un área que está siendo más afectada por los descensos de nivel freático y que, con ello, pueden acrecentarse los problemas de calidad de agua, costes de mantenimiento y extracción.

La evolución o cambio de los niveles piezométricos no únicamente tiene que ver con los volúmenes de extracción. Desde luego este fenómeno es multifactorial. Otro de los factores que inciden en su comportamiento es la anisotropía de las formaciones geológicas que contienen el agua. Como ya vimos en epígrafes anteriores, esta heterogeneidad no solo se manifiesta de manera horizontal,

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya...

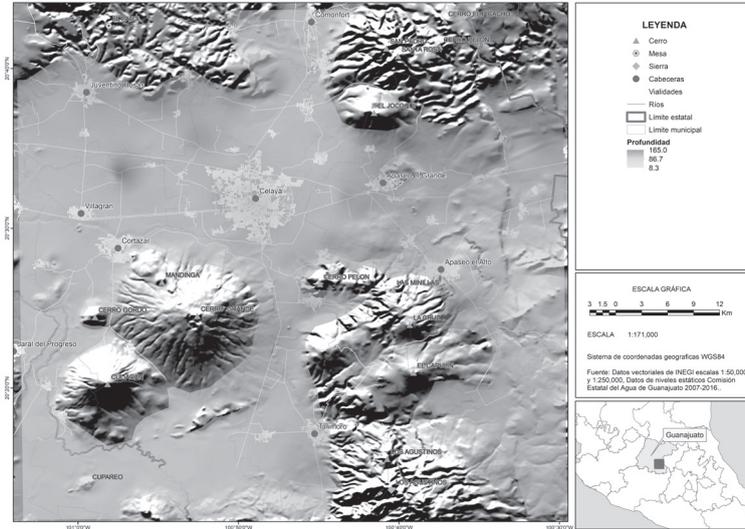


Figura 11. Modelo de superficie piezométrica nivel estático 2007
Fuente: Elaboración propia.

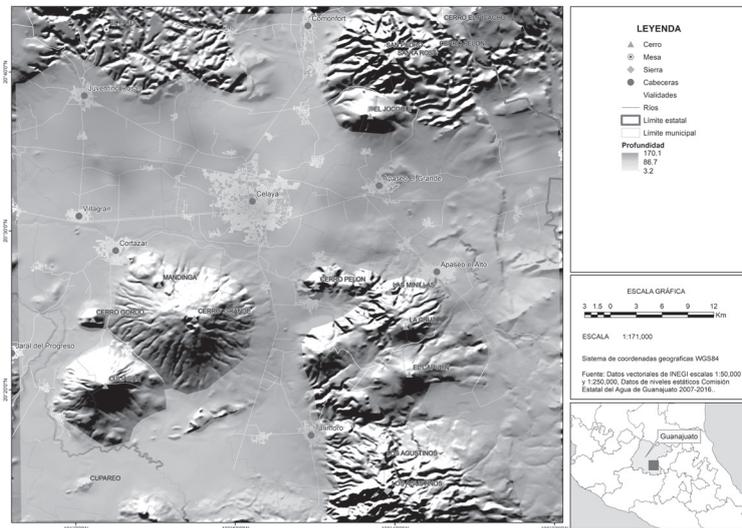


Figura 12. Modelo de superficie piezométrica del nivel estático en 2016
Fuente: Elaboración propia.

lo hace sobre todo de manera vertical, con lo cual el movimiento del agua –en tiempo y espacio– se modifica y puede, eventualmente, agudizar los conos de abatimiento. Esta situación puede tener efectos significativos al menos en dos aspectos: los costes de extracción y la mayor proclividad al deterioro de la calidad del agua.

Con el objetivo de observar cómo pudieron cambiar los niveles y sus posibles consecuencias, así como los cuidados que se deben tener al establecer proyectos que como SDFRSU, son sin lugar a duda contenedores de productos que pueden deteriorar de forma significativa la calidad del agua, la atmosfera y el paisaje en general, se definieron tres perfiles (Figura 13), con diferentes

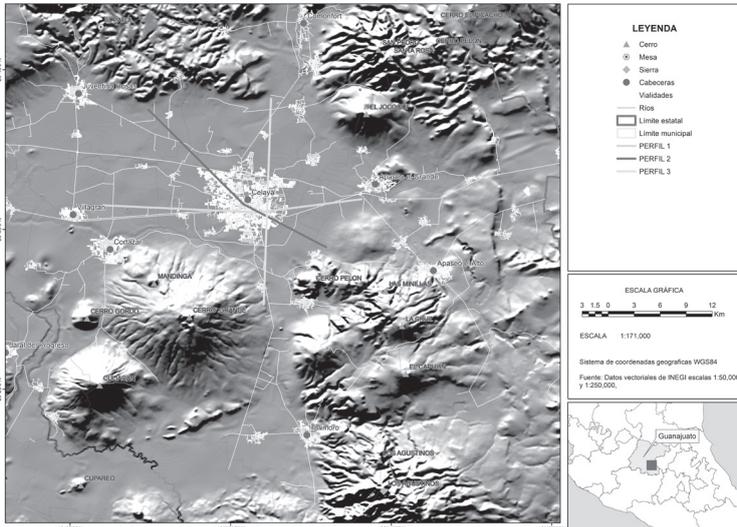


Figura 13. Perfiles de evolución niveles estáticos
 Fuente: Elaboración propia.

orientaciones que contribuyen a la identificación de algunas relaciones y, con ello, es posible orientar la toma de decisiones relacionadas con la protección, gestión e instalación del proyecto que nos ocupa.

Para cada uno de los tres perfiles se ofrecen dos figuras. La primera, representa la superficie topográfica, los niveles estáticos de 2007 y 2016, así como la profundidad total estimada de los pozos. La segunda, representa nuevamente la superficie topográfica y los niveles estáticos de 2007 y 2016, pero ahora, en una escala diferente para poder hacer más perceptible los cambios.

Para el perfil 1 (Figura 14), es posible observar que entre mayor profundidad de perforación los niveles presentan menores fluctuaciones. Los cambios más significativos se dan hacia el este de Celaya y son en sentido positivo; es decir, los niveles freáticos mejoran su nivel en 2016 respecto de 2007. Con la misma orientación y próximo a la ciudad, se observan descensos que, aunque leves, marcan una situación contrastada en escasos 4 a 5 kilómetros.

El perfil 2 (Figura 15), muestra patrones similares en sentido NW-SE al E-W; es decir, que los incrementos de nivel freático se experimentan hacia el SE de la ciudad de Celaya, pero hacia el NW se acusa una mayor tendencia hacia el descenso generalizado de los niveles freáticos. Con esta información, se confirma lo observado en los modelos espaciales de la superficie freática que se presentan líneas arriba. Además, si bien en casi la totalidad del perfil la estabilidad es mayor en función de la

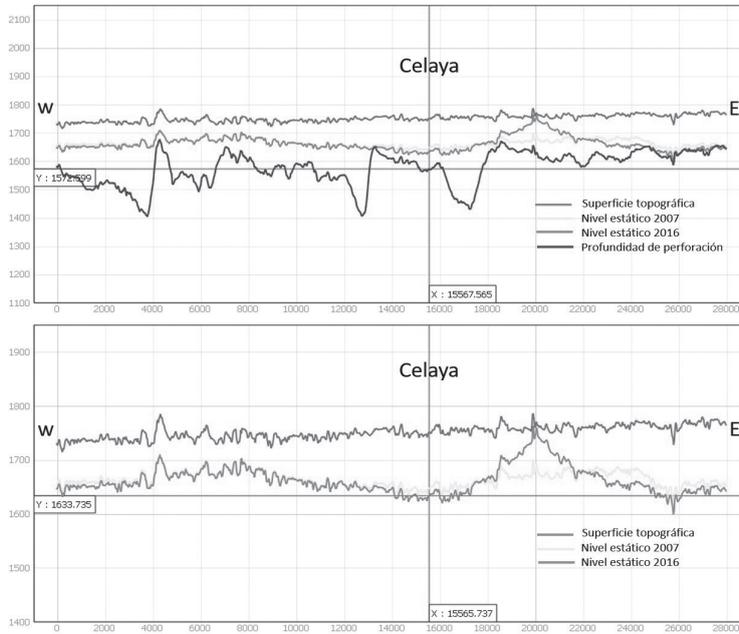


Figura 14. Cambios en los niveles estáticos 2007 y 2016. Perfil 1
Fuente: Elaboración propia.

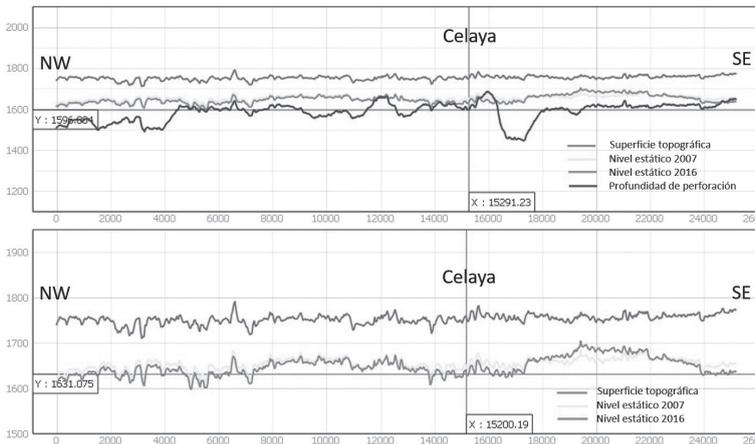


Figura 15. Cambios en los niveles estáticos 2007 y 2016. Perfil 2
Fuente: Elaboración propia.

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya...

profundidad de perforación, esta situación muestra menor estabilidad en dirección a la localidad de Juventino Rosas.

El perfil 3 (Figura 16), expone los mayores contrastes en los cambios de nivel freático en relación con los descensos, así se observa que en el norte de la ciudad de Celaya, en una distancia aproximada de 2 kilómetros, los niveles acusan un fuerte abatimiento que puede estar relacionado con el aprovechamiento de pozos que no extraen del acuífero profundo, y su relación con la alimentación de acuitardos pudiera acentuar problemas que se manifiestan en conos de abatimiento más acusados. Las variaciones son producidas por la anisotropía y por los fuertes contrastes que produce la porosidad secundaria que está presente en el área debido al fallamiento y fracturación de las formaciones acuíferas.

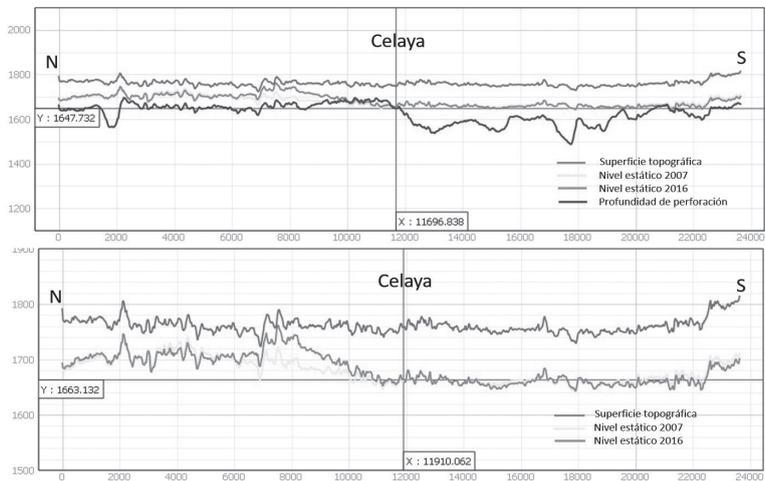


Figura 16. Cambios en los niveles estáticos 2007 y 2016. Perfil 3
Fuente: Elaboración propia.

Calidad del agua subterránea

La calidad del agua se analizó con base en los datos proporcionados por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (s.f.), los cuales fueron contrastados con los parámetros de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud [SSA], 2000), la cual establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados. La información incluyó aspectos físicos, químicos y bacteriológicos de 36 pozos. El rastreo y consideraciones de la calidad del agua que han realizado diferentes trabajos recopilados por Amézaga (2016), muestran que históricamente esta sufrió un deterioro paulatino, mucho más acelerado a finales de los años noventa. Se mencionaba que muchos de los pozos sobrepasaban los límites permitidos en algunos elementos, entre los más elevados destacan arsénico y coliformes fecales.

A partir de la información proporcionada para 36 pozos, se identificó que 20 de ellos presentan alguno o varios de sus parámetros fuera de norma. El problema más frecuente es la contaminación por coliformes fecales en 14 pozos, le sigue en importancia los fluoruros, en 4. Es indudable que el problema más frecuente debería ser, en teoría, el de más fácil solución. La mejora en la protección de pozos y el control de efluentes y su tratamiento es una

prioridad, estas condiciones dan una idea de la protección que debe implementarse para evitar la infiltración de productos indeseables relacionados con el proyecto de operación del SDFRSU. La impermeabilización y el tratamiento son acciones fundamentales que deben ser realizadas sin discusión alguna. No parece haber un patrón espacial relacionado con la presencia de parámetros fuera de norma, pero sí se puede saber que en la cercanía de los sitios bajo estudio, considerados para instalar el proyecto, no existen pozos que tengan problemas o estén fuera de norma.

Respecto de un componente de alto riesgo como sería la señalada presencia de arsénico fuera de norma en años anteriores, solo en uno de ellos se presenta este elemento con valores altos (Figura 17), en ese mismo pozo los sólidos totales también están fuera de norma, este es uno de los tres pozos en donde dos o tres elementos registrados muestran parámetros fuera de norma.

Conclusiones

La historia del aprovechamiento de aguas subterráneas en el área de estudio, muestra que existen desequilibrios crecientes, por lo que cualquier proyecto o actividad humana que se realice puede contribuir a incrementar las presiones sobre el recurso hídrico. Ante proyectos que por sí mismos son problemáticos, resulta importante identificar los riesgos que pueden comprometer la calidad de vida de cientos de miles de personas.

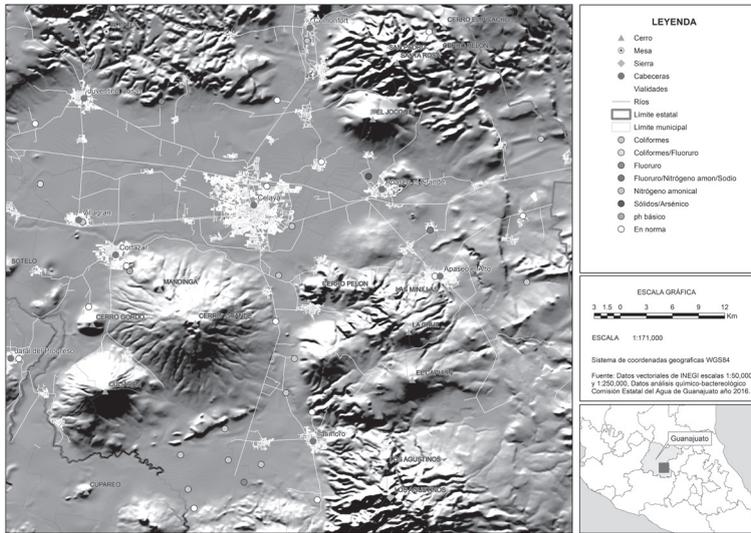


Figura 17. Tipo de contaminantes fuera de norma por pozos
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, las evidencias apuntan a la exigencia en establecer cuidados extremos para la implementación y operación del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos en la región aquí presentada, lo cual debería implicar la utilización de la mejor tecnología disponible y un cuidado en sus operaciones mediante un monitoreo constante que vigile la posible infiltración de contaminantes en un acuífero que ya muestra problemas relacionados con las aportaciones de contaminantes.

La vulnerabilidad de la formación o formaciones acuíferas de la región se ven sensiblemente modificadas por el fallamiento que deviene de su evolución geológica. Las fallas y fracturas aumentan la posibilidad de

comunicación entre acuíferos y de la comunicación entre la superficie topográfica y los diferentes estratos, con lo que se ve limitada la capacidad filtrante. Dicho de otra manera, derivado de las condiciones geológicas imperantes en la región, aumenta de manera significativa la posibilidad de llegada de contaminantes a la zona con mayor saturación de pozos. La presencia de formaciones poco permeables no es garantía de protección ante la eventual penetración de lixiviados, ya que, como se ha mencionado, las fracturas limitan la capacidad filtrante.

Las evidencias de sobreexplotación de los acuíferos se empezaron a resentir con mayor énfasis a partir del decenio de 1980. A raíz de dicha problemática, se incrementaron los estudios para entender mejor las características y condiciones de estas formaciones geológicas. Como consecuencia de las crisis y disputas por el vital líquido, se ha tratado de atacar el problema de forma institucional. Se conformó un organismo de administración denominado Consejos Técnicos de Aguas, que opera desde 1998; sus resultados puntuales fueron: lograr disminuir el deterioro y mejorar el control sobre extracciones y el monitoreo de la contaminación. Empero, está lejos de revertir los daños que existen, puesto que las evidencias muestran que aún persisten problemas importantes.

La extracción excedente en la actualidad es más del doble de la recarga potencial, ante la creciente demanda de agua por la diversificación de actividades y el crecimiento

demográfico, se conforma una fórmula que pudiera ser desastrosa para la permanencia del recurso.

La alta densidad de pozos en el área donde se pudiera implementar el sitio de disposición final, muestra que las condiciones generales o regionales, se agudizan en el área de mayor factibilidad de ubicación. Existen algunos datos que muestran que los problemas son más preocupantes de lo que se quisiera aceptar, tanto la extracción descontrolada, el descenso constante de los niveles freáticos, pero sobre todo la penetración creciente de contaminantes relacionados con los centros poblacionales y las deficiencias en el manejo de las descargas de aguas residuales son problemas de urgente atención. Un dato revelador es que 55% de los pozos que constituyen el monitoreo que se analizó en este trabajo, presentan uno o más parámetros fuera de norma, destacando en ello la presencia de coliformes fecales, lo que confirma lo antes mencionado.

Para finalizar, es importante señalar que la filosofía que se encuentra en la base del trabajo global del cual forma parte el presente, no es alentar el crecimiento y proliferación de sitios de disposición final de residuos, por el contrario, se requiere de una visión distinta en las políticas públicas de medio ambiente, a través de la cual se favorezca la reducción del consumo, y, derivado de ello, la generación de residuos y de sus materiales contaminantes. En ese sentido, es importante también poner mayor énfasis en la vigilancia de todas las etapas de manejo

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya... _____

de residuos, concentrándose en mejorar los procesos vinculados a la reutilización y el reciclado para reducir al mínimo la necesidad de confinamiento y disposición final o, de lo contrario, en el futuro cercano se verá mermada la capacidad de mitigar los efectos adversos de nuestro accionar en el territorio.

Bibliografía

Acevedo Torres, B. (2004, julio/septiembre). Evolución del abatimiento en el nivel estático de los acuíferos de Guanajuato. *Revista Aqua Fórum*, 8 (37), 3-7. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.

Amézaga Campos, B. S. (2016). Actualización hidrogeológica del acuífero del Valle de Celaya. Análisis y determinación por concentraciones de arsénico; propuesta de sitio para la perforación de un pozo de adsorción. Informe de prácticas profesionales no publicado. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.

Catoira Ordoñez, M. N. (2004). Gestión técnico-social del agua de los mantos freáticos de Celaya y de Irapuato-Valle de Santiago (México). Tesis de licenciatura no publicada. Universidad de las Antillas y de la Guyana. Recuperado de <http://www.iwmi.cgiar.org/assessment/files/word/ProjectDocuments/LermaChapala/Informe%20Morelia%20CATOIRA.pdf>

Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. (s.f.). Cotas Celaya A. C. Recuperado 15 de febrero de 2020, de http://agua.guanajuato.gob.mx/cotas2.php?id_cota=2

Comisión Nacional del Agua-Conagua. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de Celaya (1115), Estado de Guanajuato. (*Diario Oficial de la Federación*, 20/04/2015).

Comisión Nacional de Población-Conapo. (2019). Proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015-2030 (base 2). Recuperado el 20 de febrero de 2020, de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidadesfederativas-2016-2050/resource/4993a486-2415-460a-8c36-20f4ef493006>

Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2 (2), 172-187.

Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 84-92.

Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C. M. y Manetti, P. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 318 (1-4), 161-185.

Ferrari, L., Garduño, V., Innocenti, F., Manetti, P., Pasquere, G. y Vaggeli, G. (1994a). Volcanic evolution of Central Mexico: Oligocene to the present. *Geofísica Internacional*, 33 (1), 91-105.

Ferrari, L., Garduño, V., Innocenti, F., Manetti, P., Pasquere, G. y Vaggeli, G. (1994b). A widespread mafic volcanic unit at the base of the Mexican Volcanic Belt between Guadalajara and Querétaro. *Geofísica Internacional*, 33 (1), 107-123.

Ferrari, L., Orozco Esquivel, M. T., Manea, V. y Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>

Huízar Álvarez, R., Mitre-Salazar, L. M., Marín-Córdova, S., Trujillo-Candelaria, J. y Martínez-Reyes, J. (2011). Subsidence In Celaya, Guanajuato, Central México: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime. *Geofísica Internacional*, 50 (3), 255-270. Recuperado el 14 de abril de 2017,

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya... _____
de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692011000300001

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-INEGI. (1990). IX Censo General de Población y Vivienda. Mexico. Recuperado el 20 de septiembre de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1990/>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-INEGI. (2000). X Censo General de Población y Vivienda. Mexico. Recuperado el 20 de septiembre de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-INEGI. (2010). XI Censo General de Población y Vivienda. Mexico. Recuperado el 20 de septiembre de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>

Mejía Gómez, J. A. y Sandoval Minero, R. (2004). Uso del agua subterránea en la región acuífera Irapuato-Valle de Santiago (México) y su impacto sobre el sistema hidrogeológico. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (núm. especial), 311-318.

Pasquaré, G., Garduño, V. H., Tibaldi, A. y Ferrari, M. (1988). Stress pattern evolution in the Central Sector of the Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics* 146 (1-4), 353-364.

Ruiz Martínez, V. C. (2004). *Estudio paleomagnético del cinturón volcánico transmexicano: implicaciones tectónicas*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Semarnat. (2004, 20 de octubre). Norma Oficial Mexicana NOM-083-SE-MARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Recuperado el 15 de enero de 2019, de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/nom-083.pdf>

GEOCALLI

Secretaría de Salud-SSA. (2000, 22 de noviembre). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Recuperado el 20 de febrero de 2019, de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>

Servicio Geológico Minero. (1999a). Carta geológico-minera 1:50,000 Celaya F14-C64 Guanajuato. Secretaría de Economía.

Servicio Geológico Minero. (1999b). Carta geológico-minera 1:250,000 Querétaro F14-10 Qro., Gto., Mich., Jal. y Edo. Mex. Secretaría de Economía.

INFORMACIÓN PARA COLABORADORES

Los trabajos deben acompañarse de una solicitud dirigida a la Dirección Editorial de la revista y firmada por el autor (es), en la que se indicarán los siguientes datos:

- Título del trabajo.
- Nombre, domicilio y correo electrónico.
- Nombre de la Institución donde labora.

NORMAS PARA LA PRESENTACIÓN DE ORIGINALES

1. Los *manuscritos* deberán ser trabajos originales e inéditos y no deberán someterse para la publicación simultánea a otra revista.
2. *Extensión*: Los trabajos tendrán una extensión de entre 50 y 60 cuartillas, a doble espacio, letra Arial, tamaño 12.
3. *Ilustraciones*: Los mapas, gráficas, tablas e imágenes, serán numerados según su orden de aparición y debidamente referenciados en el texto, señalando siempre su procedencia o fuente de referencia del autor. Es indispensable que las fotografías y recursos cartográficos sean de buena resolución. El número de mapas, gráficas, tablas e imágenes no deberá ser mayor de 10 y serán entregados en formato media carta.
4. *Monedas y medidas*. En caso de manejarse en el texto tablas, cuadros o gráficas, cifras monetarias diferentes al peso mexicano, éstas deberán presentarse en su

equivalente en dólares americanos. Las medidas (de peso, longitud, capacidad, etc.) deberán expresarse en el sistema métrico decimal.

5. *Autores:* Bajo el título general se colocará el nombre del o los autores, incluyendo a pie de página la profesión o cargo principal con el que desean ser presentados. Los artículos publicados en GEOCALLI, *Cuadernos de Geografía* deberán estar firmados por 2 o 3 autores máximo.
6. *Resumen:* Todos los trabajos deberán incluir un resumen no mayor de 10 líneas sobre el objetivo, método y conclusiones del trabajo, así como las palabras clave dentro del desarrollo del tema.
7. *Notas:* Deberán estar al pie de página.
8. *Bibliografía:* Las referencias citadas en el texto deberán presentarse en el formato APA.
9. *Datos académicos:* Deberán incluir una breve referencia sobre el o los autores, con extensión máxima de 10 líneas, respecto a su formación académica, experiencia profesional más destacada, actual posición laboral, y en su caso, principales publicaciones.
10. El Consejo Editorial de GEOCALLI, *Cuadernos de Geografía* decidirá la pertinencia de publicar los originales que se le presenten, atendiendo a las características formales y calidad del contenido. A la brevedad posible se remitirá el dictamen avalado por el Comité Editorial.
11. El trabajo deberá ser entregado en formato Word.
12. GEOCALLI, *Cuadernos de Geografía* es una revista semestral, monográfica que en casos extraordinarios, sólo se

Aguas subterráneas y los residuos sólidos urbanos en Celaya... _____

aceptarán 2 artículos siempre y cuando correspondan o se relacionen a un mismo tema y en tal caso cada artículo deberá tener una extensión de entre 25 a 30 cuartillas tamaño carta.

GEOCALLI, Cuadernos de Geografía

Departamento de Geografía y Ordenación Territorial
Avenida de los Maestros y Mariano Bárcena, 1er. Piso

Guadalajara, Jalisco, México. C.P. 44260

Teléfono y Fax: (33) 38193381 y 38193386

Correo electrónico: revista.geocalli@csh.udg.mx

Visítenos en la página:

www.geografia.cucsh.udg.mx/geocalli



Números anteriores de GEOCALLI, Cuadernos de Geografía

1. Políticas urbanas en Ciudad Guzmán
2. Análisis territorial de Tonalá
3. Las regiones geomorfológicas del estado de Jalisco
4. Regiones y globalización
5. Paisaje, instrumento de gestión
6. Región y método
7. Límites municipales en Jalisco
8. Morfología urbana y propiedad inmobiliaria
9. Gestión turística en centros históricos
10. Usos y funciones en centros históricos
11. Cartografía del turismo
12. Mapa social de Guadalajara
13. Geografía y ordenamiento territorial
14. Desarrollo territorial y paisaje
15. Evolución regional de Tierra del Fuego
16. Amenazas por agrietamiento en el Valle de Tesistán
17. El ecoturismo y su conceptualización
18. Diferenciación del bienestar en Argentina
19. Cartografía histórica

- 20. El pensamiento geográfico de Carl O. Sauer
- 21-22-23. Denominación de Origen del Café y Desarrollo Regional
- 24. Análisis diacrónico del paisaje: Presa Zimapán
- 25. Tsunamis en Jalisco
- 26. Tendencias y cambios recientes en la red urbana Argentina
- 27. Vivienda social en la Zona Metropolitana de Guadalajara
- 28. Reciclaje de residuos en Guadalajara, Jalisco
- 29-30-31. Guachimontones: patrimonio arqueológico
- 32. Agricultura orgánica en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco
- 33. El paisaje del Pedregal de San Ángel
- 34. Carlos Nebel en Guadalajara: Penitenciaría de Escobedo y Jardín Botánico
- 35. Desigualdad en Guadalajara: los parques Solidaridad y Metropolitano
- 36. Paisaje visual: perspectivas teórico-metodológicas
- 37. Paisajes urbanos de postal
- 38. El contexto ambiental y productivo del ejido Toluquilla
- 39. Análisis integrado del territorio de Jocotepec, Jalisco
- 40. Guadalajara, Jalisco: vulnerabilidad a inundaciones
- 41. El centro histórico de la Ciudad de México y la planificación





El número 42 de
GEOCALLI, Cuadernos de Geografía,
se terminó de imprimir en el mes de julio de 2020
en los talleres de Pandora Impresores,
Caña 3657, La Nogalera,
Guadalajara, Jalisco, México
Tiraje: 200 ejemplares.

