



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**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 ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Blanca Sofía Amézaga Campos

ASESOR DE INFORME

Ing. Alberto Arias Paz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2016

Agradecimientos

Este es uno de los días más importantes de mi vida, concluyo con éxito uno de mis sueños, he de agradecer a aquellos que de una u otra forma me han apoyado para poder llegar hasta este punto:

A mi Alma Máter, la UNAM, y a mi amada Facultad de Ingeniería, ha sido un honor y un privilegio haberme formado para ingeniera en sus aulas.

A mi familia: Mis padres, Santiago y Lila, que han hecho increíbles sacrificios para darme todo aquello que pudiera necesitar durante mi época de estudiante, por ser un ejemplo, por inspirarme e impulsarme a seguir adelante. A mis hermanas, Liliana por esos momentos en los que me enseñaste que no importa que tan abajo estés, que con amor, trabajo y dedicación puedo ser muy exitosa, como ella, a Berenice por haberme dado aquellos consejos y lecciones de vida, nada te puede detener, sólo hay que creer en uno mismo y a mi hermanito Salvador, que ya es todo un hombre, por demostrarme esa bondad y nobleza que hay bajo esa máscara de seriedad.

Al Ing. Alberto Arias Paz, por ser esa persona que creyó en mí, por haberme guiado durante la realización de este trabajo, por las pláticas y enseñanzas, por enseñarme que las malas experiencias se pueden hacer a un lado para seguir adelante con lo que uno ama.

A mis sinodales: M en C Marco Rubio, Ing. Gabriel Salinas, Dr. José Antonio Hernández e Ing. Gabriel Arellano, por los consejos que recibí de ellos, por el tiempo, la dedicación y su buena disposición para mejorar este trabajo

A la M en C. Patricia Estrada, al M A.. Rogelio Lugo por haberme abierto las puertas la dirección de Saneamiento y del departamento de Calidad del Agua de JUMAPA, por apoyarme, ayudarme y por el tiempo calidad que me ofrecieron.

A Tania F. y Gabriela L. por haberse hecho mis amigas desde los primeros días de la carrera, por darme consejos, por enseñarme perseverancia y por haber estado conmigo en los momentos de risas, de llanto y en nuestras loqueras. A Héctor H. por haberme apoyado durante mis momentos difíciles, por esa competencia sana que se generó entre nosotros, por haberme enseñado tantas cosas curiosas y bellas, por hacer de mí una mujer más fuerte, por esos y otros motivos más siempre tendrás un espacio muy grande en mi corazón. A José Joaquín, por haber sido uno de los motivos por los cuales decidí estudiar en mi amada Facultad de Ingeniería y por apoyarme durante durante mi etapa de transición de la preparatoria No. 9 a la Universidad, a Tony Guerrero por ser una mujer excepcional y por haberme tratado como una hija, a Alejandro R por ser ese amigo que está para mí las 24 horas del día.

Blanca Sofía Amézaga Campos

Resumen

El acuífero del Valle de Celaya está ubicado en la parte sur de la provincia de la Mesa Central (MC) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), la litología en el subsuelo está integrada en su parte superior por un medio granular conformado por depósitos, lacustres, aluviales intercalaciones de tobas ácidas de cuya granulometría es amplia debido a que varía desde arcillas hasta gravas. Particularmente la granulometría más abundante son arcillas seguidas por arenas finas, gruesas y al final gravas, debido a lo mencionado anteriormente, esta parte del acuífero presenta un bajo potencial. En la base de estos depósitos se presenta el medio fracturado predominantemente de derrames basálticos inalterados y fracturados aunque también algunos muestran alteración, presentar intercalaciones con tobas ácidas de composición intermedia del cual se extraen volúmenes importantes de agua termal.

El sistema acuífero del Valle de Celaya presenta sobreexplotación desde hace ya varias décadas y debido a esto se observa una deformación en los niveles piezométricos locales y la cual es causada por la mayor demanda de recursos hídricos del sector potable en zonas particulares. En condiciones naturales el Valle de Celaya estaba conformado por dos acuíferos, uno superior con presencia de agua fría que era recargado por aguas del río La Laja y uno profundo con agua termal y con alto potencial. Debido a la sobreexplotación, los volúmenes de agua del superior fueron desapareciendo con el consecuente descenso del nivel estático, en la actualidad los volúmenes importantes de agua se extraen del profundo que se encuentra en un medio fracturado.

El presente estudio muestra que la recarga vertical del acuífero aunque procede de las lluvias, éste es predominantemente subterráneo y proveniente del E-NE. El flujo pasa por el subsuelo de la Ciudad, deformándose mediante conos de depresión piezométrica debido a la extracción por sobrebombeo de agua potable y posteriormente descarga subterráneamente hacia la porción occidental del área de estudio.

La calidad del agua subterránea es principalmente sódica-cálcica bicarbonatada siendo este último ion el predominante, esto es producto del flujo regional que interactúa con las riolitas, ignimbritas, rocas de composición intermedia entre otras que afloran en los alrededores de la Ciudad de Celaya. Las altas concentraciones de arsénico presentan una clara relación con la Falla Gobernadores, y esta puede servir de conducto para la mezcla de aguas; lo que deja claro el control estructural de los fluidos en el medio fracturado. Lo anterior queda evidenciado con las emisiones de agua termal (geiser) localizados dentro del Valle (Rancho Nuevo) y fuera de este, al oriente (falla Obrajuelo). Las altas concentraciones de arsénico estén relacionadas con las altas concentraciones de fluoruros como se demostró en los esquemas del presente trabajo.

Se cuenta con un amplio conocimiento local del acuífero del Valle de Celaya, sin embargo se requiere de la integración de información relacionada por piezometría, de sondeos geofísicos (TEM) y de registros geofísicos de pozos, con lo que se culminaría la integración del acuífero para su manejo eficiente.

Contenido

Introducción.....	7
Localización.....	7
Vías de comunicación y acceso.....	8
Clima	8
Hidrografía.....	8
Fisiografía	8
Objetivos y alcances	9
Objetivo general	9
Objetivos particulares.....	9
Justificación (Problemática).....	9
Descripción de la empresa (JUMAPA) y actividades realizadas	11
Trabajos previos.....	13
Marco Geológico.....	32
Geología Regional	32
Geología Histórica	33
Geología del Subsuelo.....	34
Geología Estructural-Tectónica	35
Hidrogeología	37
Marco conceptual de funcionamiento hidrogeológico (Modelo Hidrogeológico) ..	37
Calidad del Agua Subterránea (Hidrogeoquímica).....	47
Caracterización hidrogeoquímica.....	47
Resultados – Discusión	59
Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico.....	59
Pozo de Adsorción	63
Conclusiones y Recomendaciones	66
Bibliografía	68
Anexo 1.....	70
Mapa de la ubicación de los pozos utilizados para las gráficas de T °C y CE.....	70
Gráficas de temperatura	71
Gráficas de conductividad eléctrica	73

Anexo 2. Concentraciones de Arsénico, Flúor, Hierro y Manganeso y su relación con las fallas y el nivel estático por año.	75
Arsénico	75
Fluoruros	77
Hierro.....	79
Manganeso.....	81
Cloruros.....	83
Anexo 3. Características constructivas de los pozos	85
Anexo 4. Secciones	90
Ubicación de las secciones	90
Sección 1	91
Sección 2	92
Sección 3	93
Sección 4	94
Sección 5	95
Anexo 5. Hidrógrafos del nivel estático	96
Anexo 6. Configuraciones del nivel estático	104
Anexo 7. Gráficas de Temperatura (°C) por año.....	107

Introducción

Localización

El acuífero Valle de Celaya, se localiza en la zona sureste del Estado de Guanajuato en la Ciudad de Celaya, se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Santiago (RH12), en la subregión Medio Lerma, a la que pertenece la cuenca del río La Laja, así como la subcuenca Pericos y en la porción sur de la Cuenca del Río la Laja, la cual es la más grande del estado de Guanajuato en la parte sur de la Mesa Central (Figura 1).



Figura 1 Localización de la zona de estudio.

Vías de comunicación y acceso

Las principales vías de comunicación a la zona de estudio son:

- Carretera de primer orden N° 45, que une a las ciudades de México, Querétaro y Celaya.
- Carretera Federal de segundo orden N°45 que une a las ciudades de Celaya, Cortazar y Salamanca.
- Carretera estatal de segundo orden que une a la ciudad de Celaya con San José de Guanajuato.

Clima

En esta zona el clima es semiseco – semicálido (65%), semicálido a subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad (21%), semiseco – templado (7.4%), templado-subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad (4.5%) y templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media (2.1%). La temperatura oscila entre los 14 y 20 °C y el rango de precipitación anual es de 600 a 800 mm (INEGI, 2009).

Hidrografía

La principal corriente hidrológica del municipio es el río Laja, el cual nace en el municipio de San Felipe, recorre Dolores Hidalgo y Allende, penetra a través de Comonfort por el norte del municipio de Celaya y fluye por el oriente de la ciudad, cruzándola longitudinalmente de norte a sur; de ahí gira al poniente para desembocar en el río Lerma. (Cuellar-Franco, 2010)

Fisiografía

La Ciudad de Celaya se encuentra un 96.8% dentro de la provincia del Eje Neovolcánico y un 3.2% en la Mesa Central y dentro de las subprovincias del Bajío Guanajuatense (61.9), Sierras y Bajíos Michoacanos (22.7%), Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (12.2%) y Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato (3.2%). Dentro del sistema de topofomas se encuentra una llanura aluvial que cubre el 66.8%, volcanes escudo (17.9%), la Sierra Volcánica de laderas tendidas con lomerío (10.2%), la Meseta disectada con cañadas (3.2%) y un lomerío de basalto con llanuras (1.9%) (INEGI, 2009).

Objetivos y alcances

Objetivo general

Actualización de las características litológicas, estructurales e hidrogeológicas del acuífero del Valle de Celaya, Gto.

Objetivos particulares

- Actualizar el marco conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero del Valle de Celaya, Gto.
- Identificar las entradas y salidas subterráneas, así como los sistemas de flujo.
- Determinar las causas de la deformación piezométrica en el acuífero de la ciudad de Celaya, Gto.
- Dar una propuesta de las posibles causas de la presencia de arsénico y la esquematización de los lugares con valores superiores a la modificación de la NOM-127-SSA1-1994.
- Localización del sitio más favorable para la perforación de un pozo de Adsorción.

Justificación (Problemática)

En abril del 2002 la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Gto. (JUMAPA) detectó en estudios previamente realizados que el agua extraída de algunos pozos del acuífero del Valle de Celaya contiene niveles elevados de Arsénico (As) y fluoruros, siendo la principal zona afectada la parte noreste de la ciudad de Celaya, Gto. Los valores de estos contaminantes está por encima de los límites máximos permisibles señalados en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 la cual establece, a partir del año 2005, valores de 0.025 mg/L para el As.

La exposición crónica a concentraciones de As en agua significativamente mayores a 0.05 mg/L, resulta en serios problemas de salud epidérmicos, cardiovasculares, renales, hematológicos y respiratorios (Ortega-Guerrero, 2009).

Por otro lado, la cantidad de agua residual tratada por el municipio sobrepasa la cantidad requerida para los servicios como riego de jardines, lavacoches etc., por lo tanto es necesario buscar una manera adicional a la línea morada (ductos de agua tratada utilizada para el riego de áreas verdes como camellones, etc.) para evitar el desperdicio de esta, por tal motivo se planea perforar un pozo de adsorción, el cual será empleado para inyectar el agua tratada al acuífero.

El comportamiento del acuífero del Valle es de gran importancia para determinar el comportamiento de los elementos potencialmente tóxicos y para determinar el mejor lugar para perforación del pozo de adsorción.

Descripción de la empresa (JUMAPA) y actividades realizadas

A grandes rasgos, las actividades realizadas para la elaboración del presente trabajo fueron la recopilación y análisis de información perteneciente al acuífero del Valle de Celaya para la actualización de esta y del modelo hidrogeológico, elaboración de mapas de isolíneas del nivel estático y dinámico, de zonificación de Temperatura, Conductividad eléctrica, concentraciones de Arsénico, Hierro, Manganeso, Fluoruros, Cloruros, Sílice y Dureza para análisis hidrogeoquímico del acuífero, además se actualizaron y georeferenciaron las fallas por subsidencia visibles en superficie en la ciudad de Celaya, Gto.

La Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Gto., (JUMAPA), es un organismo operador del agua descentralizado de la administración municipal con patrimonio y personalidad jurídica propia. Su historia se remonta al año de 1983 cuando en sesión de Ayuntamiento se aprobó la creación de un Organismo que resolviera los problemas que implica el dotar de agua potable y alcantarillado. En 1984 se constituyó legalmente JUMAPA y se acordó que este Organismo se encargaría de administrar los sistemas de agua potable alcantarillado y saneamiento del Municipio; se determinó que al organismo le competía la detección, extracción, conducción y potabilización del agua, así como la planeación, construcción, operación y mantenimiento de las redes y la compra del equipo necesario para el suministro del vital líquido. En el año 1988 se separó de la Presidencia Municipal y se instalaron las primeras oficinas. En 1999 se adquirió el inmueble donde se ubican actualmente las nuevas oficinas de JUMAPA; esto fue debido al crecimiento de la ciudad y las necesidades propias del Organismo. Además se abrieron cuatro sucursales ubicadas en varios puntos de la ciudad para beneficio de los ciudadanos. Desde el inicio de la administración 2000-2003 se estableció como objetivo que la eficiencia sería el sinónimo de este organismo, ya que la calidad no es exclusiva del sector privado. Es por esto que JUMAPA ha implementado diversos programas que han ayudado a alcanzar uno de los objetivos principales; brindar un servicio de mayor calidad. Muestra de ello es la entrega del distintivo Guanajuato Crece Competitivo y reforzando este objetivo con la entrega de la certificación de 8 procesos en abril de 2003 y 9 más a principios de 2004 por parte del Instituto Guanajuato para la calidad dentro de su programa GTO.

La actual administración trabaja fuertemente para satisfacer con las demandas de los usuarios por lo que gracias a su confianza se han podido cumplir las metas y compromisos fijados al principio de cada año, uno de ellos es el fortalecimiento de las finanzas públicas ya que estamos convencidos de que al obtener recursos financieros es posible brindar servicios de calidad.

Filosofía de calidad.

Política de calidad. Tener procesos confiables y eficientes, apoyados con tecnologías de punta y personal capacitado, cumpliendo la normatividad vigente para el cuidado y manejo del agua potable, alcantarillado, saneamiento y reúso del agua tratada; a través del control de los indicadores de gestión y mejora continua.

1. Actitud de Servicio.
2. Alto Sentido de Logro y Resultados.
3. Honestidad.
4. Lealtad a la Ley.
5. Trabajo en Equipo.
6. Responsabilidad.
7. Respeto.
8. Espíritu de Superación.

Trabajos previos

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea. Acuífero (1115) Valle de Celaya, estado de Guanajuato. CNA, Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, Sugerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. 28 de Agosto de 2009.

De los resultados de los estudios técnicos recientes, se observó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea de 282 de los acuíferos, debido a los cambios en el régimen natural de recarga, el manejo del agua y de los volúmenes concesionados, por lo que se ha determinado el valor actualizado de la disponibilidad media anual de agua en cada uno de los mismos.

Actualización del censo de aprovechamientos para el acuífero del Valle de los Apaseos, Gto., CEASG, Julio de 2000. Elaborado por Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente S.C.

Las actividades realizadas en este trabajo fueron la actualización del censo de obras, la medición de niveles piezométricos y la cuantificación anual de la extracción de las obras. Durante los recorridos de campo se verificaron los datos anteriores de cada obra, a las ya censadas se les remarcó la clave asignada con anterioridad y a las nuevas se les identificó con una numeración que partió de la 1001. En la zona existen 1217 obras, 1183 son pozos, 8 norias y 26 manantiales. De las obras censadas, 835 están inactivas, 342 inactivas, 19 son nuevas sin equipar y 21 en proceso de perforación.

El volumen de extracción anual es del orden de 279 millones de m³, de los cuales 254 son de uso agrícola, 21.2 a agua potable y 2.8 para uso industrial y el restante para abrevadero. La configuración del nivel estático mostró que hacia los límites entre la parte baja del Valle y los cerros que rodean, se presentan profundidades entre 60 y 100m y hacia el oeste del Valle la profundidad va de 30 a 50 m., también mostró que las principales zonas de recarga al acuífero se localizan al norte y sur del Valle, que el flujo subterráneo tiene una dirección preferencial este-oeste hasta llegar a las cercanías del Río La Laja, en donde se forma un cono de abatimiento.

La configuración de evolución del nivel estático entre mayo de 1999 y mayo del 2000, muestra que hacia la zona de Obrajuelo la evaluación varía de -1 a +1m, los abatimientos se encontraron hacia el oriente de la zona y las recuperaciones hacia el poniente. En el resto del Valle las evoluciones fueron del mismo orden en el área desde La Laguna el Salitre hasta el norte de Apaseo el Grande, la zona que no presentó evolución comprende desde San Pedro Tenango hasta Apaseo el Grande, mientras que la que tuvo una evolución de -1m comprende la parte sur del Valle, así como la zona entre Juan Martín y Rincón de Tamayo. Los sitios con mayor evolución se localizan al norte de Juan Martín y al suroeste de Rincón de Tamayo con valores de -2m/año.

Actualización de las mediciones piezométricas y de calidad del agua subterránea de los acuíferos de los Valles de Pénjamo-Abasolo, Valle de Celaya, Valle de León, Silao-Romita, Río Turbio, Cuenca alta del Río Laja, Valle de Acámbaro y Laguna Seca, Gto., 2003 CNA, Gerencia Regional Lerma Santiago Pacífico., Elaborado por FYA-Consultores, Ingeniería y Construcción, S. A. de C.V.

Los objetivos del estudio son actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea en las redes de medición de los ocho acuíferos más importantes del estado de Guanajuato, determinar con precisión las elevaciones de los brocales o de los puntos de medición en cada uno de los vértices de la red de medición, describir características físico-químicas del agua subterránea desde las áreas de recarga hasta los sitios de descarga o de extracción y explicar el origen de los cambios observados y definir las evoluciones que presentan los niveles del agua y la calidad del agua, como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que están sujetos los acuíferos.

1.- En el Acuífero Pénjamo – Abasolo solo se explota mediante el bombeo de 2366 pozos los cuales extraen un volumen conjunto de 471 millones de m³/año, la recarga total es de 382 millones de m³/año por lo que se deduce un déficit de 89 millones de m³. El agua subterránea pertenece a la familia Sódica Bicarbonatada, la menor profundidad media del nivel del agua es de 27 m y se midió en el Valle de La Estrella en el extremo occidental del acuífero, al oriente de La Piedad de Cabadas, Mich. El nivel predominante del agua subterránea en el acuífero es de 90 m. Las aguas subterráneas del acuífero de Pénjamo – Abasolo se encuentran principalmente en rocas volcánicas de tipo basáltico y riolítico, por lo que las aguas son utilizadas para uso agrícola, potable e industrial. El Río Turbio cruza de norte a sur al acuífero desde Cuerámbaro en el extremo norte hasta su confluencia con el Río Lerma por su margen derecha entre la comunidad La Calle, la condición actual del acuífero de Pénjamo – Abasolo es de sobreexplotación, observándose abatimientos del nivel en la mayor parte del acuífero y se debe al déficit entre la extracción y la recarga.

2.- El acuífero Valle de Celaya se explota mediante 3369 aprovechamientos que extraen un volumen conjunto de 818 millones de m³/año y recibe una recarga media anual de 546 millones de m³/año provocándose un déficit de 272 millones de m³/año. Por usos, se destinan 695 millones de m³ al uso agrícola, 82 millones de m³ al uso público – urbano y 41 millones de m³ a usos industriales. La mayor profundidad del nivel estático es de 136 m y se midió en la zona de Punta de Obrajuelo, cerca del límite con el Estado de Querétaro, los niveles más someros son del orden de los 25 m al sur de Cortazar.

El agua pertenece a la familia Sódica Bicarbonatada Ligeramente Magnésica. El Río Laja cruza de norte a sur al acuífero, de Comonfort a Celaya, al llegar a la ciudad el río cambia de dirección bruscamente al poniente hasta salir del área cerca de la población de Sarabia. El Río Querétaro entra al acuífero por su extremo oriental y pasa por la zona de Obrajuelo, San Pedro Tenango y Apaseo el Grande antes de unirse al Río Laja por su margen izquierda cerca de Celaya. Ambos ríos a su paso van contribuyendo en forma importante a la recarga del acuífero. La máxima recarga se presenta en terrenos del Distrito de Riego No. 85 al norte de Celaya, hacia ambas márgenes del Río Laja, la descarga del acuífero se efectúa por el bombeo intensivo de numerosos pozos. Las condiciones actuales del acuífero son de sobreexplotación.

3.- El acuífero del Valle de León se explota mediante 1340 aprovechamientos los cuales extraen un volumen conjunto de 308 millones de m³/año deduciéndose un déficit de 54 millones de m³/año ya que la recarga es de 254 millones de m³/año. Del volumen extraído se utilizan 262 millones de m³/año en agricultura, 31 millones de m³/año en uso público – urbano y 15 millones de m³/año en uso industrial. La mayor profundidad del nivel del agua subterránea en el Valle de León es de 140 m y se localiza en una gran cono de abatimiento al sur de León por la carretera a Cuarámara, el agua pertenece a la familia Sódica Bicarbonatada Mixtas Magnésicas y Ligeramente Cloruradas Las aguas del acuífero somero de la porción oriental está contaminada por desechos domésticos e industriales por lo que no es recomendable para ningún uso. Las aguas subterráneas del resto del acuífero del Valle de León son buenas para todos los usos. Las condiciones del acuífero son de sobreexplotación por el bombeo intensivo de aguas subterráneas y la escasa recarga.

4.- En el acuífero de Silao – Romita se explota el agua subterránea mediante 2049 aprovechamientos que extraen un volumen conjunto de 343 millones de m³/año provocando un déficit de 60 millones de m³/año ya que la recarga es de 283 millones de m³/año. Para uso agrícola se utilizan 292 millones de m³/año, para uso público-urbano se aprovechan 34 millones de m³/año ya para uso industrial 17 millones de m³/año. El agua subterránea pertenece a la familia Bicarbonatadas Cálcicas Magnésicas. el bombeo intensivo ha provocado la sobreexplotación del acuífero. El Valle está drenado el oriente por el Río Guanajuato, al centro por el Río Silao y al poniente por el Río La Llave e influyen directamente en la recarga del acuífero, sobre todo el Río Guanajuato. El acuífero se encuentra sobreexplotado debido a que la extracción por bombeo es superior a la recarga natural.

5.- El acuífero del Río Turbio se explota mediante el bombeo de 614 aprovechamientos de los cuales se extrae un volumen conjunto de 148 millones de m³/año, deduciéndose un déficit de 49 millones de m³/año ya que se cuenta con una recarga de 99 millones de m³/año. Un acuífero somero con nivel de 25 m se localiza en la parte baja del Valle del río turbio. El nivel del agua predominante

en el acuífero es de 60 m. El agua está contaminada por aguas residuales de León y San Francisco del Rincón. En la comunidad El Tecuan, existen manantiales de agua salada. El agua de los acuíferos profundos del área es de buena calidad. Pertenece a la Familia de aguas Ligeramente Cálcidas, Ligeramente Sódicas y Bicarbonatadas. El Río Turbio recorre el acuífero en dirección norte – sur y va recargando al acuífero somero, desafortunadamente las aguas que arrastra no son de buena calidad y contamina el acuífero. Las condiciones de geohidrológicas del acuífero son de equilibrio.

6.- El acuífero de la Cuenca Alta del Río Laja se explota mediante 782 aprovechamientos, los cuales extraen un volumen conjunto de 278 millones de $m^3/año$. El nivel medio más representativo es del orden de los 100 m. La calidad del agua en todo el acuífero es apta para todos los usos. El agua pertenece a la familia de aguas Cálcida Magnésica Bicarbonatada. El Río Laja cruza al acuífero de noroeste a sureste y va recargando el acuífero desde el sur del Valle de San Felipe hasta la cortina de la Presa Ignacio Allende. La parte nororiental del acuífero es favorecido por los escurrimientos del Río San Agustín. Salvo la zona de la Presa Ignacio Allende y sus alrededores, todos los niveles hacia aguas arriba son superiores a los 100 m. Los ríos de la zona favorecen a la recarga del acuífero, sin embargo la condición del acuífero es de sobreexplotado.

7.- El acuífero del Valle de Acámbaro se explota mediante 1085 aprovechamientos, los cuales extraen un volumen conjunto de 192 millones de $m^3/año$ y provocan un déficit de 32 millones de $m^3/año$, ya que la recarga media anual es de 160 millones de $m^3/año$. Un nivel de 35 m es común encontrarlo tanto en las riveras del vaso de la Presa Solís, como en las laderas del Valle de Acámbaro. El agua subterránea en el acuífero en general es de muy buena calidad salvo en la comunidad de San Juan Jaripeo y diversas comunidades a lo largo de la carretera a Andocutín, donde el contenido de arsénico está arriba de la norma para agua potable. El agua subterránea pertenece a la familia de aguas Sódica Bicarbonatada Ligeramente Mixtas y Magnésicas.

La presa Solís que es la más grande del Estado con 800 millones de m^3 de capacidad útil ocupa la porción oriental del área y el cauce del Río Lerma a traviesa al acuífero de oriente a poniente. Las condiciones de descritas hacen que se disponga de grandes volúmenes de aguas superficiales para riego, por lo que algunos pozos solo se utilizan ocasionalmente para riegos de auxilio, manteniendo niveles muy favorables pues además cuentan con abundante recarga por retornos de riego. Las condiciones de explotación del acuífero son de equilibrio.

8.- El acuífero de Laguna Seca se explota mediante 593 aprovechamientos que extraen un volumen conjunto de 338 millones de $m^3/año$. El agua subterránea pertenece a la familia Cálcida Magnésica Bicarbonatada. Siendo este acuífero una cuenca cerrada, las corrientes superficiales son de pequeñas dimensiones, la mayor parte de ellas bajan de los cerros y se pierden por

infiltración al llegar al va m³lle. Por el extremo suroriental del acuífero entra al área el Arroyo La Cebada con un cauce que se va perdiendo y en épocas de lluvias abundantes llegan hasta Estación Pozo Blanco y la comunidad de Laguna Seca, que es la parte más baja de la cuenca con una elevación de 1978 msnm, donde se forman lagunas efímeras que desaparecen con el tiempo por evaporación e infiltración.

Los escurrimientos superficiales son tan escasos que no influyen en la recarga del acuífero. Las condiciones de este acuífero son de sobreexplotación, observándose un gran abatimiento de los niveles estáticos y niveles de bombeo tan profundos que existen en esta zona muchos pozos profundos abandonados por ser incosteable su explotación.

Actualización del sistema de información geográfica para el manejo del agua subterránea (SIGMAS), y el censo de 139 aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero del Valle de Celaya a realizar por el “Cotas Celaya, A.C.”, CNA Gerencia Estatal en Guanajuato

En este documento se hizo la actualización de datos como el nombre del acuífero en donde se encuentran ubicados los 139 aprovechamientos, el municipio, la comunidad, el nombre del propietario, el No. De Título, el No. De Censo CEAG, el tipo de uso, las coordenadas geográficas y UTM, el tipo de bomba, el diámetro de descarga, el gasto, el volumen de extracción, el número de serie del medidor y el no del medidor de la CFE.

Cuantificación de la extracción del agua subterránea en el Valle de Celaya, Gto., aplicando técnicas de percepción remota. CNA. Gerencia de Aguas Subterráneas, Gerencia Estatal en Guanajuato., Elaborado por Gondwana Exploraciones S.C. (Diciembre 2003)

El objetivo central del estudio consistió en la aplicación de distintos métodos para determinar el volumen de extracción anual de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Celaya.

Se describen primero diversas características que enmarcan físicamente el área de estudio como son clima, suelo, vegetación fisiografía, geología y geohidrología; se describe la secuencia estratigráfica que caracteriza el área de estudio, se describe la geología estructural basándose en la interpretación de la imagen satelital que cubre el área de estudio y permitió definir los principales rasgos morfoestructurales y estructurales de la zona, además se construyeron tres secciones geológicas para la interpretación geológica del subsuelo definiendo como rasgo principal una cuenca o bajo estructural que configura el Valle de Celaya con profundidad variable de 200 a 400 m rellena por materiales volcánico y derivados de la erosión de las porciones altas.

Tomaron como base las características petrofísicas de las unidades estratigráficas descritas para determinar 7 unidades hidrogeológicas: Unidad I: se relaciona con los depósitos aluviales y fluviales de alta conductividad hidráulica que constituyen un acuífero libre; Unidad II: se correlaciona con depósitos lacustres que conforman un cuerpo de baja permeabilidad; Unidad III: se conforma por flujos piroclásticos, depósitos de caída y conos cineríticos que en conjunto presentan buena porosidad y permeabilidad de buena a moderada por lo que se consideran buenos transmisores de agua subterránea; Unidad IV; está representada por cuerpos de ignimbritas de baja permeabilidad que dependiendo de su posición estratigráfica puede actuar como basamento estratigráfico o bien como capa confinante; Unidad V: corresponde a cuerpos de lavas basálticas con características favorables para captar y conducir flujos de agua por lo que pueden actuar como zona de recarga y/o acuífero; Unidad VI: se conforma por domos riolíticos y conos y estratovolcanes de composición basáltica y andesítica que pueden constituirse como zona de recarga, aunque se consideran de baja permeabilidad; Unidad VII: se relaciona con la secuencia vulcanosedimentaria con metamorfismo de bajo grado, caracterizada por una baja permeabilidad, por lo que se estima que actúa como basamento hidrogeológico.

La caracterización de los aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el Acuífero del Valle de Celaya señala que la mayor parte de las extracciones las realizan los aprovechamientos de uso agrícola; también resalta un nivel de tecnificación muy bajo en los sistemas de riego que prevalecen actualmente en el acuífero, por lo que existen porcentajes bajos de eficiencias de aplicación y de conducción, y por lo tanto, un desperdicio importante del agua subterránea realizado por el sector agrícola. Los balances de aguas subterráneas realizados en estudios anteriores señalan que el acuífero del Valle de Celaya se encuentra sobre explotado con un déficit de -195.76 Mm^3 anuales.

Utilizaron información de distintas dependencias para estimar la extracción de agua subterránea dando una suma de un volumen de extracción anual de 931.315 mm^3 y realizaron una revisión de una muestra de aprovechamientos de ese tipo para determinar su volumen de extracción, con distintos datos de los pozos realizaron una base de datos para calcular el volumen de extracción el cual asciende a 65.479 mm^3 anuales. Un tercer procedimiento consistió en utilizar superficies determinadas en imágenes de satélite correspondientes a los cultivos de los ciclos primavera – verano 2002 y otoño – invierno 2002-2003, y las láminas de riego calculadas en el primer método. De esta manera se obtuvo un volumen de extracción para ambos ciclos de 639.96 mm^3 .

Finalmente, se concluye que la aplicación de los métodos donde se requiere de consumos de energía anual, eficiencia electromecánica, superficies determinadas con imágenes de satélite y requerimientos de riego proporcionan resultados más confiables dado que emplean procedimientos y herramientas con características de precisión.

Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Celaya, Estado de Guanajuato., CNA, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y modelación Hidrogeológica. Abril de 2002.

En la zona de estudio existen dos acuíferos, uno frío superior alojado en aluviones y basaltos y otro termal inferior formado por riolitas. La zona en cuestión se haya enclavada, en su mayor parte, dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, mientras que una pequeña porción septentrional pertenece a la provincia de la meseta Central. Geomorfológicamente, en la zona se distinguen 4 unidades, como se describe a continuación: Valles, conos volcánicos, sierras volcánicas y mesetas.

Las rocas que conforman el marco regional son sedimentarias e ígneas, con edades que van del Cretácico al Reciente. Las rocas más antiguas pertenecen a la Formación Soyatal-Mezcala, que consiste en una alternancia de calcarenitas, calizas laminadas y lutitas con margas, fosilíferas. Se le encuentra al noreste del estado, con espesores que llegan a ser de 800 m y edad del Cretácico Inferior, también aparece la riolita Chichindaro, también del Oligoceno, la cual se trata de lava porfídica, que presenta, en ocasiones, estructura dómica. Formada por derrames de andesita en forma de lengüetas con terminaciones lobulares, aparecen las secuencias volcánicas del volcán de Palo Huérfano y San Pedro, con espesor de 20 a 30 m. Se les ha asignado una edad del Mioceno Tardío.

El acuífero del Valle de Celaya está constituido por secuencias de basalto, que afloran en gran parte de la zona, cubiertas, a veces, por depósitos aluviales y lacustres de espesor reducido. Asimismo, se presentan los basaltos en las estribaciones de las sierras, donde forman grandes volcanes escudo y monogenéticos de lava; estas sierras se extienden alrededor de los Valles intermontanos actuando como zonas de recarga.

La profundidad al nivel estático en la zona de interés fluctúa de 15 a poco más de 120 m en el municipio de Comonfort en el municipio de Juventino Rosas, llegan a ser hasta de 125 m, ya que es un área topográficamente más alta, e n general, predominan las profundidades de 50 m, que van aumentando hacia las partes más elevadas en la porción occidental de la zona, en donde se encuentra la ciudad de Celaya, las profundidades al nivel estático rebasa los 100 m, ocasionado por los 80 pozos profundos que utilizan para agua potable. El flujo subterráneo presenta una orientación norte-sur, mientras que al norte de la

localidad de Cortazar existen dos conos de abatimiento, así como en la porción poniente de Celaya, ocasionados por el intenso bombeo.

La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología indicada en la norma referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionadas e inscritas en el REPDA:

$$-74'550,556 = 286'600,000 - 0 - 361'150,556$$

La cifra indica que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada acuífero Valle de Celaya.

Estudio de actualización continua del conocimiento del acuífero piloto Valle de Celaya Gto. CNA, Subdirección General Técnica., Diciembre 2002. Elaborado por la Gerencia Estatal en Guanajuato.

El objetivo central del estudio es conocer la calidad del agua subterránea en la zona urbana de la Ciudad de Celaya, a través de indicadores que permitan identificar problemas de contaminación asociados a actividades antropogénicas, a hundimientos diferenciales del terreno, o a degradación natural.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Evaluar la calidad del agua subterránea en la zona urbana de la Ciudad de Celaya, a través de indicadores
2. Presentar una imagen clara y sintetizada de la calidad del agua subterránea e identificar zonas afectadas por contaminación o degradación natural.
3. Correlacionar los problemas de calidad del agua subterránea identificados con fuentes de contaminación antropogénica, asociados a los fallamientos por hundimientos diferenciales del terreno o a procesos de degradación natural.
4. Presentar un programa de monitoreo de la calidad del agua subterránea que sea técnica y económicamente eficiente.

Se realizó el Estudio de Actualización Continua del Conocimiento del Acuífero Piloto Valle de Celaya, Gto., con objeto de conocer la calidad del agua subterránea en la zona urbana de la Ciudad de Celaya, a través de indicadores que permitan identificar problemas de contaminación asociados a actividades antropogénicas, a hundimientos diferenciales del terreno, o a degradación natural.

Para la selección de los sitios de muestreo, se tomaron en consideración los datos existentes sobre calidad del agua subterránea, la localización de los aprovechamiento, al ubicación de las fallas y además, se revisó la geología del

subsuelo, los datos piezométricos e hidráulicos, superpuestos con la distribución de las fallas que existen en la Ciudad, la distribución de los ductos de Pemex, gasolineras, cementerios, descargas de aguas residuales y el cauce del Río Laja.

A las 40 muestras obtenidas en campo se les determinaron en el sitio la conductividad eléctrica, temperatura, alcalinidad, dureza, Eh y pH. En el laboratorio se les determinaron a las 40 muestras: cloruro, sulfato, sodio, potasio, calcio, magnesio, nitratos, fluoruro, arsénico, coliformes fecales y carbono orgánico total.

Los resultados indican lo siguiente:

a) En términos generales la Ciudad de Celaya presenta agua de buena calidad química y bacteriológica, con excepción de 4 pozos de agua potable en los que debe ser revisada la protección del pozo, de acuerdo con las especificaciones de la NOM-003-CNA-1996, después de lo cual deberán realizarse nuevos análisis bacteriológicos para certificar que ha sido reparada la causa de esta contaminación. Esto fue evaluado a través de indicadores hidroquímicos que caracterizan el acuífero que se explota en la Ciudad de Celaya.

b) Las zonas afectadas por contaminación antropogénica, son principalmente las que se encuentran en las trazas de las fallas por sobreexplotación y los pozos someros cercanos a las zonas de falla y el graben que forman las fallas Oriente y Tecnológico, como se concluye de la interpretación de los mapas de isovalores de cloruro realizados, valores de conductividad eléctrica, presencia de coliformes fecales y profundidad de los pozos. Otros sitios a considerar son los pozos cercanos al Río Laja, ya que se demostró que el agua de este río se infiltra.

c) La degradación natural que se está presentando es un deterioro de la calidad que ocurre gradualmente debido a un incremento en la proporción de las sales disueltas con respecto al tiempo del orden de 60 a 100 microsiemens/cm en promedio y un incremento en la temperatura de 1 a 2 grados en promedio, aunque algunos casos se encuentran valores del orden de los 5 grados. Valores estos últimos que han ocurrido en un período de 3 años. Ambos fenómenos ocurren debido al fuerte abatimiento del acuífero en la Ciudad de Celaya. Que si bien es cierto que actualmente no está por arriba de las normas de agua potable, de seguir este incremento, pueden alcanzarse los límites a futuro.

d) El abatimiento, causa que ocurra la consolidación de los estratos arcillosos de la parte oriental de la Ciudad, incrementando el desplazamiento de las grietas de tensión, que actualmente se comportan como auténticas fallas, que desplazan bloques de terreno. Este efecto del abatimiento, causa el rompimiento de ductos y el represamiento del agua en época de lluvias, haciendo que el acuífero tenga una franja de vulnerabilidad a la contaminación en la parte noreste de la Ciudad.

Estudio de la calidad del agua en la parte noroeste de la ciudad de Celaya, Gto. (2005), JUMAPA, elaborado por Estrada Orozco, Patricia A. y Camargo -Valencia Vicente Arturo.

El consumo continuo de agua con concentraciones de arsénico y fluoruros por encima de los límites máximos permisibles puede ocasionar daños a la salud. En la zona noreste de la ciudad de Celaya y en algunas comunidades cercanas a esta zona, se han detectado concentraciones de estos dos parámetros, por encima de estos límites, reportados por la Secretaría de Salud.

Se realizó un estudio para conocer la calidad del agua subterránea, particularmente las concentraciones de arsénico y fluoruros en la zona, y así poder establecer la factibilidad de su uso como agua potable o establecer zonas alternas para la perforación de pozos con agua que cumplan con la norma. También se realizó la actualización del Censo de Obras realizado en 1999, encontrándose un total de 66 obras: 64 pozos, 1 noria y 1 manantial, de los cuales 43 pozos se encuentran activos y 21 pozos se encuentran inactivos. De los pozos activos el 79% son de uso agrícola, el 14% son de uso público urbano.

En la parte norte de la zona que se estudió los niveles son más someros (27 a 42 m), en cambio en la parte sur los niveles varían de 63 a 82 m; este gradiente hidráulico entre ambas zonas se debe en gran parte a que se utiliza el agua superficial del sistema de riego de La Begoña y esto permite que se disponga en menor volumen del agua subterránea.

De acuerdo con la correlación estratigráfica de los cortes litológicos de los pozos, el basamento del Valle de Celaya corresponde a una serie de rocas basálticas masivas, cuya consistencia varía de sana, fracturada y alterada. Las conductividades del agua son relativamente altas (769 a 1823 μs) comparándolas con las encontradas en la zona urbana (400 a 600 μs) y las temperaturas varían de 22 a 35 °C, presentándose los mayores valores (30 a 35 °C) en la parte sur-sureste; sin embargo, se localizaron dos pozos con valores de temperatura anómalos: Los pozos Na-Tha-Hi y el Zapote tienen temperaturas altas y están alineados en una dirección casi este-oeste con el pozo del Rancho de Santa Cecilia (47.7°C) y el pozo No 2 de la granja Bachoco (88°C) y se les relaciona con la posible existencia de una falla geológica orientada en esta misma dirección. Con los resultados del análisis de laboratorio, se detectó una franja con valores de arsénico por encima del límite máximo permisible; dicha franja se encuentra orientada en dirección NE-SW y tiene un ancho promedio de 2 km, e incluye la comunidad de San Miguel Octopan, el Frac. La Herradura y las colonias Santa Rita y Gobernadores.

Las concentraciones fuera de norma de fluoruros presentan la misma tendencia que las del arsénico, puesto que existe una relación directamente proporcional entre ambos, para esta zona de estudio.

Partiendo de la distribución de la calidad del agua que se presenta en esta zona se determinó una zona alterna para la perforación de nuevos pozos es la parte sur-sureste de la zona de estudio donde los valores de arsénico oscilan entre 0.0098 y 0.0062 mg/l y los de fluoruros entre 1.08 y 0.8 mg/l. El volumen de extracción de todos los pozos en conjunto podría deteriorar la calidad del agua de los pozos que se encuentran en las proximidades de la zona de estudio.

Estudio Geohidrológico en la zona Nor-Poniente de la ciudad de Celaya, Gto., JUMAPA., Mayo 2005. Elaborado por GEOPSA S.A. de C. V.

El objetivo principal del estudio consiste en evaluar las condiciones hidrogeológicas del subsuelo de la zona Nor-Poniente de Celaya, para definir las áreas o sitios, cuyas características litoestratigráficas e hidráulicas son favorables para la construcción de nuevas fuentes de abastecimiento.

El área de estudio geológicamente está representada principalmente por una unidad litológica, cronológicamente ubicada durante el Cuaternario, constituida por rellenos aluviales del Cuaternario, desde el punto de vista hidrogeológico, las rocas volcánicas fracturadas actúan en superficie como zonas de recarga del agua pluvial y a profundidad llegan a conformar importantes unidades acuíferas.

Las obras visitadas explotan al acuífero constituido por rocas volcánicas fracturadas y sus productos piroclásticos asociados, además de depósitos granulares de origen sedimentario. En la zona de estudio los pozos tienen profundidades que van desde los 150 hasta los 400 m, los cuales presentan un nivel de saturación variable entre los 90 y 110 m, en tanto los niveles dinámicos fluctúan entre los 116 m hasta los 150 m en promedio, como es el caso de los pozos operados por la JUMAPA. Dentro de la misma zona de estudio en lo que se refiere a los aprovechamientos someros, estos presentan una profundidad total entre los 80 y 100 m, con niveles de saturación que varían entre los 41 y 77 m de profundidad. Los pozos con bombas de 4 y 6 in y caudales de extracción menores a 15lps reflejan un bajo rendimiento de los materiales arcillo-arenosos.

Con las mediciones realizadas del nivel estático, se elaboró la configuración de la superficie piezométrica, observándose que la profundidad de dicho nivel se incrementa de sur a noreste, donde los valores someros se localizan al sur de la comunidad de Estrada, en tanto que los niveles más profundos se ubican en las inmediaciones de las comunidades de Santos Degollado, La Misión, El Becerrito y La Zona de Valle de Los Naranjos.

Con los 6 TEM's realizados en este estudio y los considerados de apoyo de estudios anteriores, se construyeron 7 perfiles georesistivos, a través del cual se interpretaron cinco unidades geoelectricas, Un número considerable de aprovechamientos, se encuentran instalados en el paquete piroclástico de textura fina (250 m), donde se presentan algunas intercalaciones de coladas de lava de

50 m de espesor en promedio. Este paquete, se incrementa de la parte central hacia el suroeste de la zona analizada, en tanto que las coladas volcánicas son más someras hacia el noreste y al este. Se consideró poco probable la generación de fallas por hundimiento, particularmente de la porción centro hacia el noreste, porque en esta zona hay coladas de basalto intercalados en los sedimentos finos, además hacia el oriente los derrames volcánicos se encuentran más cercanos a la superficie y esto le proporciona mayor firmeza al subsuelo. La zona suroeste puede representar mayor riesgo, debido a que el paquete sedimentario se incrementa y las unidades de roca se ubican a mayor profundidad.

Con relación a los reportes de análisis físicos, químicos y bacteriológico, del agua extraída de algunos pozos del área, se observaron ciertos aspectos relevantes: es notoria la presencia de termalismo en el agua, con valores promedio de 35°C. La concentración de arsénico en el agua varía de 0.0041 a 0.0075 mg/l, dichos valores se encuentran por debajo del límite que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para el agua de consumo humano.

Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya, CNA, Octubre de 1999. Elaborado por Ingeniería Geológica Computarizada. S. A. de C.V.

Se realizó el estudio con el motivo de determinar las estructuras geológicas principales que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea, conocer la superficie piezométrica del acuífero y su comportamiento en perfil. Determinar las condiciones de explotación del acuífero, cuantificar y delimitar las zonas de recarga/descarga del acuífero, las condiciones en que se lleva a cabo y los volúmenes anuales, para proponer zonas que requieren de protección, predecir el comportamiento del acuífero a largo plazo, en función del régimen de extracción actual, actualizar la cuantificación de los parámetros en la ecuación de balance y realizar el balance hidrogeológico del acuífero, determinar la disponibilidad adicional de aguas subterráneas y sus efectos, definir las áreas donde se pueda realizar extracción adicional de esta y de no haber disponibilidad enunciar las causas, representar las condiciones hidrogeológicas del acuífero, mediante un modelo matemático, determinar las características hidráulicas del acuífero, determinar la calidad del agua subterránea desde el punto de vista fisicoquímico y su relación con la geología de la zona, definir los efectos colaterales de la extracción del agua subterránea, como hundimientos y agrietamientos, evaluar los riesgos potenciales de contaminación del acuífero e impacto ambiental, actualizar el censo de pozos del acuífero y elaboración de la base de datos georeferenciada, proponer políticas y estrategias para administrar los recursos, a fin de obtener el mayor provecho posible del agua subterránea y regular su explotación y dar las bases para su reglamentación. El área de estudio cuenta con una superficie de 1843.22km².

Los resultados indican que en la zona de los Valles predominan las profundidades del nivel estático de alrededor de 50m y estas van aumentando hacia las zonas comprendidas en el municipio de Juventino Rosas hasta los 125m por tratarse de una población topográficamente más alta, hacia las zonas comprendidas en el municipio de Comofort junto al Río La Laja se nota una disminución hasta llegar alrededor de los 15m de profundidad, posiblemente es por el efecto del río, en las zonas comprendidas dentro del municipio de Jaral del Progreso tiene un mínimo de 10m en su parte norte y en la parte sur de esta población tiene una profundidad de 20m, hacia la zona central del área de estudio dentro de los municipios de Villagrán y Cortazar puede observar un aumento sustancial de la profundidad del nivel estático, hasta los 60m de profundidad; en la zona occidente se encuentra la Ciudad de Celaya ahí se encontraron niveles de más de 100m. Por otro lado el comportamiento piezométrico en general indica que existen mayores abatimientos hacia los Valles y menores hacia las zonas montañosas, teniéndose un promedio de abatimiento anual de casi 2.5m.

El sistema está conformado principalmente por un acuífero que originalmente era libre y que de acuerdo con los resultados del estudio ahora está en condiciones de semiconfinamiento, esto es debido a que el acuífero aluvial, somero, con niveles cercanos a la superficie, se fue secando, al pasar la mayor parte de los pozos a extraer agua de los basaltos, lo que queda de aluvión saturado, actúa como semiconfinante, además, que los basaltos del subsuelo se encuentran intercalados con tobas que también suelen actuar como semiconfinantes.

Se trata de diferentes profundidades explotadas dentro del mismo sistema hidrogeológico. Por encontrarse en una frontera de dos dominios hidrogeológicos, se forman regiones con distinto comportamiento hidráulico, generando que los conos de abatimiento queden aislados de otras zonas con menores abatimientos. Se realizaron 20 pruebas de bombeo y se determinó que la transmisividad se encuentra en el rango de 4.07×10^{-5} a 1.65×10^{-2} m²/s y el coeficiente de almacenamiento en el orden de 0.00141 a 0.0544. Los modelos conceptuales de estos pozos son de libres a semiconfinados.

La facies dominante es bicarbonatada-sódica, seguida de la bicarbonatada, lo que indica las rocas por las cuales se ha recargado y por donde ha circulado, y los resultados del balance indican que las entradas al acuífero por recarga son del orden de 399.84 Mm³/año, mientras que las salidas son del orden de 618 Mm³/año. El modelo matemático demuestra el modelo conceptual y el comportamiento hidráulico del sistema, reproduce las condiciones hidrodinámicas del sistema en tres dimensiones, permitiendo la predicción para los próximos 10 años conservando el régimen de extracción.

Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación de los acuíferos de Celaya, Jaral de Berrios y Pénjamo - Huanímaro. CNA, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas., Elaborado por Gymsa, Estudios de Planeación Regional S. A. de C.V., 1997.

Los objetivos del estudio fueron diseñar una red óptima de observación que considere la variación de los niveles de agua subterránea y su calidad, diseñar una red óptima de pozos minimizando costos bajo ciertas restricciones, aplicar geoestadística, aplicar el modelo tridimensional de simulación y predicción VISUALMODFLOW, conocer la disponibilidad de agua subterránea, Determinar la magnitud de las componentes de la ecuación de balance del agua subterránea, proponer el modelo conceptual hidrodinámico, explicar los mecanismos que controlan la dinámica de las aguas subterráneas, determinar la distribución espacial de los parámetros hidráulicos y determinar la geometría espacial del sistema acuífero.

El acuífero de Celaya se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón volcánico mexicano y la meza del Centro, y se reconocieron elementos fisiográficos como sierras, Valles, mesetas y lomeríos, por la variedad de geoformas, se desprenden diferentes climas como el cálido, templado y semiseco, la vegetación es bosques de encino y pino en las partes altas, mientras que en los Valles se desarrollan matorrales, pastizales y la agricultura, los suelos son ricos en materia orgánica y nutrientes, el periodo de mayor precipitación corresponde a los meses de Junio a Agosto y el periodo de estiaje es de Diciembre a Marzo., las principales corrientes que drenaje el área son el Río la Laja y de menor importancia el Río Querétaro.

Las rocas con mayor capacidad para ingresar el gua al subsuelo son aquellas que presentan fracturamiento intenso, de climas en donde la precipitación es mayor y que presentan capacidad de infiltrar el agua, estas rocas se encuentran al sur del área, están constituidas principalmente por rocas basálticas y en menor proporción riolitas.

La región del acuífero es una zona tectónicamente activa, asociada con la dinámica del Cinturón volcánico Mexicano, las rocas generalmente son de composición básica y se sobreponen a los cuerpos riolíticos y andesíticos producidos por el magmatismo de arco de la Sierra madre Occidental, así como a las rocas sedimentarias asociadas al cinturón de pliegues y Fallas de Cabalgadura de la Sierra Madre Oriental. De acuerdo a los patrones de facies que presentan los materiales que constituyen el acuífero se condujera que su depósito se llevó a cabo en una dualidad de ambientes.

Los basaltos se distribuyen irregularmente, ocasionando una heterogeneidad al ambiente y como consecuencia el acuífero. La interpretación hidrogeoquímica de los análisis químicos de las muestras de agua de estudios

previos confirmó los modelos geológicos e hidrogeológico, la composición del agua es cálcico-bicarbonatada, el principal uso del agua en la región es para irrigación de cultivos, las aguas para consumo humano pueden generar problemas de salud ya que se detectaron concentraciones mayores a las máximas aceptables de fluoruros aceptables por la secretaría de Salud.

Fallamiento de terrenos en Celaya, Elaborado por Sociedad Mexicana de Suelos, A.C. y Asociación Geohidrológica Mexicana. A.C. 1985

La Subdirección de geohidrología de la SARH dio datos de los escurrimientos sobre el Río la Laja, estos arrojaron un promedio aritmético de 201 millones de metros cúbicos, pero desde un máximo de 774 hasta un mínimo de 13 millones de m³ en 1982. Tomando en cuenta esto se propuso construir un sistema capas de recargar la cuarta o quinta parte del promedio del escurrimiento medido sobre el Río Laja, aprovechando solamente las épocas de avenidas a fin de captar agua menos contaminada, para lo cual se propusieron dos sitios, una es la zona del Puesto sobre la margen izquierda del Río Laja al sur de Celaya mediante pozos perforados en zonas basálticas y el segundo es en la colonia Monte Blanco cavando a unos 40m de profundidad para realizar una recarga artificial.

Informe final de los trabajos de piezometría en los Valles de San Juan del Río y Querétaro del estado de Querétaro; León, Celaya y Jaral de Berrios del estado de Guanajuato. Elaborado por IEPSA 1991.

Para el desarrollo del trabajo se hizo necesario cubrir los siguientes objetivos:

- Actualización de la red piezométrica.
- Conocer la posición de la superficie piezométrica final del periodo de recarga y estiaje de los acuíferos en el ciclo de inicios y finales de 1990.
- Conocer la evolución piezométrica, tomando como base los registros obtenidos de la recopilación, tanto en Oficinas Centrales como en las Gerencias Estatales, y formar con ellos la historia piezométrica de cada uno de los pozos piloto (hidrógrafos).
- Integración de una base de datos piezométricos de los Valles en estudio.
- Realizar configuraciones de igual profundidad y elevación del nivel estático para cada recorrido y cada Valle, utilizando planos base topográficos escala 1:100 000.

Para los Valles de San Juan del Río y Querétaro en el estado de Querétaro se determinó que el nivel estático de estos Valles no presentan grandes cambios durante todo el año, los valores más profundos se localizan en el poblado de la Estancia con 140m y al norte de los Benitos y Montenegro, así como al SE de la

Ciudad de Querétaro con 120m y disminuye hacia el centro de los Valles, hasta llegar a los 20m y al norte de San Juan del Río y el Valle de Amazcala, esto en Febrero, pero en diciembre los niveles se conservaron regularmente iguales. La dirección del flujo que alimenta al Valle de Querétaro tiene una dirección norte-sur y suroeste-noreste hacia la porción occidental, en tanto que en tanto que en la oriental, la dirección de flujo desciende con dirección noreste-suroeste; se observa en diciembre dos conos de abatimiento, uno al occidente de la ciudad de Querétaro y otro al sureste de Chichimequillas. El occidente del Valle de San Juan del Río se alimenta por un flujo que desciende con dos direcciones, una al noreste-sureste y otra suroeste-noreste, la porción norte del mismo Valle presenta a su vez dos direcciones de flujo, una noroeste—sureste y otra suroeste-noreste.

Los Valles de León y Silao presentan profundidades del nivel estático desde 10 hasta 105m, la mínima al suroeste de León y la máxima al sureste de esta misma, En el Valle de Silao las profundidades varían de 30m al norte hasta 80 al suroeste del mismo poblado. El flujo subterráneo que alimenta estos Valles tiene una dirección preferencial para el Valle de León noreste-suroeste y para Silao noroeste a sureste y en ocasiones norte-sur.

Los Valles de Celaya y Salamanca presentan variaciones del nivel estático de 15 a 80m, las zonas con los niveles más bajos están en los alrededores de Comonfort y Escobedo con valores de 15 a 30m y al sur y sureste de Salamanca con valores de 20 a 30m. Los valores más altos están al sureste de Juventino Rosas y descienden hasta el occidente de Celaya con 40m y se incrementan al este-noreste de la misma hasta llegar a 80m. La dirección de flujo preferencial es noreste-suroeste en Celaya y en Salamanca noreste-suroeste y de sureste a noroeste. Hacia la periferia de Juventino Rosas y al oriente de San Antonio de Morales se definieron dos domos de recuperación del nivel estático y un cono de abatimiento al sur de Juventino Rosas y al oriente de Valle de Santiago se localiza otro domo de recuperación.

El Valle de Jaral de Berrios es angosto y alargado, presento variaciones muy leves del nivel estático en noviembre y enero, los valores más someros son de 20m hacia el sur del Valle y se profundizan conforme se acercan al centro del Valle, hacia el noroeste y sureste de Jaral de Berrios llega a los 70m. El flujo subterráneo tiene dirección noroeste-sureste y oriente –poniente principalmente, se determinó un cono de abatimiento al noreste de San Bartolo de Berrios y cerca de este u domo de recuperación incipiente, al sureste de este poblado se ve el inicio de dos conos de abatimiento.

La actualización de la disponibilidad media anual de las aguas subterráneas publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el Registro Público de Derechos de Agua al 30 de septiembre de 2008. Diciembre del 2002.

El objetivo central del estudio es conocer la calidad del agua subterránea en la zona urbana de la Ciudad de Celaya, a través de indicadores que permitan identificar problemas de contaminación asociados a actividades antropogénicas, a hundimientos diferenciales del terreno, o a degradación natural.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Evaluar la calidad del agua subterránea en la zona urbana de la Ciudad de Celaya, a través de indicadores
2. Presentar una imagen clara y sintetizada de la calidad del agua subterránea e identificar zonas afectadas por contaminación o degradación natural.
3. Correlacionar los problemas de calidad del agua subterránea identificados con fuentes de contaminación antropogénica, asociados a los fallamientos por hundimientos diferenciales del terreno o a procesos de degradación natural.
4. Presentar un programa de monitoreo de la calidad del agua subterránea que sea técnica y económicamente eficiente.

Para conocer la calidad del agua subterránea en la zona urbana de la ciudad de Celaya a través de indicadores que permitan identificar problemas de contaminación asociados a actividades antropogénica, a hundimientos diferenciales del terreno o a degradación natural se tomaron 40 muestras en campo a las cuales se les determinó en el sitio la conductividad eléctrica, la temperatura, la alcalinidad, dureza, Eh, pH, mientras que en el laboratorio se les determinó cloruros, sulfatos, sodio, potasio, calcio, magnesio, nitratos, fluoruro, arsénico, coliformes fecales y carbono orgánico total.

Los resultados indicaron lo siguiente:

- En términos generales la Ciudad de Celaya presenta agua de buena calidad química y bacteriológica, con excepción de cuatro pozos de agua potables en los que debe ser revisada la protección del pozo, esto fue evaluado a través de indicadores hidrogeoquímicos que se caracterizan el acuífero que se explota en la Ciudad de Celaya.
- Las zonas afectadas por contaminación antropogénica son principalmente las que se encuentran en las trazas de las fallas por sobreexplotación y los pozos someros cercanos a la zona de la falla y el graven, como se concluye de la interpretación de los mapas de isovalores de cloruro realizados, valores de conductividad eléctrica, presencia de coliformes fecales y profundidad de los pozos.

- La degradación natural que se está presentando es un deterioro de la calidad que ocurre gradualmente debido a un incremento en la proporción de las sales disueltas con respecto al tiempo del orden de 60 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en promedio y un incremento en la temperatura de 1 a dos grados en promedio, aunque algunos casos se encuentran valores del orden de los 5 grados. Valores estos últimos que han ocurrido en un periodo de 3 años. Ambos fenómenos ocurren debido al fuerte abatimiento del acuífero en la Ciudad de Celaya, que si es cierto que actualmente, pueden alcanzarse los límites a futuro.
- el abatimiento, causa que ocurra la consolidación de los estratos arcillosos de la parte oriental de la Ciudad, incrementando el desplazamiento de las grietas de tensión que se comportan como fallas y desplazan bloques de terreno causando que los ductos se rompan y el represamiento del agua en época de lluvias haciendo que el acuífero tenga una franja de vulnerabilidad.

Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya, Gto. CEAG. ,2000. Elaborado por Lesser y asociados, S. A. de C.V.

Los principales objetivos del estudio fueron:

- Difundir los resultados de los estudios hidrogeológicos de los acuíferos del estado.
- Conocer las características bajo las cuales se está extrayendo el agua subterránea en los acuíferos
- Elaborar un balance del agua subterránea, actualizado al año 2000.
- Conocer si existe comunicación entre acuíferos.

El trabajo es una sinopsis de la actualización al año 2000, del estudio Hidrogeológico del Valle de Celaya, Gto. Se recopiló la información existente y se actualizó con mediciones piezométricas obtenidas en abril del 2000, a partir de donde se elaboró un balance del agua subterránea. El acuífero de este Valle es explotado por 1866 aprovechamientos correspondientes a 1746 pozos, 66 norias y 54 manantiales.

La extracción total de agua subterránea asciende a 593 $\text{mm}^3/\text{año}$ de los cuales el 67% se utiliza en la agricultura, el 4% en la industria y el 23% se destinan a uso potable. Actualmente la profundidad al nivel estático promedio es de 80 - 100 metros y se observa un abatimiento promedio anual de entre 2.5 y 3.5 metros. Las entradas por flujo subterráneo e infiltración vertical ascienden a 431.7 $\text{mm}^3/\text{año}$, mientras que la extracción por bombeo es de 593 $\text{mm}^3/\text{año}$ para la zona de balance, lo cual da un cambio de almacenamiento negativo de 161.3 $\text{mm}^3/\text{año}$.

Servicios de Prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona del Valle de Celaya, en el estado de Guanajuato. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, Dirección General de programas de Infraestructura Hidráulica, Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas. Elaborado por GEOPE. S. A., Diciembre de 1980.

Los objetivos del trabajo son determinar las unidades litológicas subyacentes al Valle, conocer el funcionamiento de las condiciones hidrogeológicas del área, las conexiones que se presentan entre los diferentes tipos de acuíferos y sobre todo las relaciones que existen entre los acuíferos fríos y termales, se deberán localizar las zonas más favorables para la perforación de pozos con objeto de explotar aguas subterráneas sin interferir en las explotaciones que se realizan en la actualidad.

Dentro de los resultados se observó que el agua de estos acuíferos proviene de la lluvia, que se almacena y circula por las rocas volcánicas y materiales clásticos profundos donde adquieren una temperatura de más de 30°C sin efectos de vaporación con un contenido isotópico similar al que se podría considerar como típico de este acuífero, la otra parte del agua infiltrada que circula por la porción superior del Valle presenta contenidos isotópicos diferentes por la existencia de retornos de riego. Con la información obtenida se concluye que existen dos acuíferos, uno frío superior y uno termal inferior alojado principalmente en riolitas fracturadas y sedimentos granulares terciarios. Dentro del acuífero frío se censaron 53 aprovechamientos con los siguientes datos promedio: Profundidad de 82m, Nivel Estático de 22m, Nivel dinámico de 30m, gasto de 24 lps. y temperatura de 22°C.

Dentro del acuífero termal se censaron 42 aprovechamientos con las siguientes características promedio: profundidad 143m, nivel estático de 34.5m, nivel dinámico de 57m, gato 30 lps. y temperatura de 36°C. El tercer grupo de aprovechamientos se considera formado por una mezcla de aguas del acuífero frío y termal, se censaron 84, sus características promedio son una profundidad de 118m, un nivel estático de 32m y un dinámico de 46m, un gato de 30m y una temperatura de 26.5°C, no existe una litología confinante que impida el paso entre ambos acuíferos. Donde no se ha observado hidrotermalismo es debido a que las perforaciones con han llegado a las rocas riolíticas, se determinaron dos zonas para efectuar las perforaciones, la primera es la zona Malvas y la zona Purísima de Covarrubias.

Marco Geológico

Geología Regional

La ciudad de Celaya se encuentra ubicada entre la parte sur de la provincia de la Mesa Central (MC) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), en la primer aparecen conjuntos vulcanosedimentarios marinos en lo que se reconocen espesores grandes de basaltos almohadillados con componentes sedimentarios que consisten principalmente en lutitas, areniscas y calizas, en algunas localidades los sedimentos se encuentran intercalados y todas estas rocas muestran deformación plicativa y fallamiento inverso, los cuales fueron producidos durante la orogenia Laramide (Nieto-Samaniego A. F. et.al., 2005).

Los rasgos geológicos más sobresalientes son los volcanes de composición andesítico-basáltica, de edad Plioceno-Cuaternaria, estos aparatos volcánicos presentan diversos grados de disección en las cercanías de la Sierra de Guanajuato como puede observarse en los cerros de Palo Huérfano, La Gavia y Culiacán (Aranda-Gómez J. J. et al., 1989).

El origen de la zona denominada El Bajío se inició durante la Orogenia Larámide. Con el emplazamiento de El Granito Comanjá durante el Ypresiano siguiendo estas estructuras laramídicas; i.e., con su eje mayor orientado NW-SE. El enfriamiento rápido de este batolito sugiere su exhumación rápida, seguida por la formación de fallas normales con rumbo NW-SE controladas estructuralmente por la margen suroeste de este granito formando la falla del Bajío. El escarpe generó abanicos aluviales (conglomerados Duarte y Guanajuato). El espesor de los conglomerados depositados a lo largo de la falla del Bajío indica que su extremo sureste tuvo mayor levantamiento que en el noroeste (Nieto-Samaniego A. et. al., 2005).

Durante el Oligoceno se reactivó la falla del Bajío desplazando a la Ignimbrita Cuatralba. La actividad de la falla del Bajío como semigraben continuó hasta el Mioceno pero con poco desplazamiento en el extremo noroeste de la Sierra de Guanajuato, mientras que en su extremo sureste tuvo hasta 500 m de desplazamiento, evidenciando un movimiento diferencial a lo largo de la falla. Desde el Eoceno estructuras con rumbos NE-SW y N-S también se han activado como fallas normales, participando activamente en la configuración del Bajío, cuyos límites principales corresponden a los semigrabenes de la falla del Bajío (con rumbo NW-SE) y del Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (con rumbo NNW-SSE). A partir del Mioceno, la deformación se ha concentrado dentro de la FVTM (Botero-Santa e. al., 2015).

La Faja Volcanica Transmexicana (FVT), es un arco volcánico que inició a principio del Mioceno; que atraviesa el centro de México desde Colima hasta Veracruz; que su orientación es E-W oblicua a la trinchera Mesoamericana, y que su origen se debe a la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa

Norteamericana (Ferrari, 2012). Está compuesta principalmente por ignimbritas silíceas emplazadas durante el Oligoceno-Mioceno, en la Mesa Central el volcanismo fue emplazado durante el Oligoceno, principalmente a manera de domos riolíticos (Alaniz-Alvarez, 2005).

Las grietas en el relleno aluvial en la ciudad de Celaya son el reflejo de una estructura sepultada, a la cual se le da el nombre de fosa de Celaya, esta puede relacionarse con la parte sepultada del notable acantilado de la falla de San Miguel de Allende. Esta estructura posiblemente haya sido rellenada por las emisiones volcánicas originadas en los volcanes Palo Huérfano, Culiacán y Cerro Grande. La edad inferida para el último desplazamiento de esta estructura (Falla el Bajío) es Cuaternaria. (Aranda-Gómez J. J. et. Al., 1989)

Geología Histórica

Hacia el occidente de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y localizándose en el margen occidental y sur de la Mesa Central, aparece una secuencia volcano-sedimentaria marina, formada por un apilamiento grueso de basalto almohadillado, derrames, y cuerpos intrusivos de diabasa, que se encuentran intercalados con capas de toba, pizarra, pedernal y radiolarita. El componente sedimentario más importante consiste principalmente en lutita, arenisca y algunas calizas. Las rocas de este conjunto litológico tienen una fuerte deformación contractiva muestran una facies metamórfica de esquistos verdes, principalmente en los componentes volcánicos (Nieto-Samaniego A. F.-Á., 2005)

Existe una discordancia encima de las rocas volcano-sedimentarias continentales del Jurásico Medio y la secuencia mariana del Jurásico Superior en la que está ausente el componente volcánico, indican claramente que la Mesa Central tuvo lugar una gran transgresión mariana con el cese de la actividad volcánica, la inmersión de la Mesa Central fue sincrónica con la migración hacia el occidente de la zona con volcanismo a lo largo del límite continental que se evidencia porque en el margen sur-poniente de la Mesa Central están las secuencias volcano-sedimentarias de edad jurásico Tardío-Cretácico temprano que descansan bajo las rocas Aptiano - Albiano (Nieto-Samaniego A. F.-Á., 2005).

El primer evento tectónico ocurrió durante el Cretácico - Paleoceno y corresponde a la fase compresiva de la Orogenia Laramide, evento que produjo la deformación de las rocas del Cretácico Inferior y generó un relieve topográfico prominente consecuencia de la yuxtaposición de las secuencias sedimentarias y volcano-sedimentarias (Nieto-Samaniego A. F., 1999).

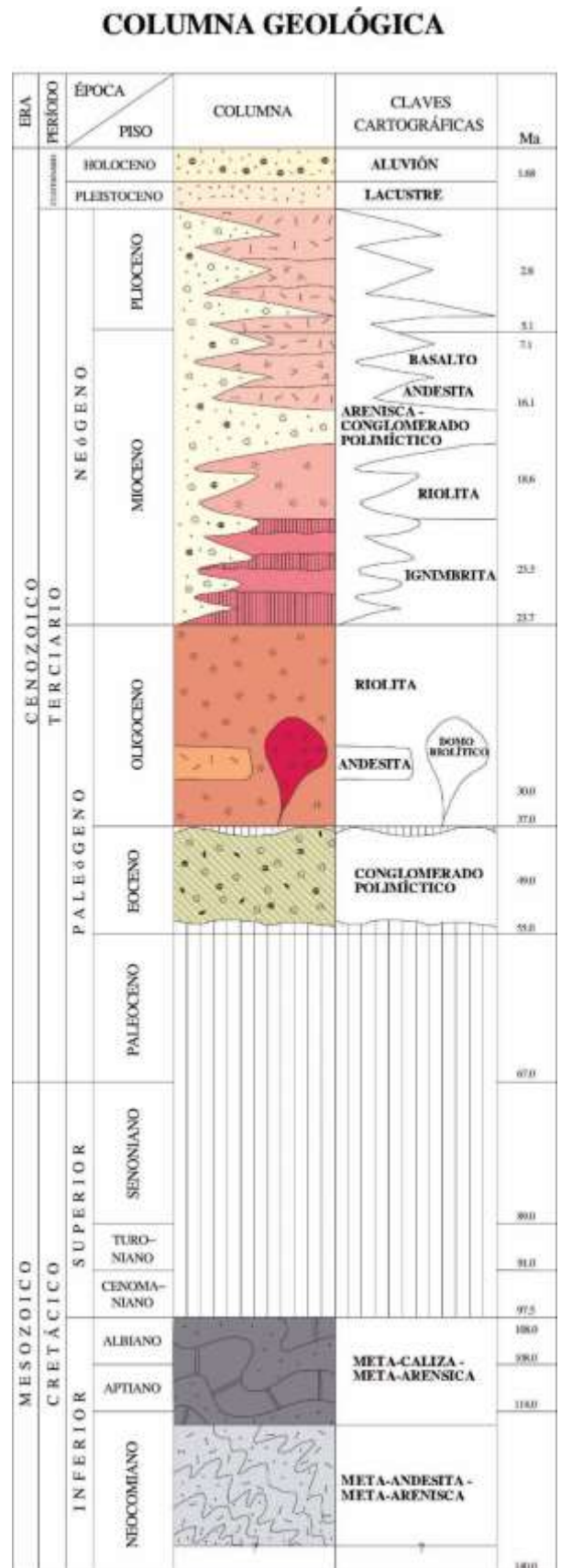
Los depósitos de materiales volcánicos y volcanoclásticos que representan la acreción de una secuencia Mesozoica de afinidad oceánica manifiestan la culminación de la Orogenia Laramide, el transporte tectónico y el engrosamiento estructural que sufrieron estos materiales depositados en un ambiente de arco insular-mar marginal, generaron un metamorfismo regional de bajo grado (Nieto-Samaniego A. F., 1999).

El segundo evento tectónico que afecto la región es el de alargamiento, el cual se manifiesta como fallamiento de tipo normal. Éste evento fue sincrónico con la intensa actividad volcánica, predominantemente explosiva, asociada a la génesis de la Sierra Madre Occidental (SMO). El apilamiento de rocas de composición ácida tuvo lugar durante el Oligoceno y Mioceno temprano, mientras que durante el Mioceno medio y Plioceno se emplazaron rocas volcánicas básicas. El fallamiento más intenso ocurrió durante el Oligoceno y las fallas generadas durante esa fase fueron reactivadas durante el Mioceno (Nieto-Samaniego A. F., 1999).

Geología del Subsuelo

La roca más antigua en el área de estudio corresponde a las rocas metamórficas en facies de esquisto verde del Cretácico inferior. Sobre esas rocas metamórficas existen calizas arcillosas y lutitas de la Formación Soyatal. Las rocas sedimentarias del cretácico fueron cubiertas por sedimentos continentales del paleoceno-Eoceno, estas rocas afloran en localidades aisladas en el centro, sur y este de la Mesa central, consisten principalmente de conglomerado polimíctico y arenisca, que presentan también, aunque no en todos los afloramientos rocas volcánicas máficas y en

Figura 2 Columna geológica modificada de la Carta Geológica-Minera F14-C64



algunos lugares contiene material piroclástico félsico. Encima de los sedimentos continentales del Paleoceno-Eoceno aparecen discordancias locales de carácter litológico y en ocasiones angular que yacen bajo el conjunto de rocas oligocénicas corresponde a depósitos de actividad volcánica explosiva, estas tratan de una cubierta de ignimbritas y otras rocas piroclásticas de composición riolítica que aparecen cubriendo a los domos y derrames riolíticos (Nieto-Samaniego A. F.-Á., 2005).

Yaciendo discordantemente sobre el continuo volcánico oligocénico o intercaladas con los sedimentos que rellenan la cuenca, aparecen rocas volcánicas máficas miocénicas. En la región SE de la Sierra de Guanajuato y en la sierra de Codornices, reportaron una ignimbrita de ~25 Ma que es la unidad más joven de esta secuencia piroclástica. Esas edades han sido corroboradas para afloramientos de esa unidad hasta las cercanías de Celaya, Gto. (Nieto-Samaniego A. F.-Á., 2005). Las ignimbritas fueron cubiertas por depósitos continentales (areniscas y conglomerados) con un espesor aproximado de 300 m. La última actividad volcánica fueron basaltos que ocurrieron durante el Cuaternario. Finalmente, los depósitos arcillosos Cuaternarios cubren el Valle. (Carranco-Lozada, 2013). Los espesores de los basaltos y depósitos arcillosos del cuaternario tienen espesores que van de los 70 m hasta los 200 m aproximadamente.

Geología Estructural-Tectónica

El patrón estructural y de lineamientos que se observa en la región de estudio está constituido por fallas reactivadas que han sido asociadas a dos sistemas regionales: El sistema de fallas N-S Taxco-San Miguel de Allende y el sistema NE-SW del Bajío. Uno de los límites corticales se ubica en la región entre Celaya y el volcán El Zamorano, el cual está constituido por las fallas Ixtla y la Joya (Alaniz-Álvarez, 2001), las cuales tienen un rumbo general N25°W y cruza el cinturón volcánico transmexicano y es una discontinuidad mayor de la corteza (Aranda-Gómez J. L. et. al., 2013), (Aranda-Gomez, J.J et. al.).

La falla San Miguel de Allende se divide en tres segmentos, el segmento meridional está sepultado por productos del Volcán Palo Huérfano y por sedimentos continentales, se infiere que llega hasta la ciudad de Celaya por el curso del Río Laja y fue documentada en el subsuelo por pozos y persiste el rasgo hipsográfico hasta la latitud de Salvatierra, Gto. (Alaniz-Álvarez, 2001). El sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende constituye el límite entre la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental; también este grupo de fallas coincide con el límite paleogeográfico entre la Plataforma Valles-San Luis Potosí y la Cuenca mesozoica del Cenro de México (Nieto-Samaniego A. F. et al., 2005).

La falla del Bajío es el límite sur de la Mesa Central y es una falla normal que muestra dos segmentos mayores, el más oriental se extiende desde Celaya

hasta Irapuato en el Estado de Guanajuato donde la falla tienen dirección E-W (Nieto-Samaniego A. F.-Á., 2005). Esta falla tuvo lugar su actividad mayor durante el Oligoceno y desde entonces ha tenido fases sucesivas de reactivación que abarcan por lo menos hasta el Mioceno tardío; las rocas volcánicas y aparatos volcánicos de esa edad afloran en la región de Salamanca-Celaya y no se observan cortado por fallas (Nieto-Samaniego A. et.al., 2005)

El grupo de fallas observado en la superficie de la ciudad de Celaya es el reflejo de una estructura sepultada conocida como la fosa de Celaya, la cual puede relacionarse con la parte sepultada del acantilado de la falla de San Miguel de Allende. (Aranda-Gómez J. J., et.al., 1989)

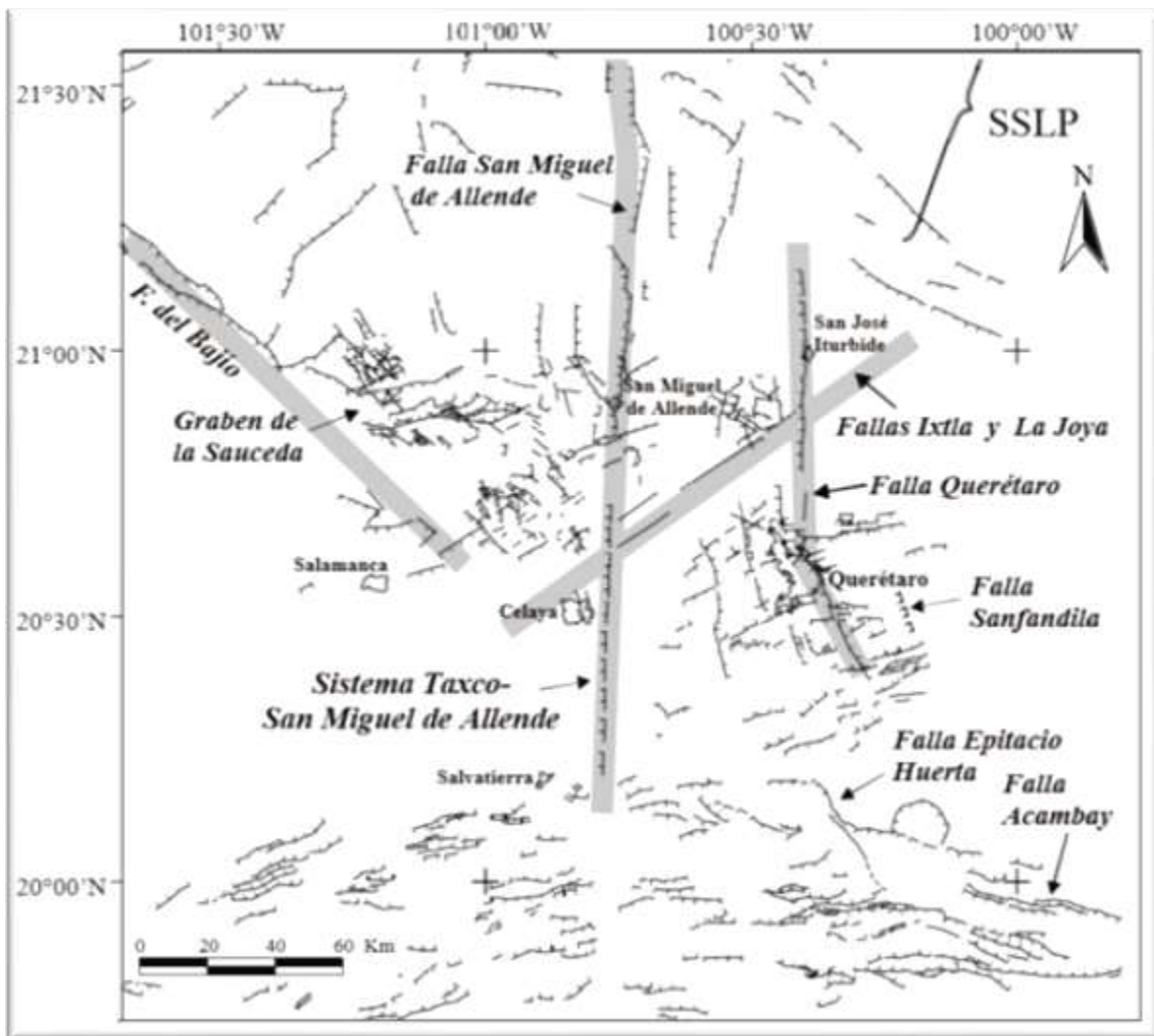


Figura 3 Mapa estructural de la parte sur de la Mesa Central modificado de Alaniz-Álvarez et al., 2001.

Hidrogeología

Marco conceptual de funcionamiento hidrogeológico (Modelo Hidrogeológico)

El Acuífero del Valle de Celaya se localiza dentro del Graven de Celaya, este a su vez está formado por fosas escalonadas sepultadas por la acumulación de sedimentos y por material volcanosedimentario con intercalaciones de derrames basálticos y tobas intermedias-ácidas con un espesor mayor a 700m. (GEOPSA S.A. de C.V., 2005) El acuífero recibe recarga en las elevaciones del volcán La Gavia, Culiacán, de la Sierra de Codornices norte, el río La Laja y por la infiltración de aguas superficiales que es de 2.76 Mm³/año (IGC S.A. de C.V., 1999).

La recarga media anual es de 286.6 millones de metros cúbicos al año, el volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos es de 593 millones de metros cúbicos anuales, el volumen concesionado de agua subterránea es de 398.362148 por lo cual se tiene un déficit de -111.762148 millones de metros cúbicos según datos de la “Actualización de la Disponibilidad media anual de agua subterránea y modificación, para su mejor precisión, la descripción geográfica del acuífero” publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto de 2009.

En el área de Celaya se sabía de la existencia de dos acuíferos, uno inferior termal con temperatura del orden de los 40°C formado por depósitos volcánicos tobáceos tipo riolítico y un acuífero superior frío formado por un paquete de sedimentos lacustres estratificados y por derrames de rocas volcánicas basálticas. En la mayor parte del área, ambos acuíferos actuaban conjuntamente por carecer de un confinante que los separe (Cuellar-Franco, 2010), por lo tanto estuvieron conectados hidráulicamente cuyos niveles de saturación eran someros, estas eran las condiciones iniciales del sistema, sin embargo con la intensa sobre explotación que ha estado realizando en estos y la escasa recarga, se ha observado que las aportaciones del acuífero superior prácticamente ya no existen, no aporta volúmenes importantes, mientras que las grandes cantidades de agua se extraen del denominado acuífero profundo.

Basado en las secciones geológicas realizadas en el presente trabajo con los cortes litológicos y registros eléctricos proporcionados por JUMAPA, se observa que el acuífero está conformado por una capa superior de arcillas poco arenosas cuyo espesor es variable y en algunos puntos está intercalada con basaltos y tobas ácidas poco consolidadas, todos estos materiales generaron una intercalación e interdigitación de depósitos granulares y finos.

En la parte norte de la Ciudad de Celaya la potencia de los sedimentos es de aproximadamente 100 metros hacia la parte oeste siendo constante hasta el punto en que las litologías son cortadas por las fallas que cruzan la ciudad; del

lado derecho de las fallas los sedimentos llegan a tener una potencia hasta de casi 200 metros, en la parte noroeste se tienen registradas potencias de 90 metros que aumentan hacia el suroeste hasta llegar alrededor de 150 metros. El comportamiento es de un cuerpo de baja permeabilidad, los estratos superiores de este paquete son sedimentos clásticos no consolidados. Los depósitos lacustres y depósitos vulcano sedimentarios son de baja permeabilidad, los materiales piroclásticos y los basaltos se encuentran intercalados, estos últimos por su rápido enfriamiento y fracturamiento son buenos receptores y conductores de agua, más aún cuando presentan fallamiento, estos datos se pueden corroborar con los datos del corte litológico y con los datos obtenidos del registro eléctrico de pozo “Oriente” mostrado en la Tabla 1.



Figura 4 Socavón ubicado en la parte sureste de la ciudad de Celaya en donde se muestra la estratificación de los depósitos sedimentarios y vulcano-sedimentarios recientes. En el recuadro se aprecia una de las fallas, así como la fábrica de la Honda en segundo plano.

En la parte oeste de la ciudad se tiene una potencia de 120 metros que decrece hacia el centro de la ciudad hasta llegar alrededor de los 65 metros en la zona cercana a la falla; del lado derecho de las fallas se encuentra una potencia de 230 metros aproximadamente. Debajo de estos sedimentos se encuentran intercalaciones de basaltos fracturados, sanos y algunos alterados, con depósitos de materiales vulcano sedimentarios, con tamaño de arcillas y limos con poca arena y tobas ácidas en donde predominan los basaltos; sin embargo no se sabe la potencia de estos debido a que los estudios previos del subsuelo de la zona no llegan a tales profundidades. Los depósitos sedimentarios y vulcano-sedimentarios de cuaternario y terciario superior no son afectados por las fallas por ser posteriores a la formación de estas.

Tabla 1 Corte litológico con base en registros eléctricos del Pozo Oriente.

De-a [m]	Litología
0-218	Arcillas muy poco arenosas (material impermeable)
218-256	Alternancias de basaltos fracturados (andesíticos) con depósitos piroclásticos: cenizas (material permeable con entradas de agua al pozo).
256-283	Depósitos arcillosos: toba ácida: dacita (material permeable; a los 250m se registra un incremento drástico en la curva de temperatura probablemente debido a la entrada de agua termal al pozo).
283-290	Basalto mayormente compacto (material muy poco permeable con entradas de agua).
290-318	Depósitos arcillosos- toba ácida: dacita (material impermeable).
318-332	Depósitos piroclásticos: ceniza (material permeable con entradas de agua al pozo).
332-335	Basaltos fracturados (material permeable con entradas de agua al pozo).
335-340	Tobas arcillas intermedias (material impermeable).
340-352	Basaltos compactos (material muy poco permeable con entradas de agua al pozo).
352-365	Tobas arcillas intermedias con escorias (material impermeable).
365-382	Material pétreo (brecha) fracturado (material poco permeable con entradas de agua al pozo).
382-400	Tobas ácidas muy arcillosas (material impermeable).

Entre los efectos del sistema tectónico de fallas N-S Taxco-San Miguel de Allende y el sistema NE-SW del Bajío, se manifiesta a profundidad y localmente, la elevación de la temperatura del agua subterránea varía entre 19 y 32° C en la mayor parte del Valle pero es posible encontrar algunas captaciones con una temperatura de 48.2° C en el pozo Los Olivos o de 48.3°C en el pozo Santa Rita 2.

En la zona centro-occidental de la Ciudad de Celaya se puede inferir la existencia de un levantador piezométricos que reflejan las cargas basándose en los datos de los niveles estáticos de la ciudad de Celaya referentes a años recientes, esto se puede observar claramente en la Figura 5.

Sin embargo analizando los caudales, los cortes litológicos de los pozos cercanos a la zona entre otros datos del pozo Quinta Arboledas, se determinó que el nivel estático más somero en la zona es debido a que ese pozo cuando se perforó era para uso agrícola, el radio del ademe es aproximadamente 6 pulgadas y el pozo abastece de agua potable a un pequeño fraccionamiento con el mismo nombre; uno de los motivos por los cuales el caudal es bajo (4.2 L/s para 2015) es el tiempo de bombeo (de 6:00 a 17:45 hrs). Basado en los cortes litológicos de la zona se observa que a la profundidad a la cual se encuentra el nivel estático en esa zona, corresponde a una litología conformada por arcillas plásticas que tienen

una conductividad hidráulica y permeabilidad baja.

Los datos de la Tabla 1 se corroboraron con las muestras de canal obtenidas a momento de realizar la perforación del pozo. Con la información obtenida del corte litológico, la de las muestras de canal y la obtenida de los registros eléctricos se determinaron cuáles son los horizontes productores.

La ciudad de Celaya se encuentra afectada por fallas generadas por la sobre explotación del acuífero, para el año de 1985 sólo se tenía conocimiento de tres fallas, la falla Oriente, Poniente y falla Las Insurgentes (Trujillo-Candelaria, 1985).

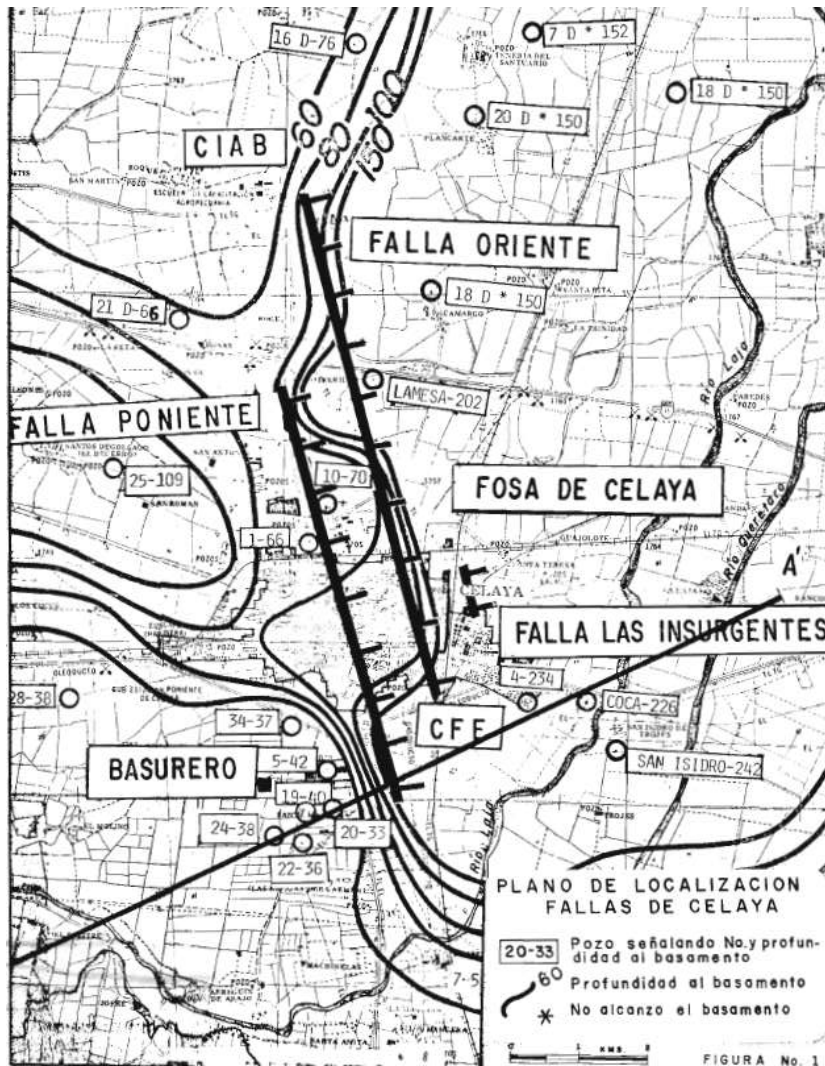


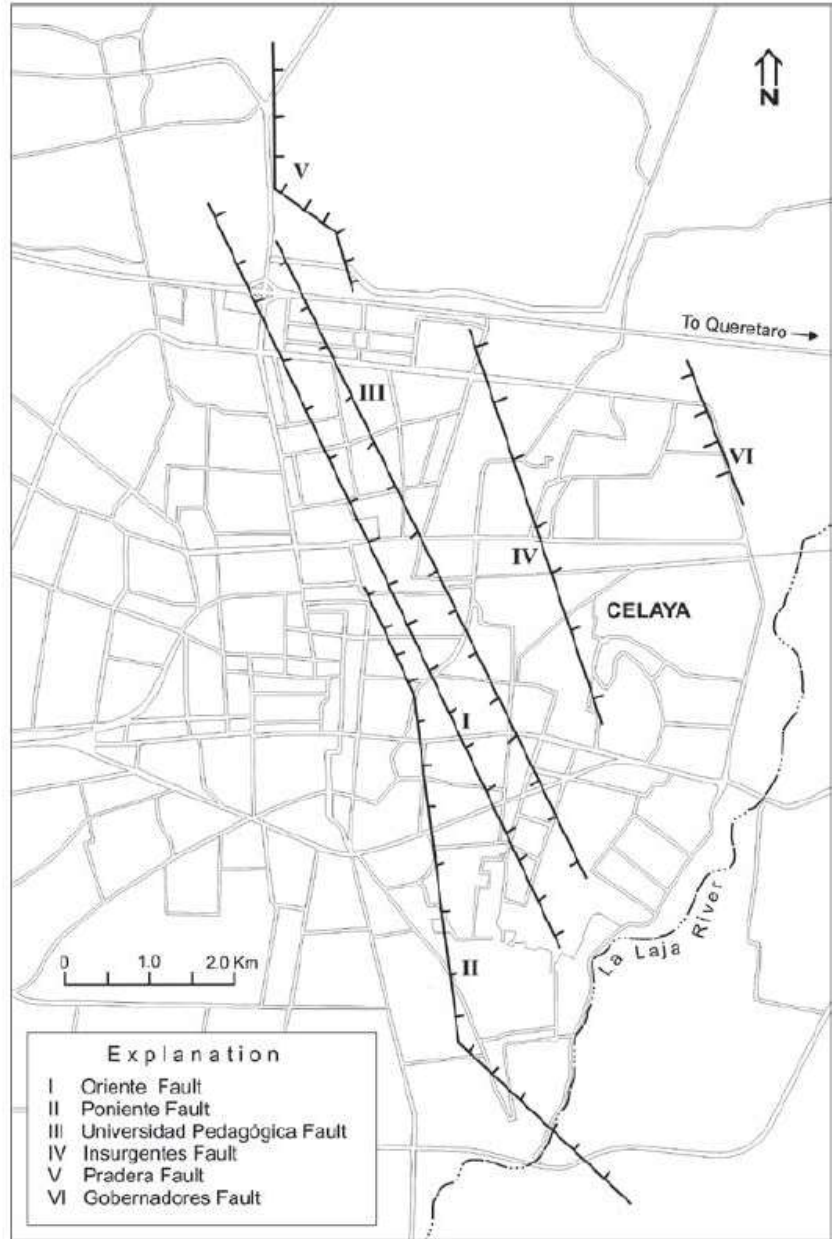
Figura 5 Plano de localización de las fallas de Celaya (Trujillo-Candelaria, 1985)

La sobre explotación del acuífero generó que se observaran 6 fallas Figura 6, las cuales son: 1.-Falla oriente, 2.- Falla Poniente, 3.-Falla en la 4.-Universidad Pedagógica, 5.-Falla Insurgentes 6.-Falla Gobernadores (Huizar-Álvarez, 2011).

Figura 6 Localización de las seis fallas en la ciudad de Celaya (Huizar-Álvarez, 2011)

Con la intensa extracción del agua que ha sufrido el acuífero se han empezado a notar nuevas fallas en superficie, que no habían sido reportadas en lugares como el fraccionamiento Praderas de la Hacienda ubicado en la zona norte de Celaya y en la colonia Los Insurgentes en el lado este de la ciudad.

Para la actualización de las fallas se trasladaron los datos de las fallas proporcionados por JUMAPA de un software de dibujo a un sistema de información geográfica, los datos tomados en campo se introdujeron en el mismo para complementar los ya existentes, el resultado de esto se muestra en la Figura 7 Se muestra la actualización de las fallas observables en superficie elaborado por el equipo de trabajo de JUMAPA complementado en con el presente trabajo..



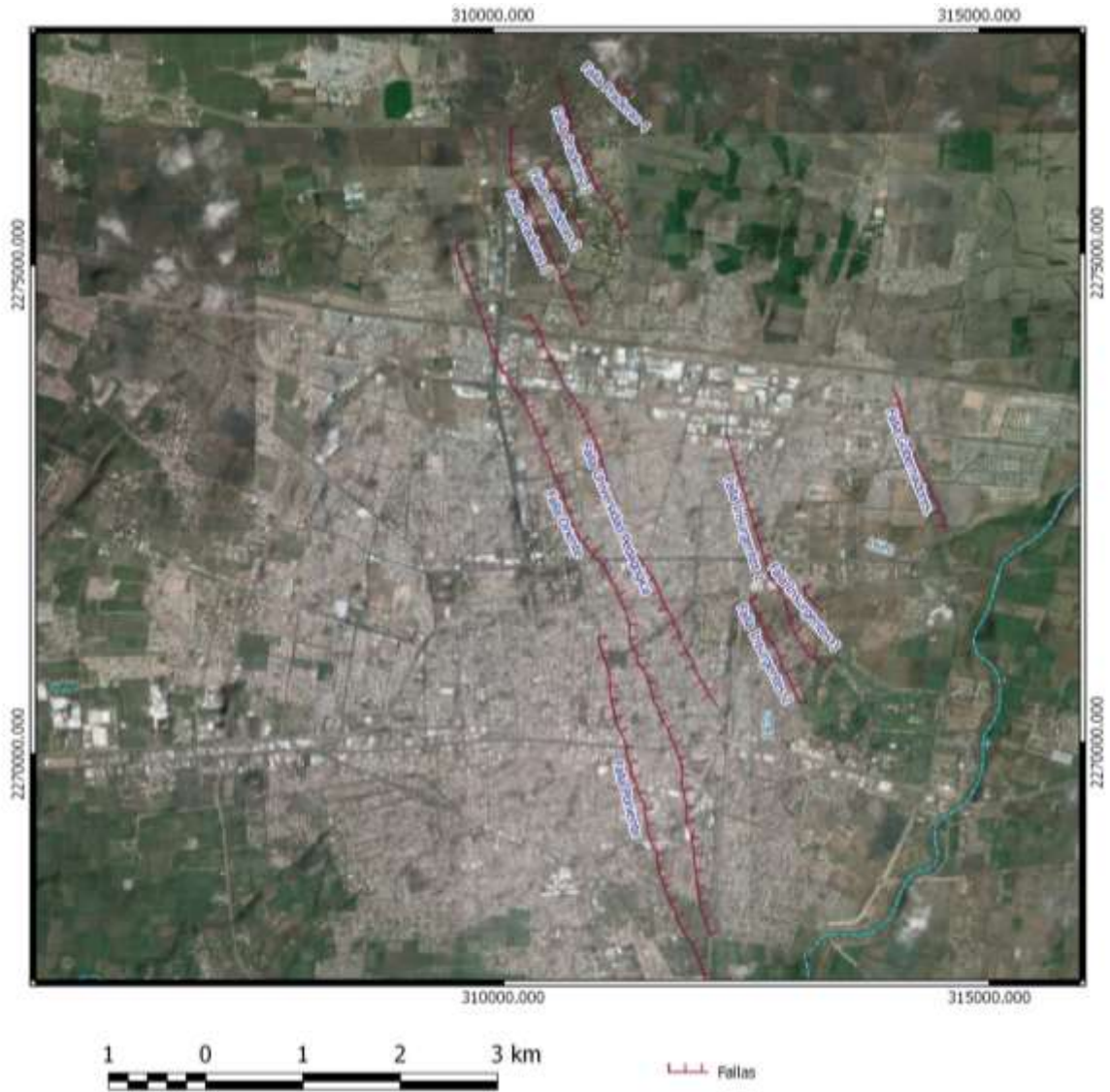


Figura 7 Se muestra la actualización de las fallas observables en superficie elaborado por el equipo de trabajo de JUMAPA complementado en con el presente trabajo.

Se puede observar que para el año de 1966 el nivel estático más profundo estaba en la zona oeste de la ciudad de Celaya, en zonas donde era más requerida la extracción de agua para el riego de cultivos. El flujo de agua en acuífero dentro de la zona de estudio iba del noreste al este (Figura 8) en dirección hacia Vigrarán.

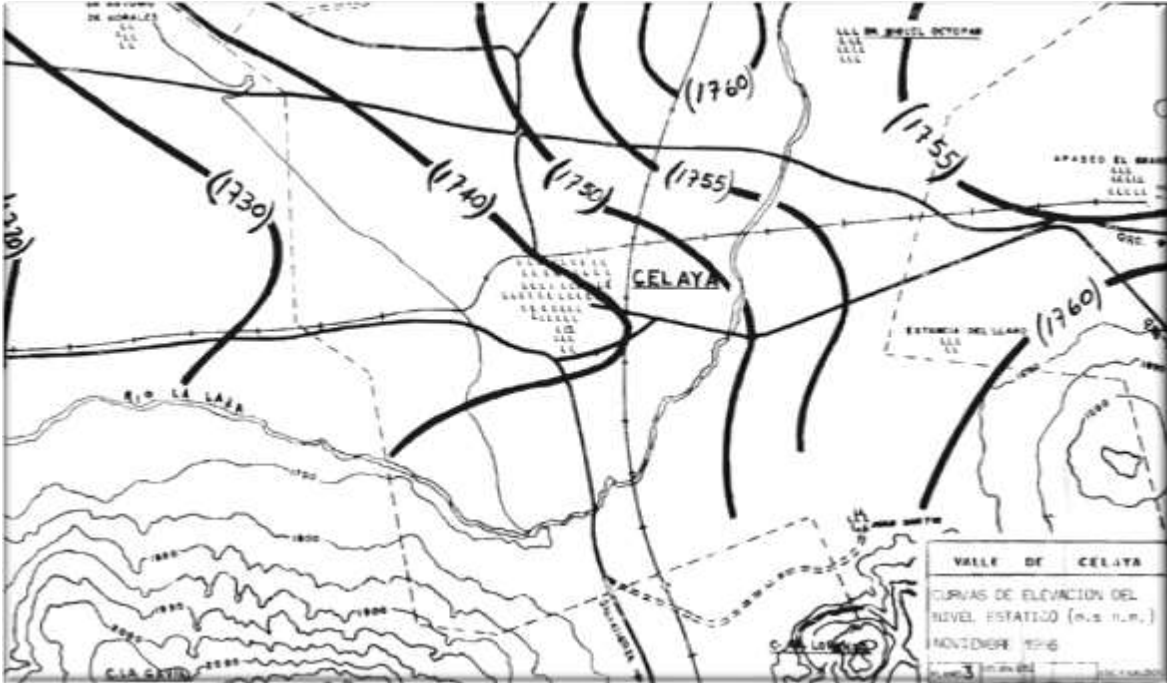


Figura 8 Superficies de variación equipotencial en la ciudad de Celaya para el año de 1966. Modificado de Trujillo-Candelaria, 1985

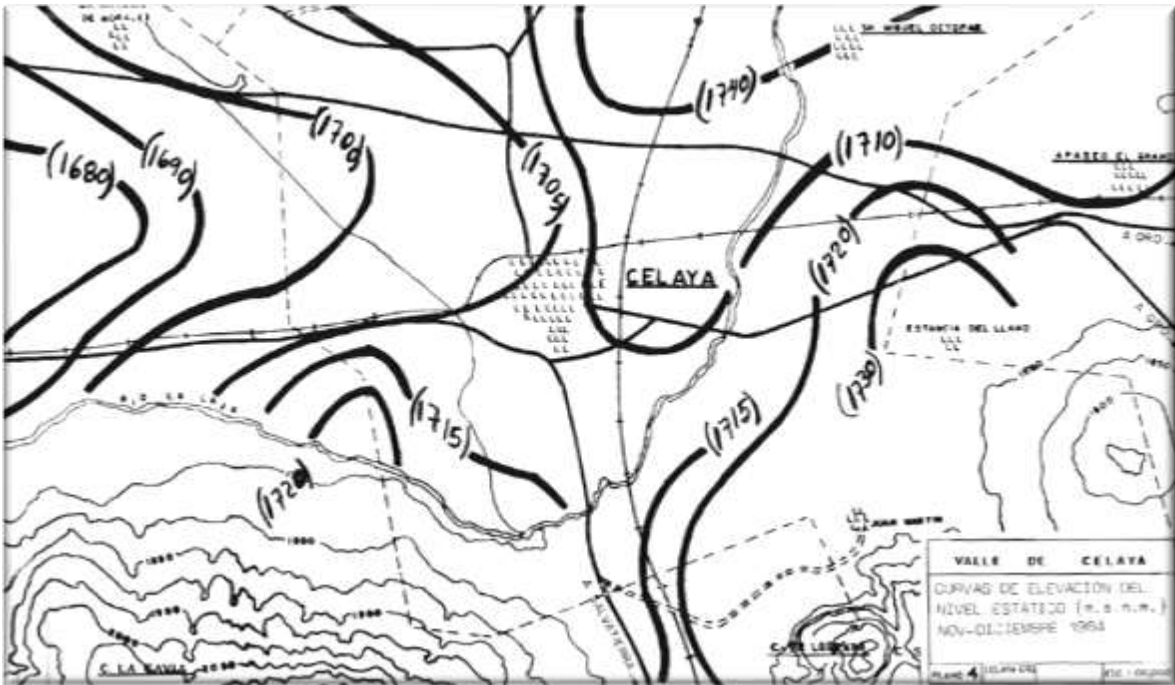


Figura 9 Superficies de variación equipotencial en la ciudad de Celaya para el año de 1966. Modificado de Trujillo-Candelaria, 1984.

Conforme fue aumentando la población en la ciudad, el comportamiento del flujo del acuífero se fue modificando, se empezó a notar una deformación en la red piezométrica generada por la continua extracción de agua en la ciudad de Celaya para el año de 1984, el nivel estático en Celaya variaba entre los 1705 y 1715 msnm Figura 9, el flujo del acuífero tenía el mismo rumbo.

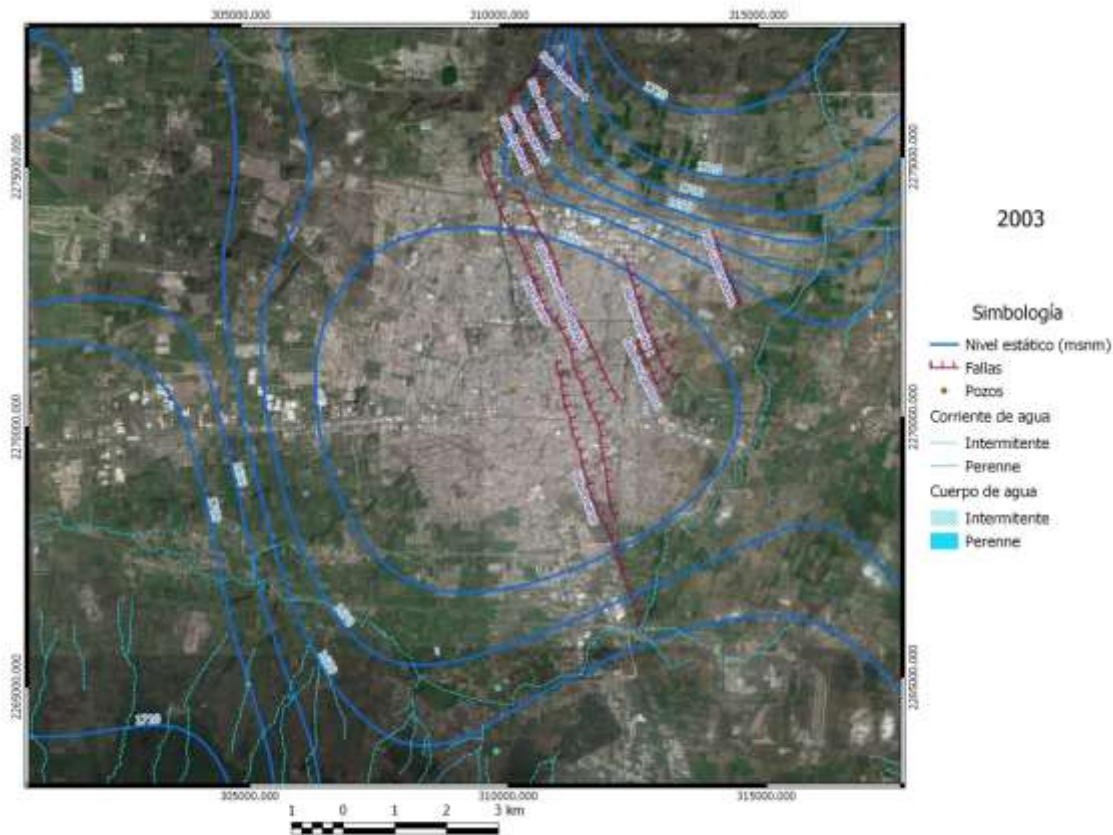


Figura 10 Superficies de variación equipotencial en la ciudad de Celaya para el 2003. Datos proporcionados por CONAGUA.

Para el año 2003 la dirección del flujo del acuífero se modificó radicalmente, esto es debido a que la cantidad de agua extraída en la ciudad sobrepasa la extraída en las zonas de cultivo (Figura 10), mientras que en el 2015 el nivel estático descendió aun más pero no uniformemente por la cantidad tan variable de m³ de agua potable que se extraen en los pozos, la cual depende de la demanda de agua potable de cada zona (Figura 11).

Actualmente CONAGUA tiene censado 1373 pozos, de los cuales 919 están activos, inactivos 391 y en trámite 62; JUMAPA tiene bajo su control 117 pozos, inactivos tiene 28 y activos 85, el pozo con mayor abatimiento según datos de Conagua es de 49 m en el pozo Residencial Tecnológico y de un metro en los pozos La Estación y Emeteria Valencia.

Para la elaboración de los mapas del nivel dinámico se utilizaron datos de 50 pozos del año 2011 al 2015 mostrados en la Tabla 2. En el año 2015 se extrajo un promedio por mes 2797412 m³ de agua potable del acuífero y dando un total de 33568938 m³ en el año.

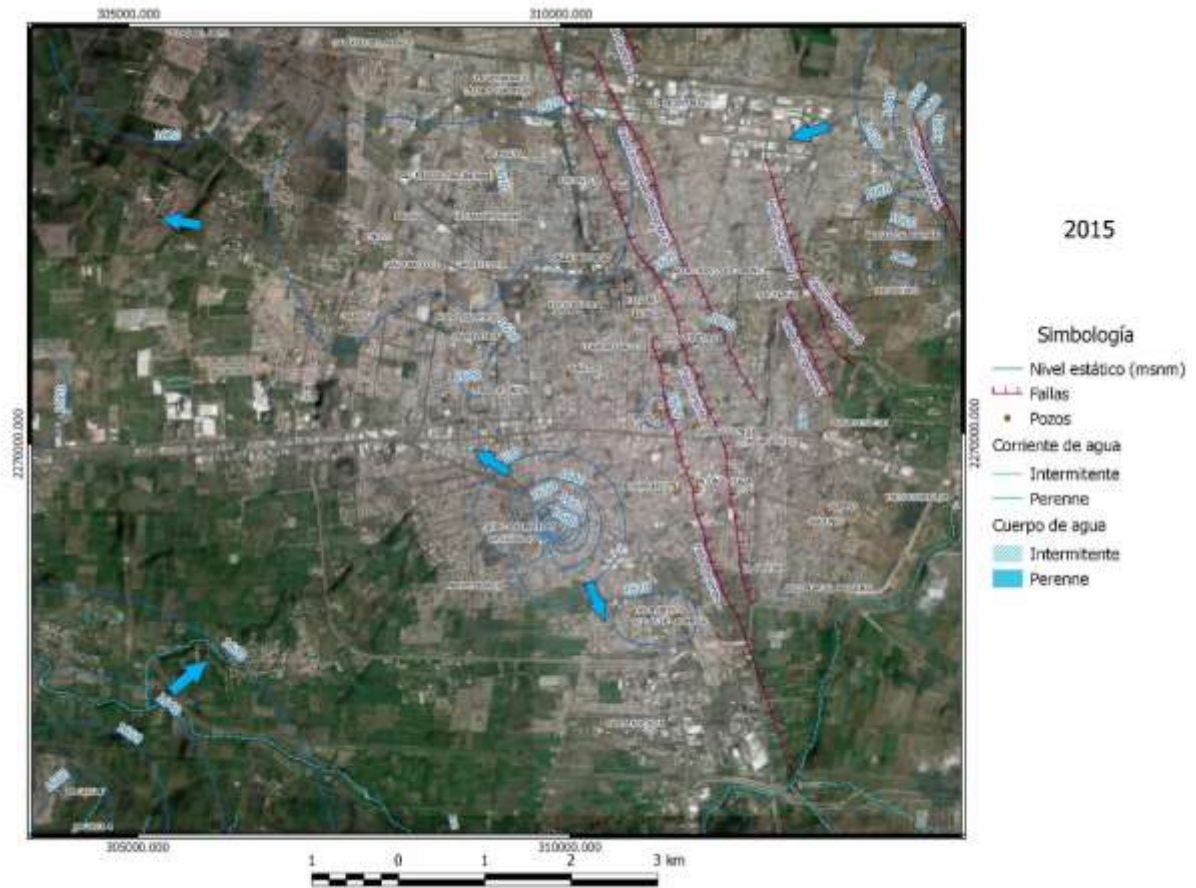


Figura 11 Superficies de variación equipotencial en la ciudad de Celaya del 2015. Datos proporcionados por JUMAPA y configurados para este estudio.

Tabla 2 En esta tabla se encuentran los datos de los niveles estáticos medidos por JUMAPA

NOMBRE DE POZO	NE 11	NE 12	NE 13	NE 14	NE 15
ÁLAMOS 1	1630.5	1623.9	1624.5	1625.5	1619.4
ALFREDO VÁZQUEZ BONFIL	1634.3	1628.9	1628.3	1625.3	1619.7
ANTONIO PLAZA	1636.7	1631.7	1630.7	1631.7	1627.1
BRISAS DEL CARMEN	1618.1	1620.6	1616.6	1616.6	1608.6
CAÑITOS	1629.8	1627.8	1629.3	1628.3	1628.8
CD. INDUSTRIAL 1	1631.1	1626.7	1631.1	1638.1	1620.5
COL. MÉXICO (Sta. Barbara)	1623.9	1625.4	1616.9	1621.4	1607.4
COLONIA DEL BOSQUE 2	1630.9	1634.6	1626.1	1630.6	1630.6
EL CAMPANARIO	1629.3	1625.3	1625.3	1629.8	1628.8

EL CANTAR	1632.3	1629.8	1629.3	1627.8	1619.8
EL VERGEL	1625.3	1610.4	1623.3	1617.3	1616.8
ESTACIÓN	1631.5	1629.5	1630.5	1623.5	1620.8
EXELARIS	1630.8	1629.2	1629.2	1630.7	1620.4
GALAXIAS DEL PARQUE	1631.6	1639.3	1625.8	1620.3	1621.3
INDEPENDENCIA	1626.4	1631.1	1627.4	1628.4	1624.8
INSURGENTES 1	1633.7	1633.4	1634.9	1635.4	1619.7
INSURGENTES 3	1633.4	1627.6	1629.9	1629.4	1629.4
JARDINES	1631.4	1641.4	1626.4	1631.4	1620.1
LA BOLA	1632.0	1628.0	1631.0	1628.0	1618.1
LA EJIDAL 1A	1629.4	1624.9	1626.9	1623.4	1619.7
LA GAVIA 4	1666.9	1665.6	1664.9	1664.9	1664.9
LA GAVIA 7	1667.3	1664.6	1663.3	1660.3	1661.3
LA HERRADURA	1683.3	1679.7	1682.3	1634.3	1675.2
LA MISIÓN	1632.1	1624.2	1626.1	1620.1	1615.6
LAS FLORES 2	1630.6	1621.4	1620.4	1628.4	1616.7
LATINOAMERICANA	1627.8	1627.8	1626.8	1627.8	1617.0
LAURELES 1A	1628.9	1637.3	1635.8	1635.8	1619.0
LAURELES 2 A	1630.0	1624.2	1631.2	1628.2	1615.9
LÁZARO CÁRDENAS	1631.4	1626.9	1633.7	1634.7	1620.7
LEANDRO Valle 1	1631.1	1629.1	1628.6	1628.6	1620.3
LINDAVISTA	1629.5	1619.5	1630.5	1621.5	1615.8
LOS OLIVOS	1631.9	1627.9	1627.5	1627.5	1621.5
LOS VEINTES 1A	1631.4	1629.4	1629.4	1630.9	1619.7
MONTE BLANCO	1626.2	1626.9	1628.2	1616.2	1620.6
NAT-THA-HI	1631.4	1627.1	1627.9	1627.9	1620.0
NUEVO CELAYA	1630.4	1643.3	1627.3	1627.3	1620.8
OLIMPIA	1633.1	1629.6	1626.1	1630.6	1621.7
PINOS 1	1625.9	1625.4	1619.9	1626.9	1617.5
PINOS 2	1627.4	1626.9	1622.9	1627.4	1616.9
QUINTA ARBOLEDAS	1699.5	1705.3	1696.3	1706.3	1695.7
RESURRECCIÓN	1634.8	1629.8	1629.8	1632.8	1622.0
SAN AGUSTÍN 1A	1633.5	1627.1	1627.6	1627.6	1621.1
SAN JOSÉ DE TORRES	1635.0	1627.8	1627.0	1627.0	1622.6
SAN JUANICO 2	1629.0	1628.5	1628.5	1627.5	1619.5
TRESGUERRAS 1A	1633.9	1633.9	1627.6	1627.6	1626.9
VALLE HERMOSO	1630.9	1630.9	1630.9	1630.9	1616.0
VILLAS DEL BAJÍO	1625.6	1621.4	1622.1	1622.1	1615.8
VILLAS DEL ROMERAL	1629.7	1623.9	1619.4	1629.9	1617.0
XOCHIPILLI 1A	1630.4	1629.5	1631.5	1631.5	1629.5
ZONA DE ORO 1	1628.6	1626.1	1626.1	1629.6	1619.6

Si el abatimiento del acuífero fuera constante, en los hidrógrafos del “Anexo 5” se observaría una línea sin puntos de inflexión en la cual aumentaría la profundidad conforme pasan los años, sin embargo, la cantidad de metros cúbicos extraídos de cada pozo es variable, esto es debido al tiempo de bombeo, el caudal, las características constructivas de cada pozo, entre otras, pero la característica en común es el descenso del nivel estático.

Calidad del Agua Subterránea (Hidrogeoquímica)

Caracterización hidrogeoquímica

En Celaya y sus regiones circundantes se detectó la existencia de diez grupos de aguas subterránea de acuerdo a la abundancia relativa de los iones y se obtuvo un promedio de los iones mayores para cada tipo expresada en meq/L; se observó que el bicarbonato (HCO_3) es ion predominante en todos los tipos de agua (IPOTARSA, 2005) como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3 Concentración promedio de los iones mayores para cada tipo de agua (Comisión estatal del agua de Guanajuato, 2005).

No.	Tipo de agua	Pozos	Total iones (meq/L)	Concentración de los mayores iones (meq/L)						
				Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃
I	Na-Ca-HCO ₃	12	16.26	4.28	0.33	0.79	2.64	0.70	1.00	6.51
II	Ca-Na-HCO ₃	10	12.14	2.14	0.30	0.82	2.86	0.35	0.57	5.10
III	Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄	5	18.56	4.59	0.37	1.16	3.34	0.63	2.92	5.55
IV	Na-HCO ₃	4	18.81	7.74	0.26	0.12	0.77	1.26	0.69	7.96
V	Ca-Na-Mg-HCO ₃	3	22.22	3.32	0.33	2.29	6.05	1.39	1.52	7.33
VI	Ca-Mg-HCO ₃	2	20.01	1.75	0.10	2.15	7.25	0.69	0.96	7.12
VII	Na-Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	1	12.69	2.12	0.37	1.52	2.78	0.24	1.42	4.25
VIII	Ca-Mg-Na-HCO ₃	1	22.22	2.46	0.16	3.05	6.11	0.38	0.82	9.26
IX	Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄	1	15.08	2.98	0.38	1.28	3.29	0.41	2.13	4.61
X	Ca-Na-HCO ₃ -Cl	1	15.02	2.23	0.56	1.17	3.57	2.43	1.03	4.01
Total		40								

El tipo de agua V y IX son representativos de la mezcla de agua derivada de rocas carbonatadas-evaporíticas metamorfoseadas y de rocas ignimbríticas y riolíticas. El tipo de agua I y IV es representativo de la interacción del agua del acuífero con rocas volcánicas y que fluye a través de arcillas y material sedimentario, estos dos tipos de agua interactúan con fluidos hidrotermales (Morales-Arredondo I. M., 2016).

El tipo de agua I y II son similares, la diferencia radica en que el tipo I presenta mayores cantidades de sodio que el tipo II y el tipo II presenta mayores concentraciones de calcio que el tipo I, los pozos que representan estos grupos fueron perforados en ignimbritas, tobas riolíticas y brechas o matrices vítreas; esos tipos de agua son producidos por la mezcla de agua rica en calcio y agua alojada en material volcánico (Morales-Arredondo J. V.-E., 2015); en otras palabras el tipo de agua I y II es representativo de la mezcla de agua que interactúa con ignimbritas, tobas riolíticas y rocas basálticas (Morales-Arredondo I. , 2016).

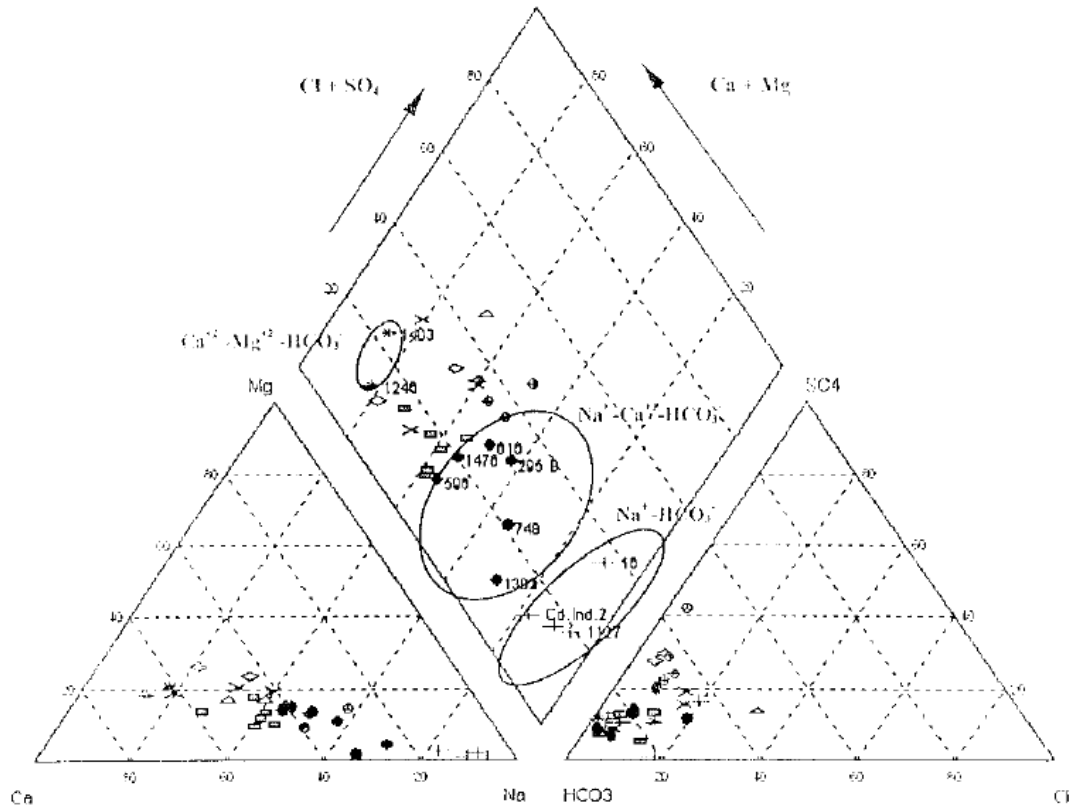


Figura 12 Diagrama de Piper (%) (IPOTARSA, 2005)

En la Figura 12 se observa que el tipo de agua más rica en calcio es un tipo de agua bicarbonatada cálcica típica de aguas frescas someras, puede ser generada por una recarga joven en un acuífero carbonatado, mientras que las que más sodio tienen son aguas bicarbonatadas sódicas y son típicas aguas profundas influenciadas por intercambio iónico.

El ion fosfato es el más importante en la movilización del Arsénico porque es usado en los fertilizantes, aumenta potencialmente la concentración de Arsénico en aguas someras. Después del fosfato, los iones que movilizan el arsénico con mayor importancia y/o facilidad son el CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- (Mukherjee, 2009). Cuando la temperatura aumenta, la disolución de minerales que contienen arsénico y fluoruros aumenta con ella (Morales-Arredondo I. M., 2016).

La disolución de minerales carbonatados como la calcita, dolomita y siderita generan un decremento en el pH, los cuales pueden movilizar el arsénico e introducirlo en las láti ces de los carbonatos, el arsénico también puede ser movilizado por el extenso tiempo de residencia, evaporación y/o intemperismo, cualquiera de los cuales pueden producir tanto los aumentos del pH y de las concentraciones de arsénico disuelto (Mukherjee, 2009)

Muchos estudios muestran que la disolución de la fluorita y de la pirita incrementa la cantidad de fluoruros y de Arsénico en el agua subterránea respectivamente. El hierro es producido por la disolución de la pirita que precipitó a hematita en un sistema geotermal, pero en la zona de estudio no hay presencia de fluorita y las cantidades de pirita no son suficientes para generar la cantidad de arsénico registrada en el agua.

Los silicatos, feldespatos sódicos, micas y vidrios son importantes constituyentes de las riolitas y de las ignimbritas. Las riolitas tienen significantes concentraciones de arsénico y de fluoruros que pueden ser disueltos e incorporados a las aguas subterráneas en condiciones oxidantes, la disolución de feldespatos aumenta la concentración de Na^+ , OH , HCO_3 y ácido silícico en el agua subterránea, estas reacciones contribuyen a que el pH aumente y forme arcillas como la caolinita; los procesos intemperismo son la principal fuente de F y de As en el agua subterránea (Morales-Arredondo J. V.-E., 2015)

La alteración de las riolitas por actividad hidrotermal genera desvitrificación, silicificación y alteración de la alunita-caolinita-ilita por la presencia de feldespatos potásicos y de silicatos (Morales-Arredondo I. , 2016).

La presencia de minerales arcillosos en las muestras de canal obtenidas de la perforación del “pozo Oriente” son resultado de la alteración de plagioclasas y de la desvitrificación del vidrio en las tobas riolíticas.

Desde las recargas perimetrales hacia el centro del Valle, en la dirección del flujo se detecta una atenuación de los sólidos disueltos y los mayores constituyentes presentes en el agua subterránea por procesos de precipitación (IPOTARSA, 2005); al realizarle mantenimiento al pozo San Juanico 2 se encontró un mineral que precipitó en la tubería, el cual es de dureza menor a la de una navaja y reacciona con HCl , por lo cual se deduce que pertenece a la familia de los carbonatos, lo cual es un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente.

Es notorio que las familias de agua con Na^+ y HCO_3 y con mayor concentración de ambos iones, dominan en regiones donde las concentraciones de arsénico son mayores (Ortega-Guerrero, 2009) (Morales-Arredondo I. , 2016). El tipo de agua en el que las concentraciones de arsénico y de fluoruros son más bajas es Ca-HCO_3 , lo que implica que el comportamiento geoquímico del flúor está relacionado con el proceso que libera sodio y remueve calcio (Morales-Arredondo I. , 2016), en la dirección del flujo se detectó un intercambio iónico inverso, en el que se deposita el calcio y el magnesio sobre las arcilla y enriquece el agua con sodio (IPOTARSA, 2005).

En la zona norte el agua es bicarbonatada cálcica, se encuentra una relación con la presencia de rocas carbonatadas o presencia de alteraciones con carbonato de calcio, en la parte sur la composición del agua es bicarbonatada sódica. (IGC S.A. de C.V., 1999)

Existen varios posibles orígenes del termalismo del agua en la zona de estudio que incluyen el gradiente geotérmico, procesos magmáticos, químicos, tectonismo y la radioactividad todos estos relacionados con el flujo regional.

Como la zona de estudio no presenta características peculiares de termalismo generado por procesos magmáticos como la fetidez, muy altas temperaturas y un foco de irradiación y no hay estudios que los sustenten. Las aguas calentadas por procesos químicos de largo plazo presentan una calidad que sobrepasa las normas de potabilización pero en general la calidad de agua reportada es buena; los procesos tectónicos elevan la temperatura del agua; no obstante, su efecto es de corta duración respecto a las edades geológicas por lo cual se considera un factor importante en la temperatura del agua en el subsuelo (emisiones por geiser); por otro lado, la desintegración de elementos radioactivos es un fenómeno físico que produce calor y las riolitas que integran gran parte del área de estudio contienen pequeñas cantidades de materiales radioactivos como el Uranio, Torio y Potasio. Mediante este proceso se cumplen las bases que caracterizan a los acuíferos termales del área: extensión regional de los acuíferos termales, ausencia de focos termales, agua de buena calidad, inodora y temperatura máxima de 42°C (GEOPE S.A., 1980).

En la práctica puede concluirse que el origen del termalismo es una mezcla de varios de los factores o fenómenos mencionados anteriormente.

Se escogieron 15 pozos que fueran representativos de las condiciones hidrogeoquímicas de la zona de estudio, en general el pH del agua del acuífero está cercana a la neutralidad como se puede observar en la Tabla 6 En esta tabla se muestran los pH medidos en laboratorio de 15 Pozos administrados por JUMAPA esto posiblemente es causado por la disolución de los carbonatos.

Tabla 4 En esta tabla se muestran las temperaturas medidas en campo de 15 Pozos administrados por JUMAPA

Pozo \ T °C Año	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009
10 de Abril	28	29	29	28.5	28	26.3	27
Alameda	31	28	24.2	30.5	29.9	30.9	32
Álamos 1	33	34.5	33.5	35	34.5	29.6	32
Arboledas 1	33	32	32.8	33.4	33.7	33	33.2
Compuertas del Campestre	40	41.7	40.3	39.5	41.8	31.6	39
Del Bosque	33	31	35.1	36.3	34.5	30.4	28.3
Independencia	35	35	36	36.5	36	34.3	36
Insurgentes 3	38	36.5	39.7	39.4	34.9	38.7	36
La Herradura	25	26.2	26.2	26	26.9	23.9	26.5
Los Naranjos	35	36	35.8	35.9	35.5	35.1	37
Quinta Arboledas	25	25	26.4	24.4	24	25.2	28

Residencial Tecnológico	28	27.7	28.9	28.7	29.5	29.8	30
San José de Torres	36	34	36.8	37	35.9	33.2	33.2
Zona de Oro 1	31	32	32.7	33	34	29.5	33
Zona de Oro del Bajío 1-a	36	36	35.7	35.7	35.2	35.6	37

Las altas concentraciones de radón reportadas en el municipio de Juventino Rosas sugieren que el agua del acuífero es calentada por el decaimiento de minerales de uranio encontrados en rocas volcánicas ácidas (riolíticas), esta situación es semejante a las ocurridas en otras cuencas vulcano-sedimentarias; esta hipótesis está basada en las características geológicas de la cuenca del bajo Guanajuatense (Morales-Arredondo I. , 2016)

Tabla 5 En esta tabla se muestran la conductividad eléctrica medida en laboratorio de 15 Pozos administrados por JUMAPA

Pozo \ CE por año [μ S]	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009
10 de Abril	646	655	632	520	629	679	618
Alameda	644	644	600	673.1	665	616	626
Álamos 1	567	583	580	612.6	606	529	572
Arboledas 1	579	503	579	589.8	581	538	566
Compuertas del Campestre	512	511	544	549	523	494	530
Del Bosque	605	482	542	542	566	437	471
Independencia	612	579	571	607.6	587	529	503
Insurgentes 3	504	528	530	510	517	498	468
La Herradura	919	1113	847	881.6	887	812	831
Los Naranjos	535	535	521	538	549	507	510
Quinta Arboledas	992	832	787	772	916	955	864
Residencial Tecnológico	603	608	591	474	606	585	567
San José de Torres	523	496	445	462	461	445	438
Zona de Oro 1	603	639	582	582	582	570	536
Zona de Oro del Bajío 1-a	513	506	519	426	498	491	452

Tabla 6 En esta tabla se muestran los pH medidos en laboratorio de 15 Pozos administrados por JUMAPA

Pozo \ pH por año	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009
10 de Abril	8.1	8.2	7.9	7.7	7.8	7.8	7.8
Alameda	7.4	7.7	7.8	7.8	7.8	7.4	7.7
Álamos 1	7.9	8.4	8	8.2	7.8	7.5	7.7
Arboledas 1	7.6	8	8	8.2	7.9	7.5	7.8
Compuertas del Campestre	7.9	7.8	7.4	7.8	7.1	7.6	7.6
Del Bosque	7.6	7.8	7.7	7.5	7.6	8.1	7.9

Independencia	7.5	7.8	7.8	8.2	7.8	7.5	7.7
Insurgentes 3	7.9	8	7.6	7.8	7.5	8	7.8
La Herradura	7.8	7.8	7.7	7.9	7.8	7.7	7.6
Los Naranjos	8	8	7.9	7.4	7.7	7.4	7.7
Quinta Arboledas	7.1	7.4	7.3	7.4	7.6	7.7	8.3
Residencial Tecnológico	8	8	7.6	7.5	7.3	7.5	8
San José de Torres	7.7	7.9	7.6	7.6	7.6	8	7
Zona de Oro 1	7.8	7.3	7.6	7.1	7.6	7.9	7.7
Zona de Oro del Bajío 1-a	8	7.9	7.5	7.8	7.8	7.7	7.7

La Modificación a la 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 establece que el contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 7. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

Tabla 7

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0,20
Arsénico (Nota 2)	0,025
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN-)	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl-)	250,00
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO3)	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,30
Fluoruros (como F-)	1,50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10,00
Etilbenceno	300,00
Tolueno	700,00
Xileno (tres isómeros)	500,00
Manganeso	0,15
Mercurio	0,001

Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6,5-8,5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,20
DDT (total de isómeros)	1,00
Gamma-HCH (lindano)	2,00
Hexaclorobenceno	1,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Metoxicloro	20,00
2,4 - D	30,00
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO4=)	400,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,50
Trihalometanos totales	0,20
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5,00

Nota.- Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

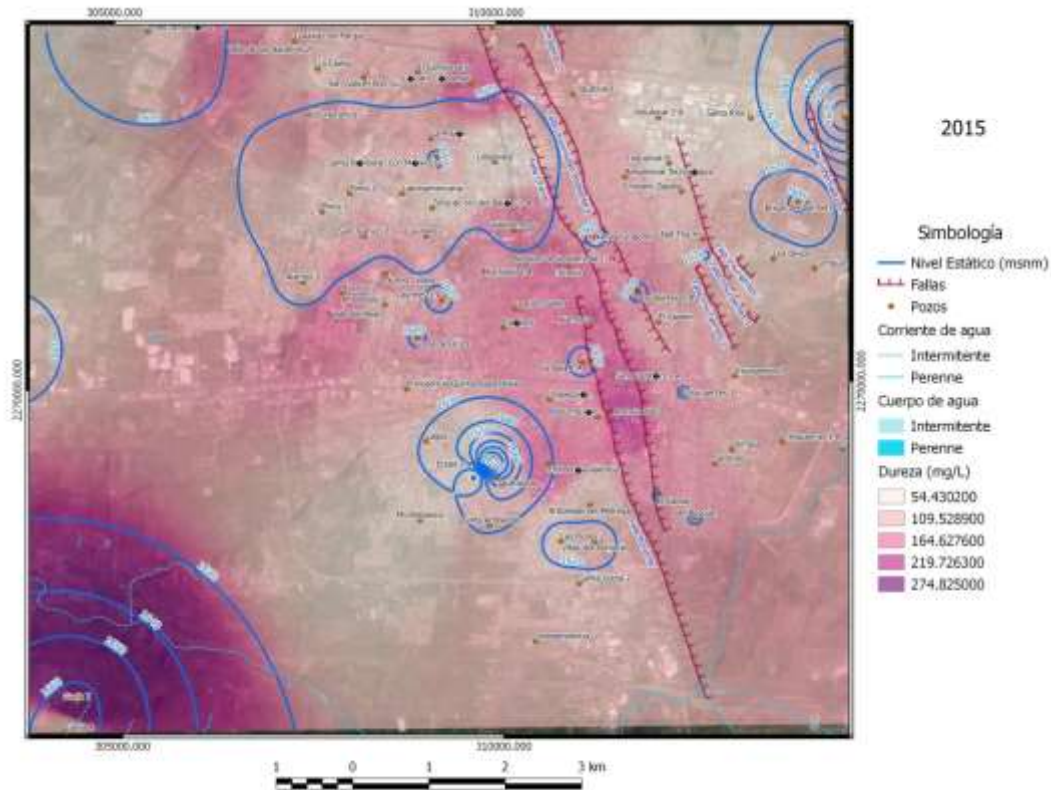


Figura 13 Zonificación de la Dureza

Los mapas con las concentraciones de arsénico, hierro, manganeso, fluoruros y cloruros fueron realizados con información proporcionada por el departamento de Calidad del Agua de JUMAPA perteneciente a 75 pozos de agua potable y de acuerdo a los límites permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, los tonos verdes y amarillos están por debajo del límite, mientras que los rojos están en el límite permisible y los morados son concentraciones que sobrepasan los límites, para la dureza y el sílice, la norma no marca límites permisibles, por lo tanto para la elaboración de los mapas se utilizaron escalas de color diferentes.

El sílice puede ser incorporado en el agua para calcular la profundidad de formación y temperatura, tiende a estudiar los yacimientos geotérmicos y a localizar sitios para perforación de pozos geotérmicos. Las concentraciones arriba de 50 mg/L llegan a ser comunes en zonas como la estudiada, en donde el agua ha circulado a través de rocas ricas en sílice y que han estado sujetas a altas temperaturas (Lesser y asociados, S.A. de C.V. , 2000), los valores de sílice para el 2015 van en un rango de 64.39 a 108.41 mg/L como se puede observar en la Figura 14.

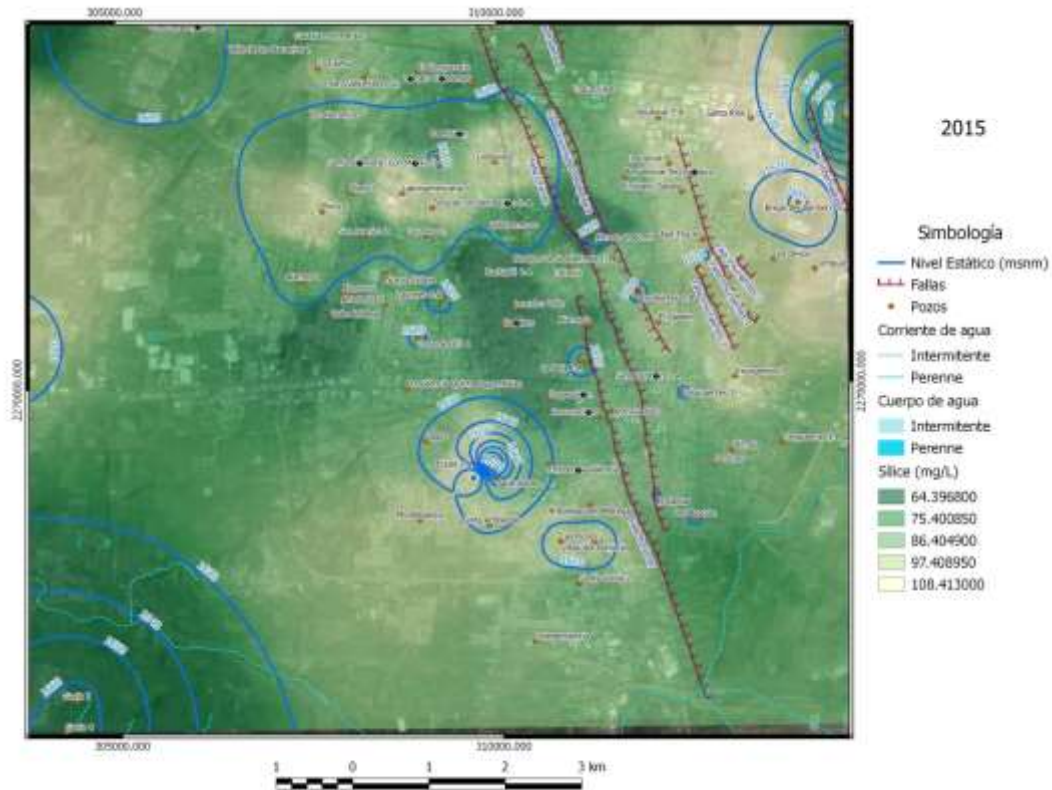


Figura 14 Zonificación de la cantidad de silice en mg/L en el agua

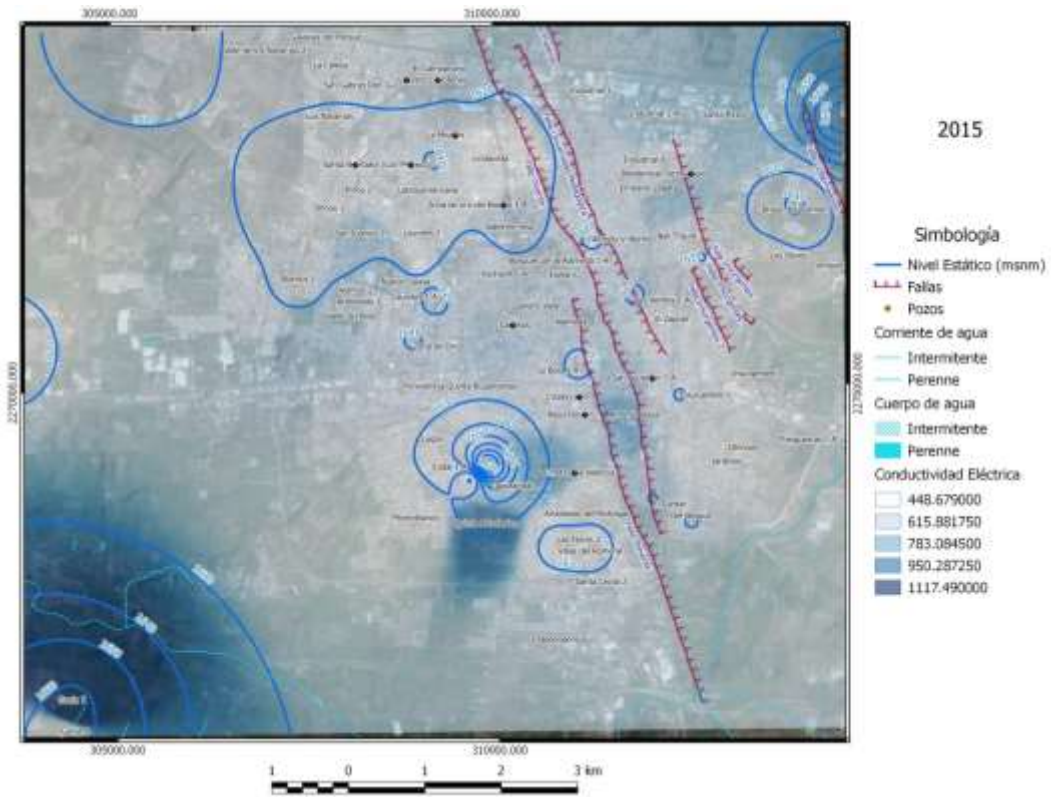
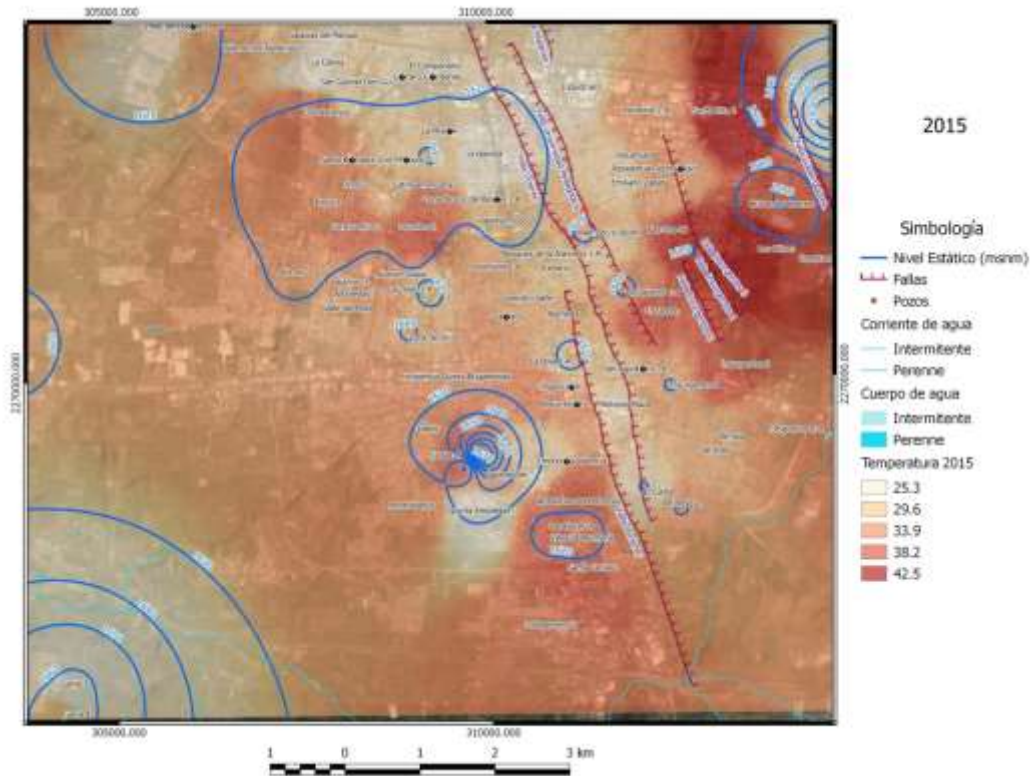


Figura 15 Zonificación de la Conductividad Eléctrica (μS)



16 Zonificación de la Temperatura (°C)

Figura



Figura 17 Imagen modificada de “zona hidrogeológica del Valle de Celaya, 2012.”

Distribución espacial de la dureza del agua (Dureza como CaCO_3)

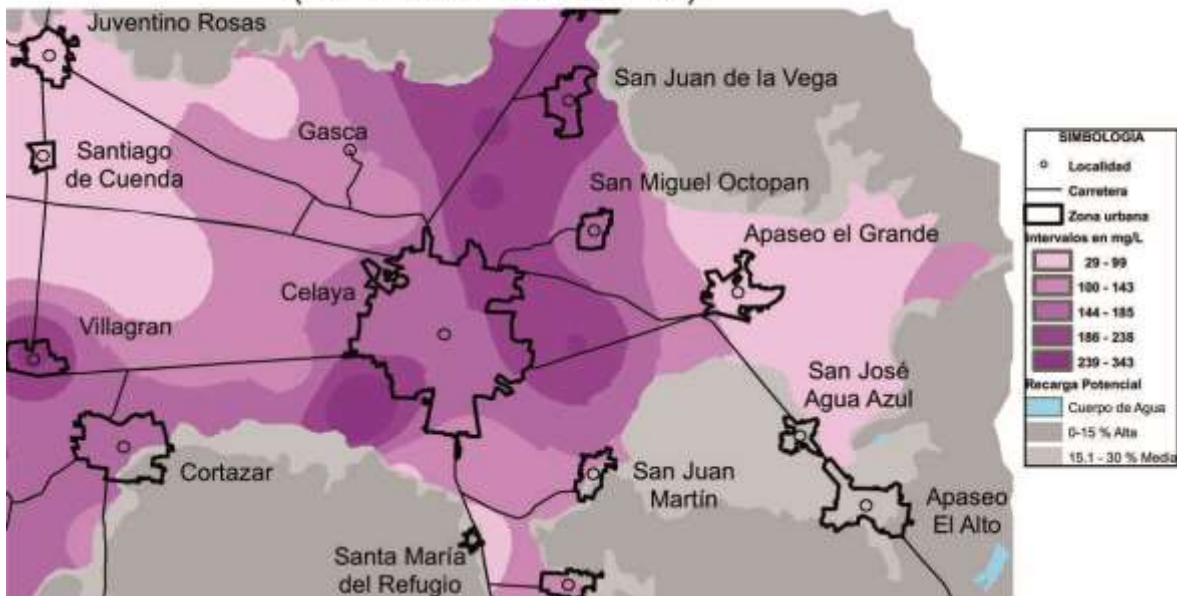


Figura 18 Imagen modificada de “zona hidrogeológica del Valle de Celaya, 2012.”

Resultados – Discusión

Con base en la información recopilada se realizó un modelo del acuífero del Valle de Celaya, en la Figura 19 se muestra una esquematización del subsuelo en la zona norte de la ciudad de Celaya, esta se realizó con los datos de los cortes litológicos de los pozos, con la información de la red piezométrica y con los datos corroborados en superficie de las fallas.

Sin embargo no se tiene información suficiente como para conocer el comportamiento de las litologías a una profundidad mayor a 300-350m o en algunos pozos a 400m, se desconoce el ángulo de buzamiento de las fallas y el comportamiento de estas a profundidades mayores a las señaladas anteriormente.

De la mayoría de los pozos de los cuales se tienen datos constructivos que observa que el ademe liso llega a una profundidad de 100m aproximadamente y el resto es ademe ranurado, así que se supone que los demás pozos tienen características constructivas similares.

La tendencia de los hidrógrafos muestra el descenso del nivel estático en los últimos 5 años cuyo descenso es variable dependiendo de la demanda de agua potable para cada pozo y de la recarga que el acuífero haya tenido.

Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico

En el área estudiada se localiza un acuífero del tipo semiconfinado en medios granulares sobre todo en la parte superior con una potencia de entre 90 y 230 metros. También se presentan los medios fracturados que prácticamente funcionan como la parte basal. Los rellenos granulares corresponden con rellenos aluviales, depósitos volcánicos y vulcanosedimentarios y los fracturados corresponden con basaltos y tobas ácidas. En el subsuelo se localizan bajos estructurales limitados por fallas de tipo normal que en algunas localidades afloran en la superficie y en algunos casos son conductos de flujos termales (geiser).

Este acuífero es recargado subterráneamente desde la zona nororiental y descarga también en forma subterránea hacia el poniente, en la parte central en la ciudad de Celaya, se interpretan curvas equipotenciales notablemente deformadas por el sobrebombeo de 85 pozos profundos del sector potable, con caudales de extracción de entre 10 y 25 lps.

La principal recarga proviene de las lluvias (600-800 mm) de la cual después de la evapotranspiración se genera una mínima recarga vertical. Sumada a ésta última, se cuenta también con la recarga incipiente del Río la Laja a lo largo de su trayecto en el área de estudio y de los retornos por riego de lo que queda de la frontera agrícola.

El sobrebombeo ha generado la aparición de nuevas fracturas y/o fallas tanto en la zona rural como en la ciudad de Celaya.

Las zonas en donde se reportan las temperaturas más altas están muy próximas a las fallas distinguibles en superficie en Celaya; en la

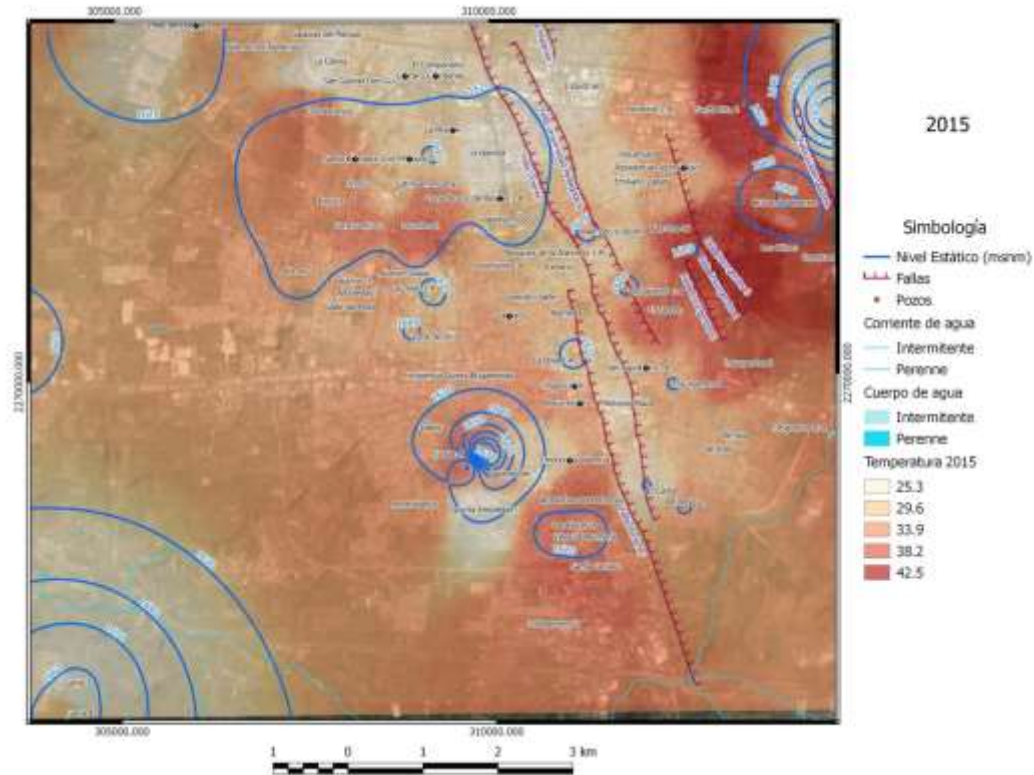


Figura 16 se observa en entre las fallas Insurgentes y Gobernadores se alcanzan temperaturas de hasta 42°C aproximadamente.

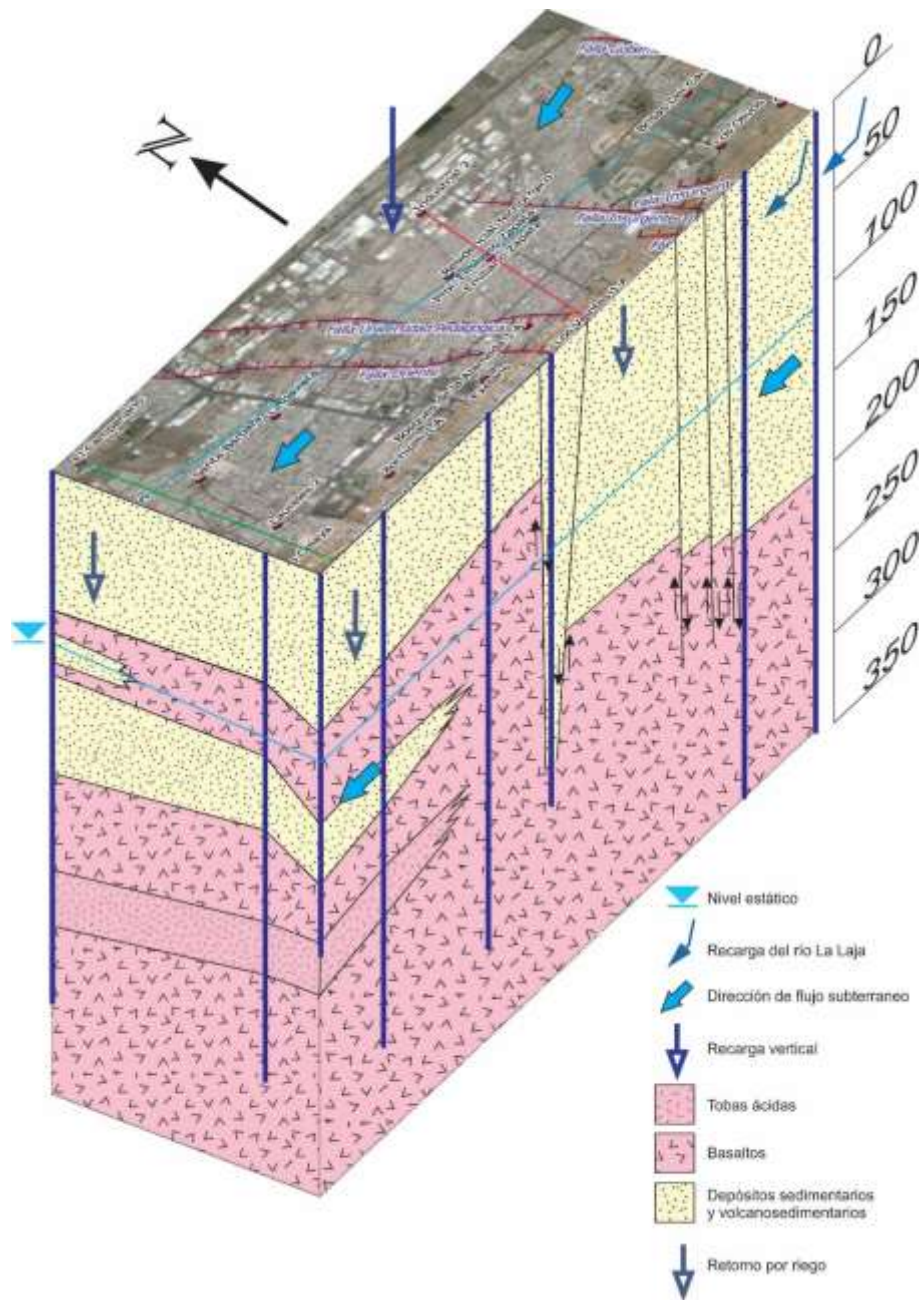


Figura 19

Las concentraciones más altas de dureza en el agua presentan la misma orientación de las fallas observadas en superficie como se muestra en la Figura 18 y en la Figura 13, por lo tanto se infiere que las fallas geológicas sirven de conducto para la mezcla de aguas subterráneas.

Si se comparan las imágenes de las concentraciones de arsénico (Anexo 2), se observa claramente que la falla Gobernadores tiene una inferencia directa con las concentraciones de As que sobrepasan los límites máximos permisibles. Los valores más altos de conductividad eléctrica, de fluoruros, de manganeso y de

sílice presentan un comportamiento similar al del arsénico y una relación con la falla Gobernadores mientras que los valores altos de hierro no presentan una relación significativa con la falla mencionada anteriormente.

La principal familia de agua es sódico-cálcica bicarbonatada (Tabla 3); en la Figura 12 se observa que los cationes predominantes son el sodio y el calcio esto indica que ocurre un intercambio catiónico, mezcla de aguas y la existencia de un flujo regional, el sodio está presente principalmente en rocas ígneas de composición intermedia y en cuanto a aniones, el que prevalece es el bicarbonato.

Pozo de Adsorción

Dado que la vulnerabilidad de los recursos hídricos en el acuífero del Valle de Celaya al cambio climático es alta, es importante emprender medidas de adaptación que permitan el manejo integral del agua para satisfacer eficazmente la demanda de la población. Una herramienta estratégica para el manejo de sequías e inundaciones es el uso del almacenamiento subterráneo el cual disminuye las pérdidas por evapotranspiración y tiene costos más bajos que los almacenamientos superficiales. La Infiltración Inducida en acuíferos ha demostrado ser un método efectivo para ayudar a la recuperación de acuíferos sobreexplotados por lo que se ha convertido en una herramienta vital en el manejo de los recursos hídricos. El número creciente de proyectos alrededor del mundo es evidencia del costo-beneficio de esta técnica.

Para la perforación de un pozo de adsorción JUMAPA propuso 4 lugares con base en los terrenos que esta empresa tiene, la ubicación de estos se muestra en la Figura 20. Por cuestiones administrativas se había considerado como primera opción realizar la perforación en el punto marcado en la imagen como “Pozo de infiltración Olivos 2”.

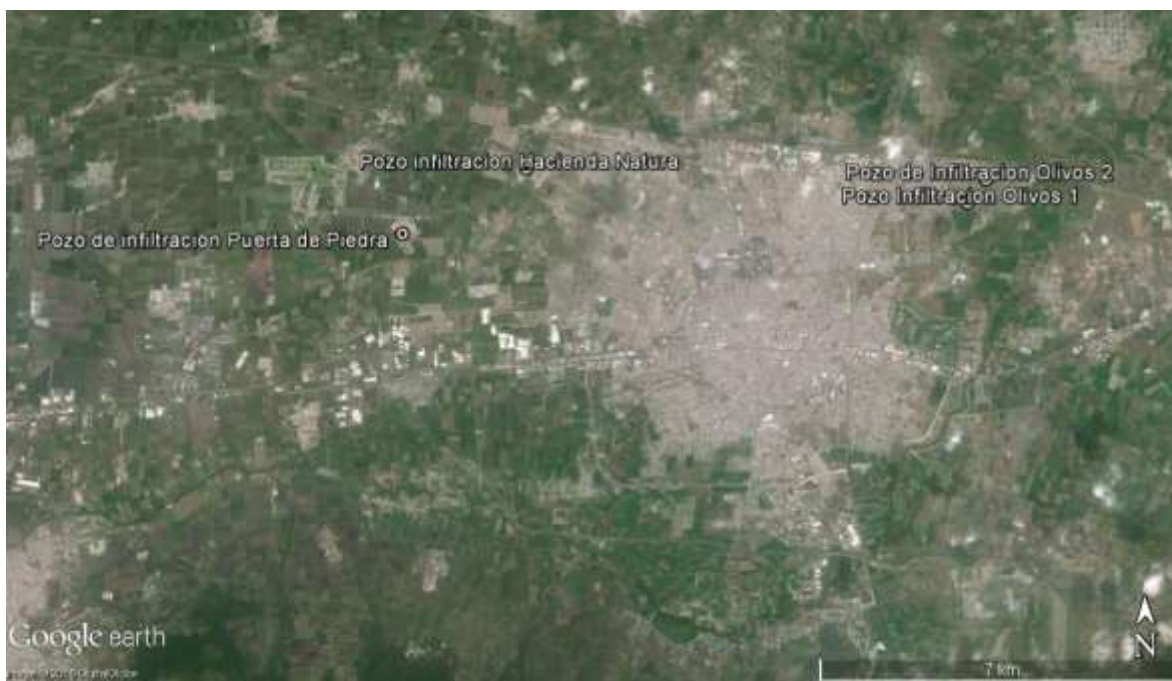


Figura 20 Ubicaciones propuestas por JUMAPA para el pozo de adsorción.

Los requisitos técnicos establecidos por la CONAGUA para pozos de adsorción menores a 60 L/s establecen que la perforación de un pozo de adsorción debe estar por lo menos 5 metros sobre el nivel estático de la zona.

Al observar la geología e hidrogeología de la zona nororiente de la ciudad se determinó que los dos posibles lugares para la perforación de este pozo no son

los adecuados, el principal motivo es el nivel estático. El nivel estático de esta zona son de los más someros registrados en la ciudad de Celaya, varían entre los 80 m, por lo tanto el pozo perforado en esa zona estaría muy cercano a la superficie.

El segundo motivo para evitar la perforación en esta zona es la cercanía con el río La Laja, de acuerdo con los mapas de los niveles dinámicos se determinó que el río es una fuente de recarga para el acuífero generando que el flujo del acuífero vaya del noreste al oeste de la ciudad como se muestra en la Figura 11 y el agua inyectada al acuífero tomaría el mismo rumbo y atravesaría la ciudad.

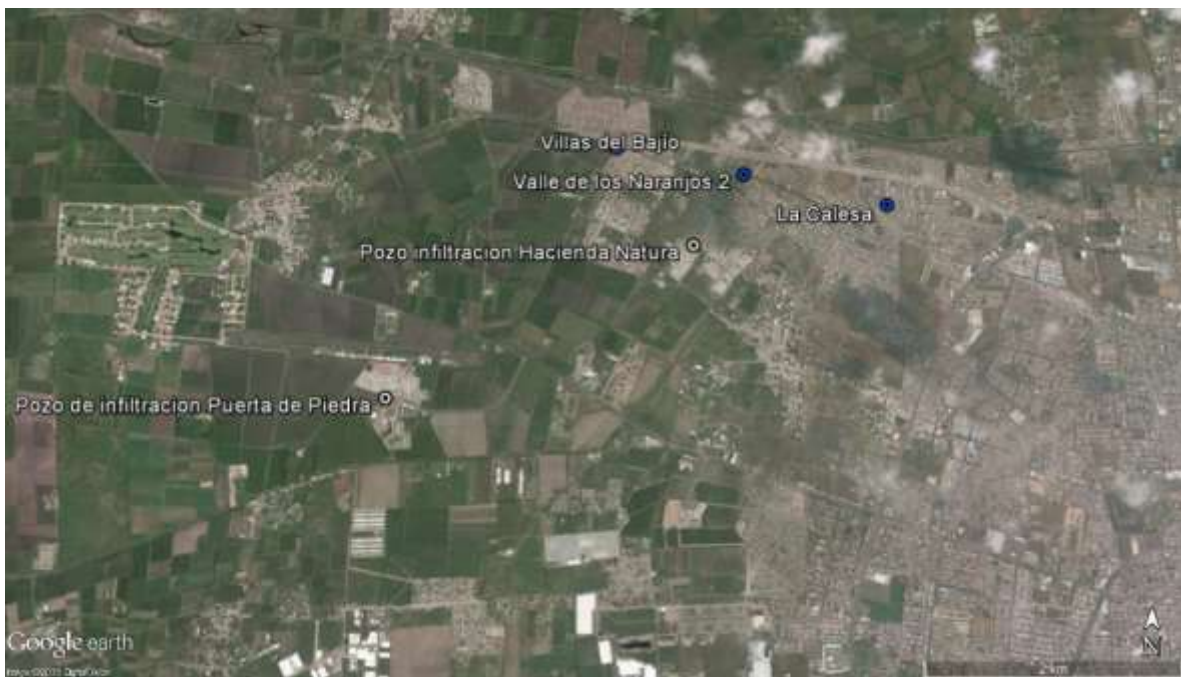


Figura 21 Ubicación de los pozos utilizados para la correlación estratigráfica de la zona noroeste de Celaya, Gto.

Se utilizaron los pozos “La Calesa, Villas del Bajío y Vale de los Naranjos 2” para la correlación estratigráfica mostrada en la Figura 21 por ser pozos a los cuales se les realizó su respectivo corte litológico y por ser los más cercanos a una de las ubicaciones propuestas para la perforación del pozo de adsorción.

En cuanto a la geología de la zona, al estar ubicados los posibles sitios de perforación marcados en la Figura 20 como “Pozo de infiltración Olivos 1 y Olivos 2” del lado derecho del sistema de fallas que afectan a la ciudad, el espesor de los estratos de material sedimentario y vulcanosedimentario que rellenan la cuenca es de aproximadamente 200 m como se puede observar en la sección geológica 1, estos estratos presentan una porosidad alta pero la capacidad que tienen para transmitir agua horizontalmente a través del espesor saturado (transmisividad) es

baja al igual que la facilidad con la que el medio geológico se deja atravesar por agua (conductividad hidráulica), lo cual reduciría la cantidad de litros por segundo que entrarían al acuífero.

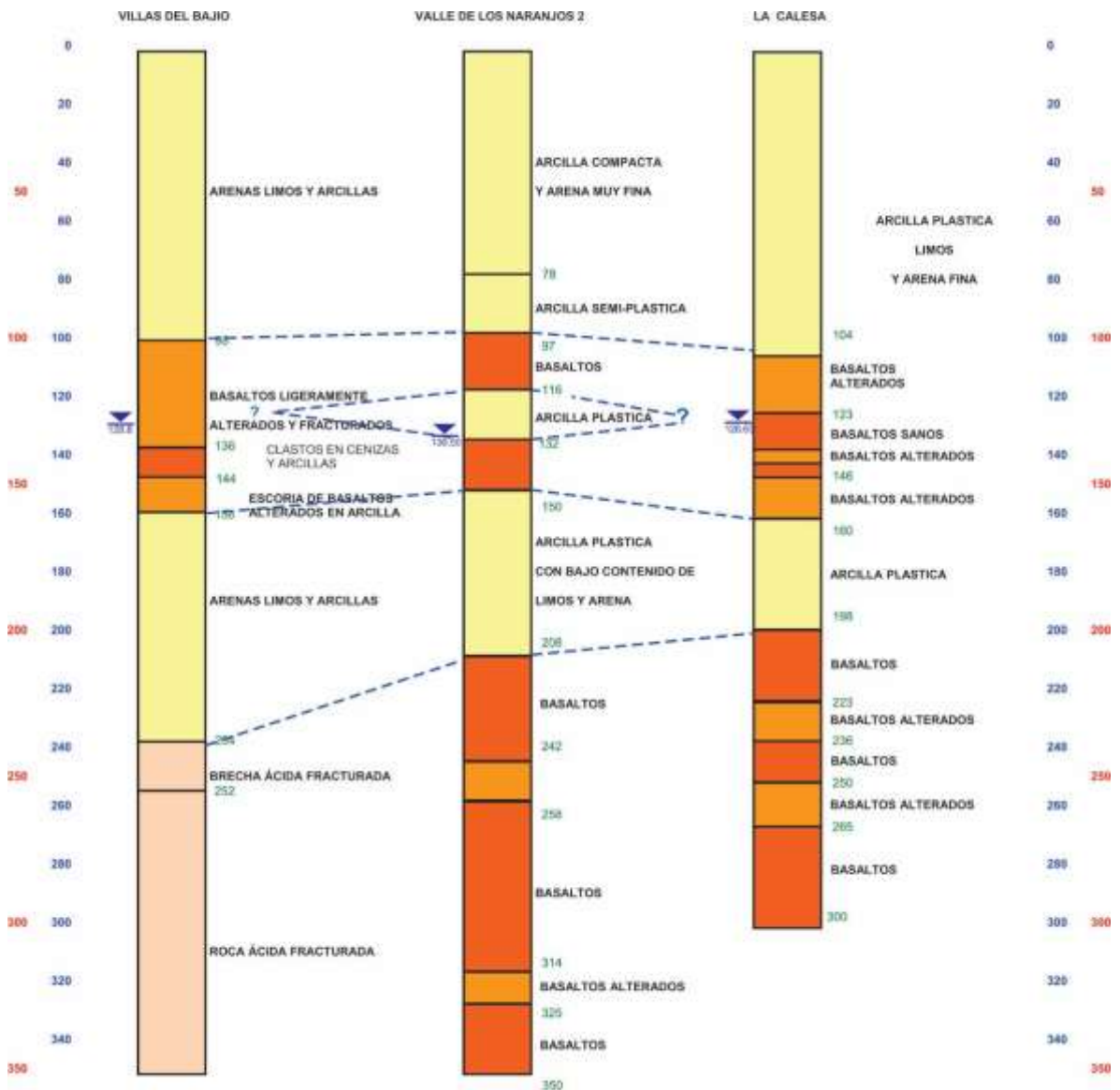


Figura 22 Correlación estratigráfica de la zona norponiente.

En los cortes litológico de la zona norponiente de la ciudad de Celaya (Figura 22) se observa que el espesor de los estratos arcillo-arenosos ronda entre los 100 m, los cuales son seguidos por una capa de basaltos alterados y fracturados con buena conductividad hidráulica, el nivel estático en esta zona ronda entre los 126m y 130m, por lo cual la perforación del pozo de adsorción podría llegar a una profundidad tal que logre penetrar los basaltos fracturados y alterados.

Conclusiones y Recomendaciones

El Valle de Celaya se encuentra ubicada entre la parte sur de la provincia de la Mesa Central (MC) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). El patrón de fallas que se observa en la región de estudio está constituido por fallas reactivadas de dos sistemas regionales: El sistema de fallas N-S Taxco-San Miguel de Allende y el sistema NE-SW del Bajío.

El origen del Valle de Celaya está ligado a la formación de la falla el Bajío, esta falla generó una serie de altos y bajos estructurales, entre ellos la fosa de Celaya, la cual está rellena por una serie de depósitos sedimentarios y volcano-sedimentarios intercalados e interdigitados con basaltos sanos, fracturados y tobas ácidas.

El acuífero del Valle de Celaya es semiconfinado y está siendo afectado por una intensa sobre explotación que ha generado una deformación en la red piezométrica aunque es recargado verticalmente. El acuífero se encuentra ubicado en la frontera de dos dominios geológicos los cuales están limitados por sistemas de fallas con grandes desplazamientos, algunas de estas fallas se hacen evidentes por la subsidencia del terreno.

El acuífero está formado en su parte superior por un medio granular con un espesor promedio de 150 m conformado en su mayoría por acillas y arenas medias aunque también se presentan gravas en menor proporción. Subyacen depósitos volcánicos fracturados (basaltos y tobas ácidas) cuyo espesor no ha sido determinado en el presente estudio. El nivel estático se encuentra en promedio a 110 m; la recarga proviene del río La Laja, de las entradas subterránea al sistema, de retornos por riego y de la incipiente recarga vertical.

La familia de agua más abundante es sódico-cálcica bicarbonatada, tomando en cuenta que este último ion está presente en todos los tipos de agua. La presencia de esta familia de aguas se debe a un intercambio catiónico asociado a un flujo regional. Las concentraciones de arsénico en el agua aumentan con la temperatura; una posible fuente del arsénico son los vidrios volcánicos que forman parte de las rocas en el subsuelo, el arsénico y el sílice son disueltos y transportados con mayor facilidad a temperaturas altas.

Se deben complementar los estudios realizados a las muestras de agua tomadas en los diferentes pozos, manantiales, etc., no se tienen los datos suficientes sobre la concentración de iones para la elaboración de diagramas como el de Piper los cuales se utilizan para observar la evolución del agua en el acuífero.

Con base en la NOM-127-SSA1-1994, se sabe que los niveles de arsénico y otros elementos potencialmente tóxicos en el agua son superiores a los establecidos para el consumo humano, por lo tanto se recomienda realizar

estudios sobre el alcance de las afecciones que estos están generando en la población.

Para tener un conocimiento más certero del funcionamiento hidrogeológico del acuífero es necesario realizar recorridos piezométricos e hidrométricos por lo menos dos veces al año en pozos piloto escogidos por JUMAPA, los pozos piloto deben estar bien distribuidos en la zona de estudio y en este caso se recomienda que el número de pozos sea mínimo del 15% del total de los pozos administrados por JUMAPA. Cabe mencionar que se debe considerar la información generada por CNA y empresas privadas como son piezometría e hidrometría subterránea, cortes litológicos de pozos, pruebas de bombeo y geofísica (TEM's y registros geofísicos de pozos).

También es necesario recopilar información geotérmica que aunada a la requerida con anterioridad puede ser procesada en un sistema de información geográfica, los resultados obtenidos servirán de apoyo para la toma de medidas pertinentes en cada caso.

La mejor zona para la perforación de un pozo de adsorción en el Valle de Celaya es aquella que está en el límite norponiente de la ciudad, principalmente por la profundidad de las rocas que servirían para captar el agua infiltrada (basaltos fracturados), tomando en cuenta que el pozo se debe perforar por lo menos 5 metros arriba del nivel estático de la zona.

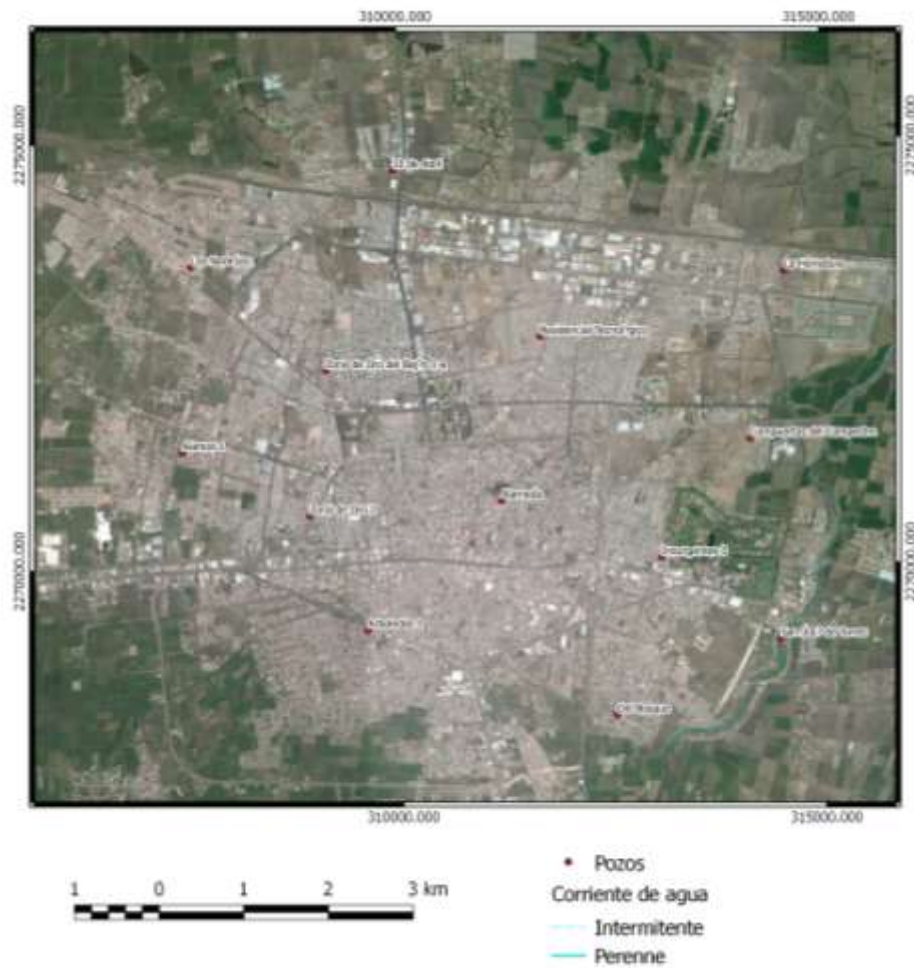
Bibliografía

- Alaniz-Álvarez, S. A.-S. (2001). Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Alaniz-Alvarez, S. A.-S.-Z.-E. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65-82.
- Aranda-Gómez, J. J.-G.-S. (1989). Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central.
- Aranda-Gómez, J. L.-L.-N.-B. (2013). Active Sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca an Celaya. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.
- Botero-Santa, P., & Alaníz-Álvarez, S. A. (2015). Origen y desarrollo de la Cuenca El Bajío en el sector centra de la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Carranco-Lozada, S. E. (2013). Effects of change of use land on an aquifer in a tectonically active region. *Natural Science*, 259-267.
- Cuellar-Franco, J. L. (s.f.). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México (estado de Guanajuato)*. Recuperado el 09 de Mayo de 2016, de www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM11guanajuato/municipios/11007a.html
- Ferrari, L. O.-E. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: Tectonophysics. 122-149.
- GEOPE S.A. (1980). *Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona del Valle de Celaya, en el estado de Guanajuato*. . Celaya, Gto.: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica.
- GEOPSA S.A. de C.V. (2005). *Estudio Geohidrológico en la zona Nor-Poniente de la ciudad de Celaya, Gto.* Celaya, Gto.: JUMAPA.
- Huizar-Álvarez, R. M.-S.-C.-R. (2011). Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime.

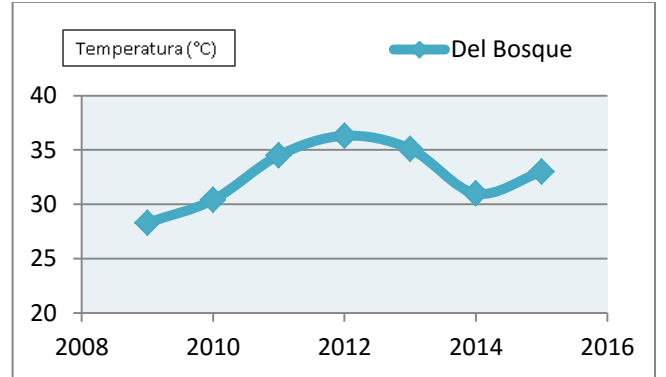
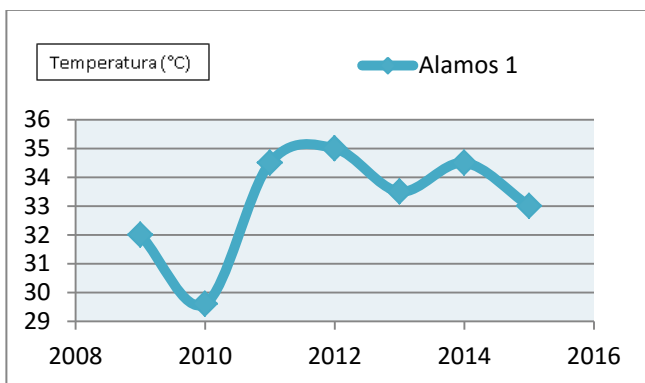
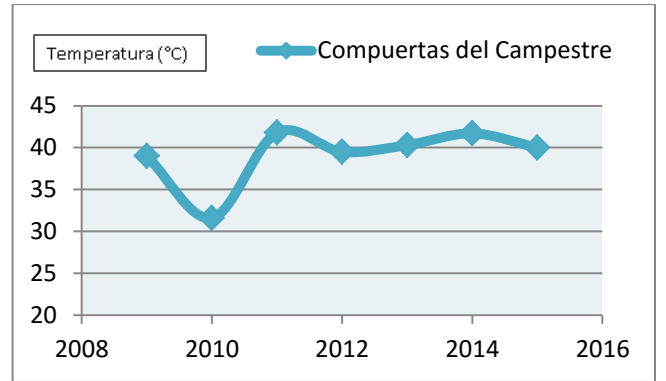
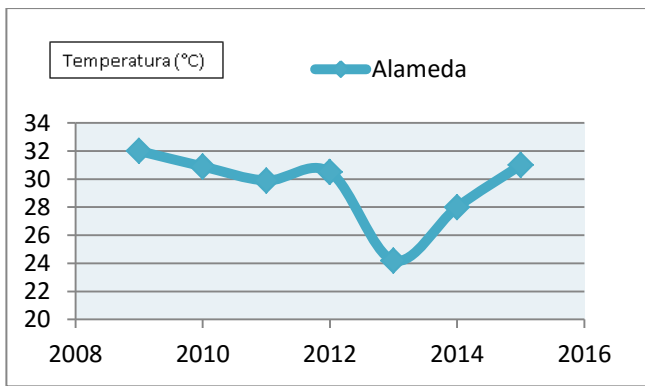
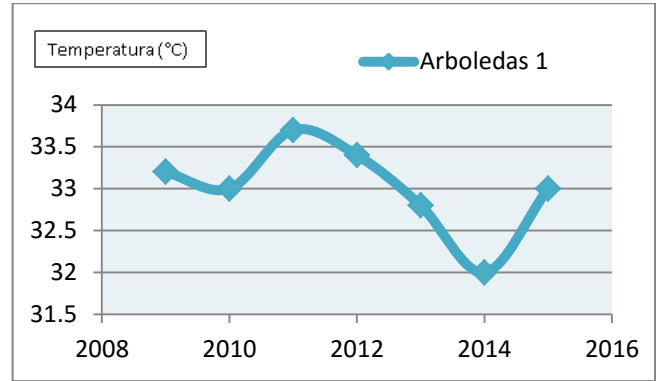
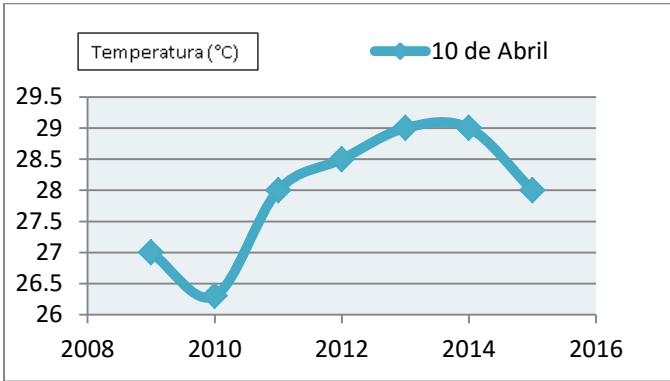
- IGC S.A. de C.V. (1999). *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya*. Celaya, Gto.: CNA.
- INEGI. (2009). *INEGI*. Recuperado el 09 de Mayo de 2016, de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicosifras/datos-geograficos/11/11007.pdf>
- INEGI. (2012). *Zona Hidrológica del Valle de Celaya*. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- IPOTARSA. (2005). *Estructuración de mapas temáticos de los índices de vulnerabilidad y diseño de red de monitoreo de calidad de agua del acuífero del Valle de Celaya, Guanajuato*. Celaya: Comisión Estatal del Agua.
- Lesser y asociados, S.A. de C.V. . (2000). *Seguimiento del estudio hidrogeológico del acuífero del Valle de Celaya, Gto.* Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.
- Morales-Arredondo, I. (2016). A low-temperature geothermal system in central Mexico: Hydrochemistry an potencial heat source. *Geochemical Journal* .
- Morales-Arredondo, I. M. (2016). The origin of groundwater arsenic and fluorine in a volcanic sedimentary basin in central Mexico: a hydrochemistry hypothesis. *Hidrogeology Journal*.
- Morales-Arredondo, J. V.-E. (2015). Geological, hydrogeological, an geothermal factors associated to the origin of arsenic, fluoride, and groundwater temperature in a volcanic environmente "El Bajío Guanajuatense", Mexico. *Environmental Earth Sciences*.
- Mukherjee, A. (2009). Major Occurrences of Elevated Arsenic in Groundwater and Other Natural Waters.
- Nieto-Samaniego, A. F. (Febrero de 1999). Carta Geologica-Minera, Celaya F14C64. Pachuca, Hidalgo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Nieto-Samaniego, A. F.-Á. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 285-318.
- Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Trujillo-Candelaria, J. A. (1985). Fallamientos de terrenos en Celaya. *Sociedad Mexicana de mecánica de suelos A.C.* .

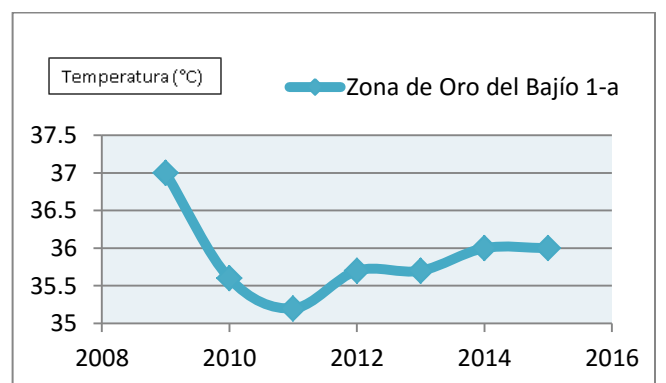
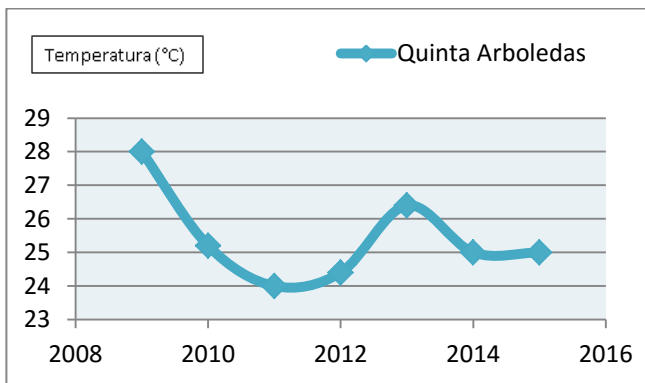
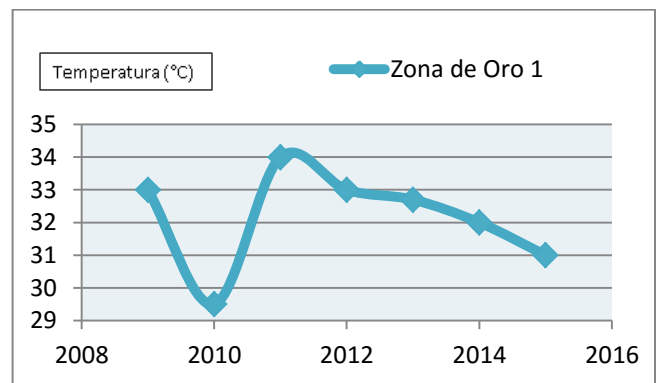
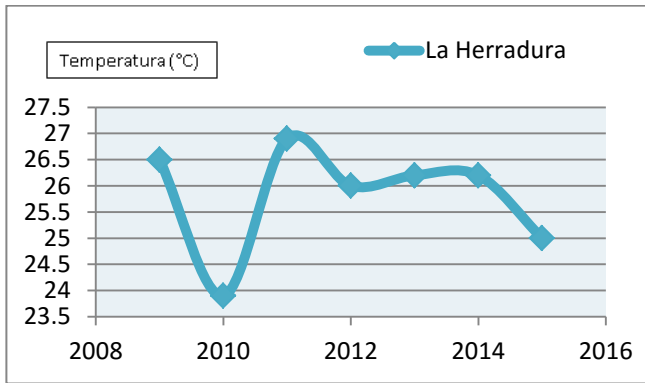
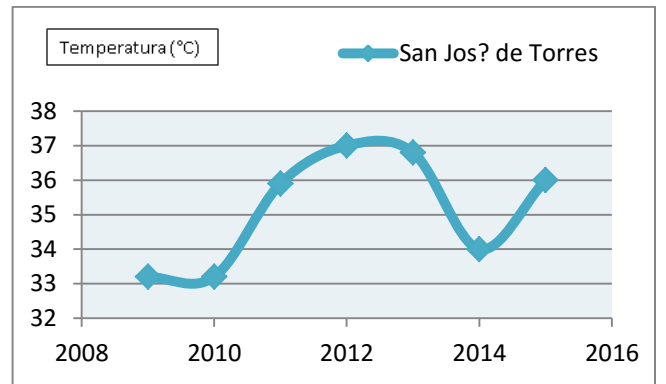
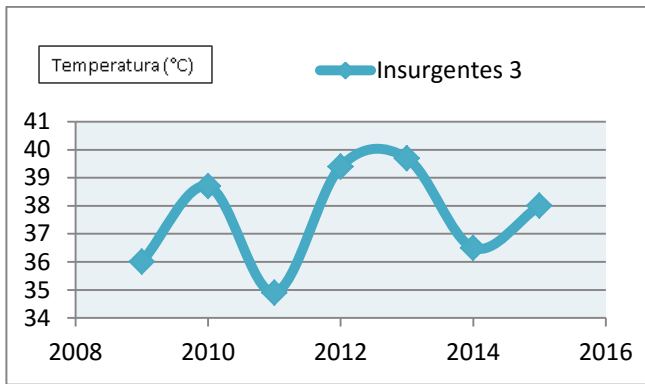
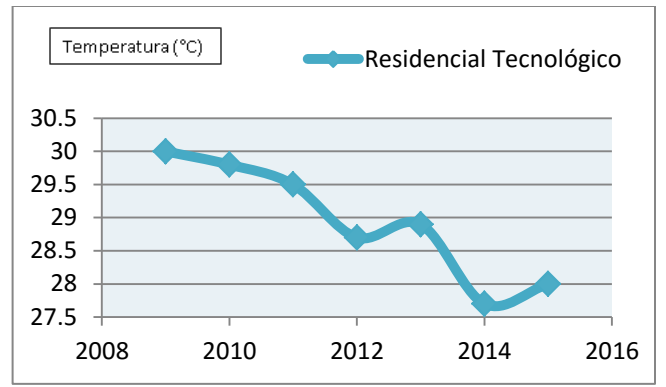
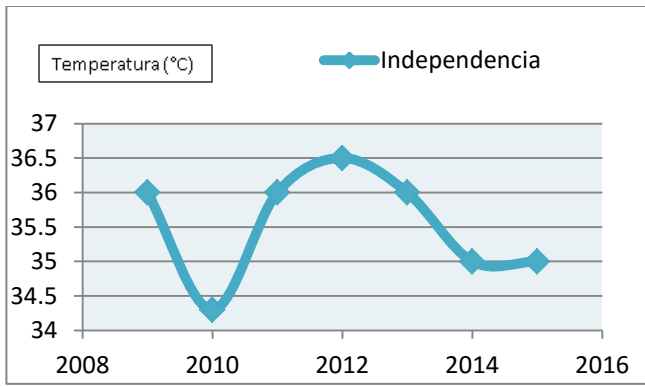
Anexo 1.

Mapa de la ubicación de los pozos utilizados para las gráficas de T °C y CE

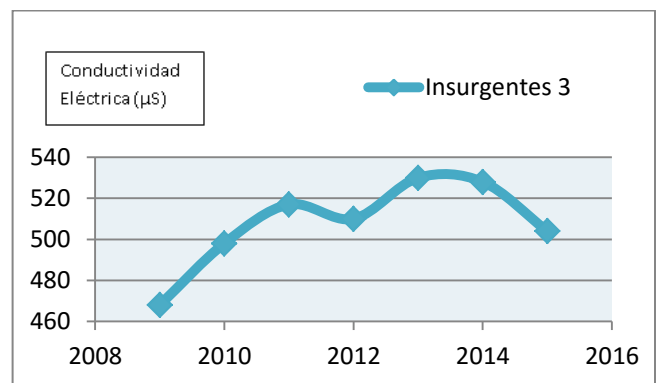
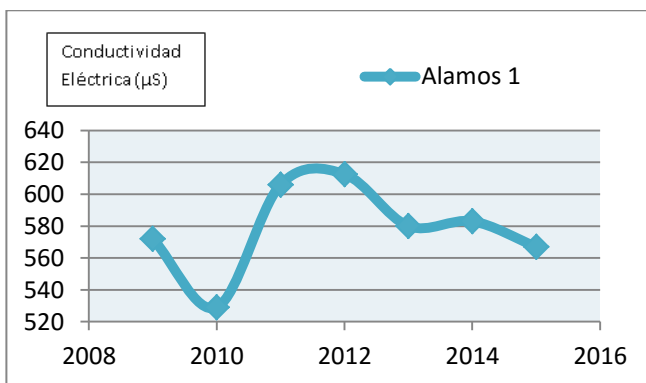
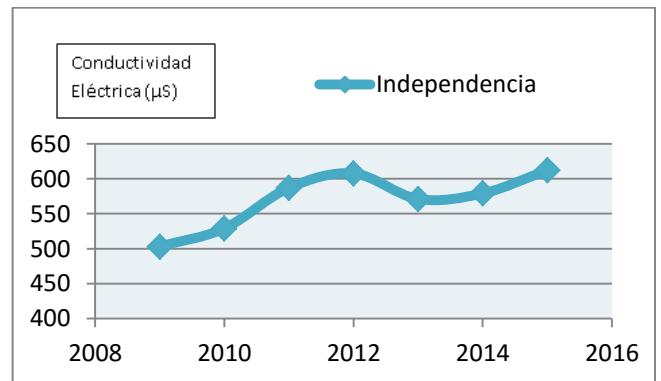
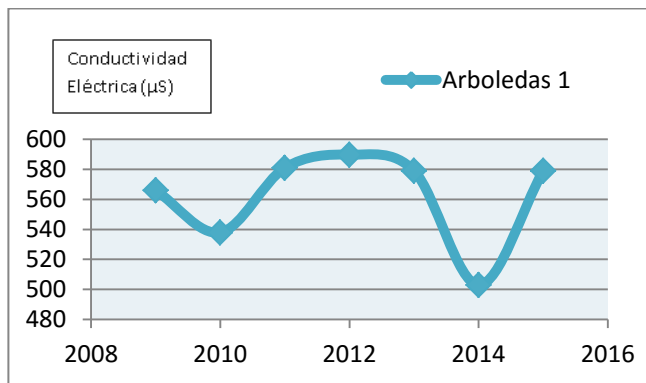
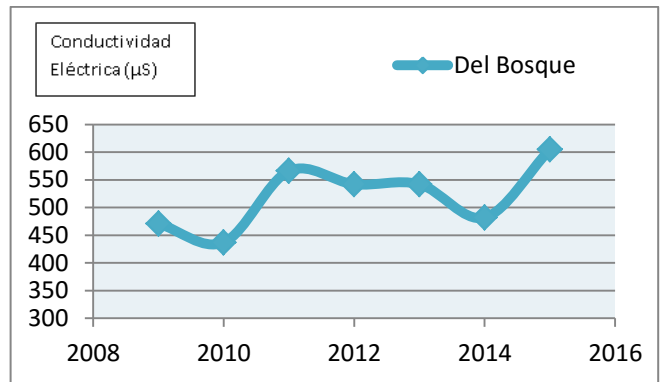
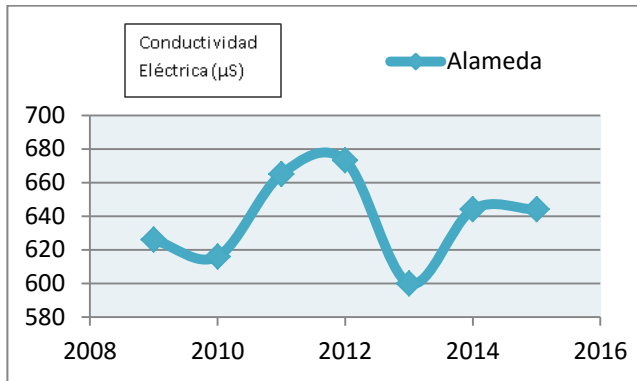
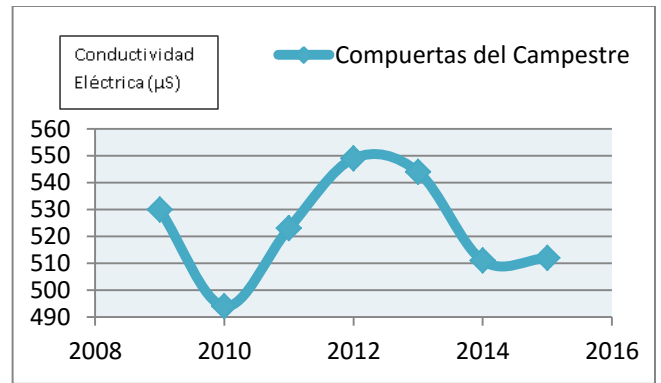
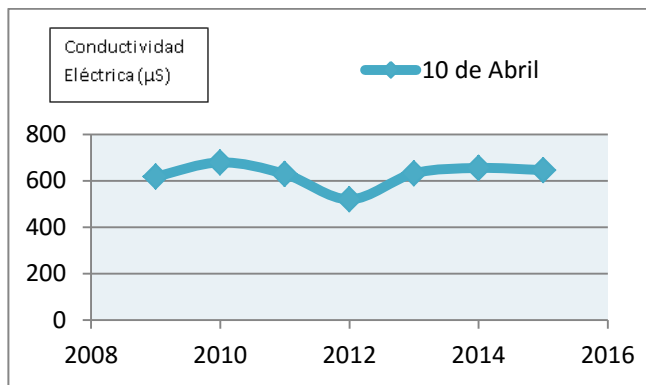


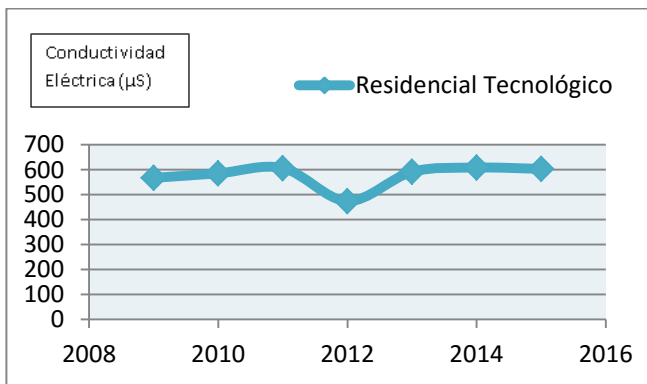
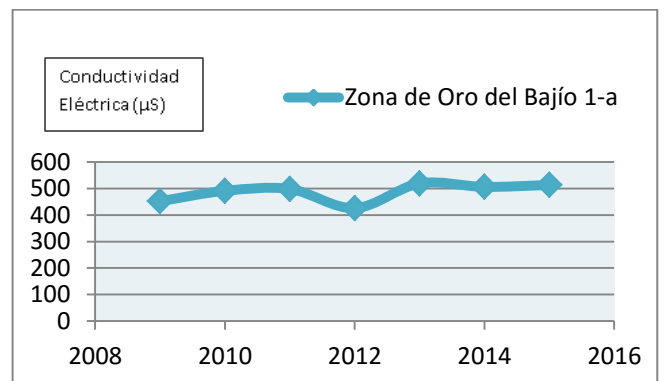
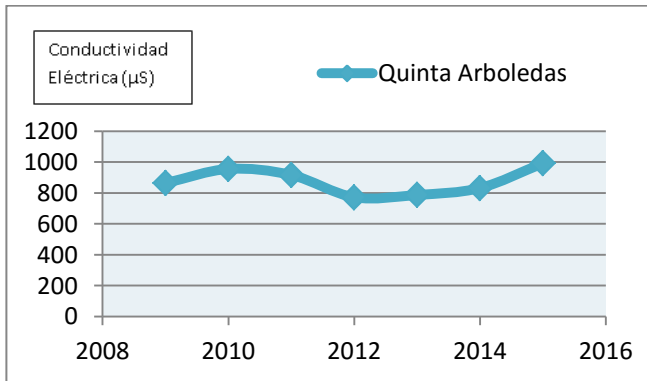
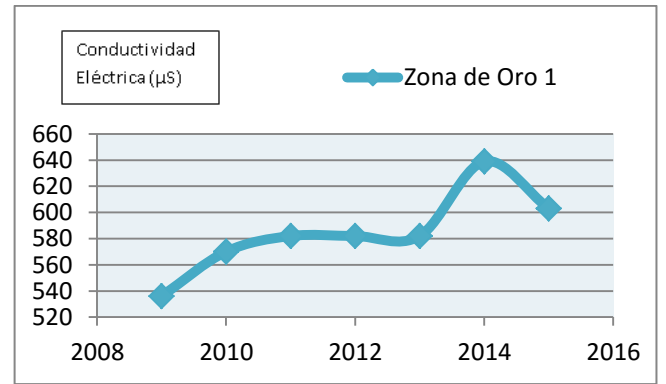
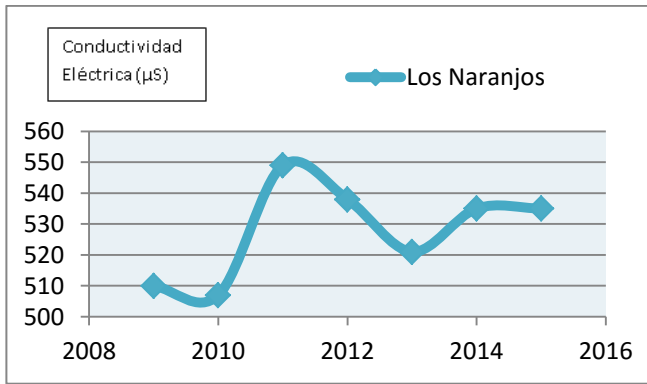
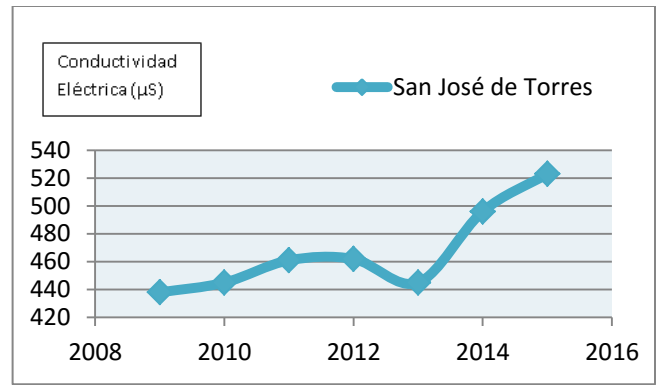
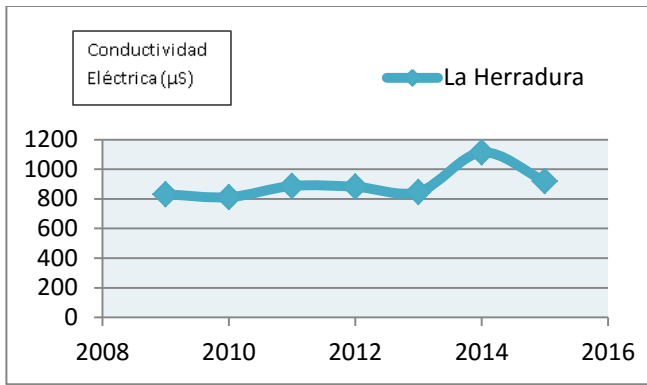
Graficas de temperatura





Graficas de conductividad eléctrica

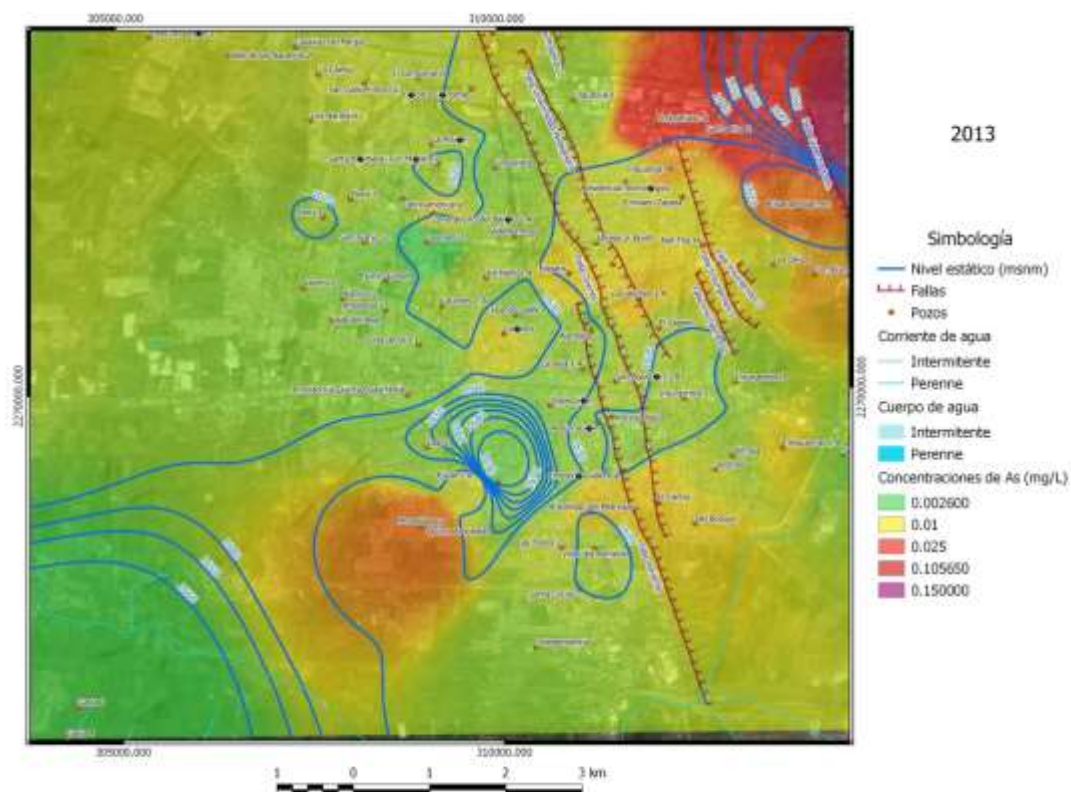


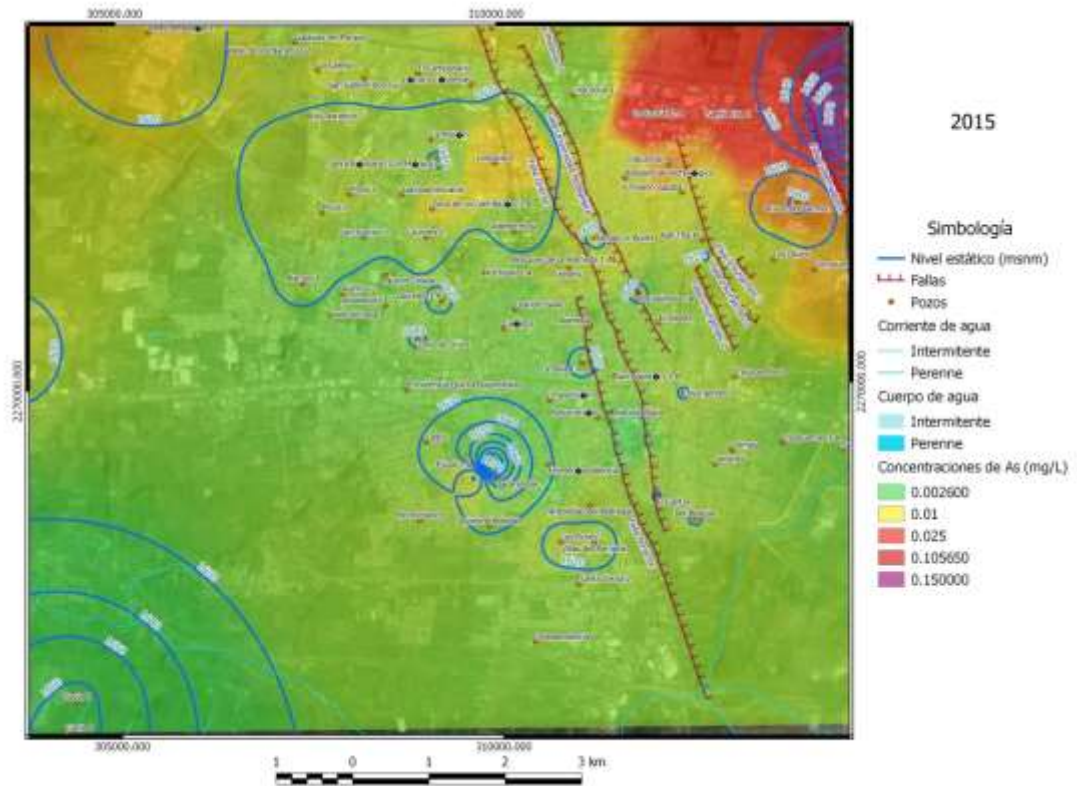
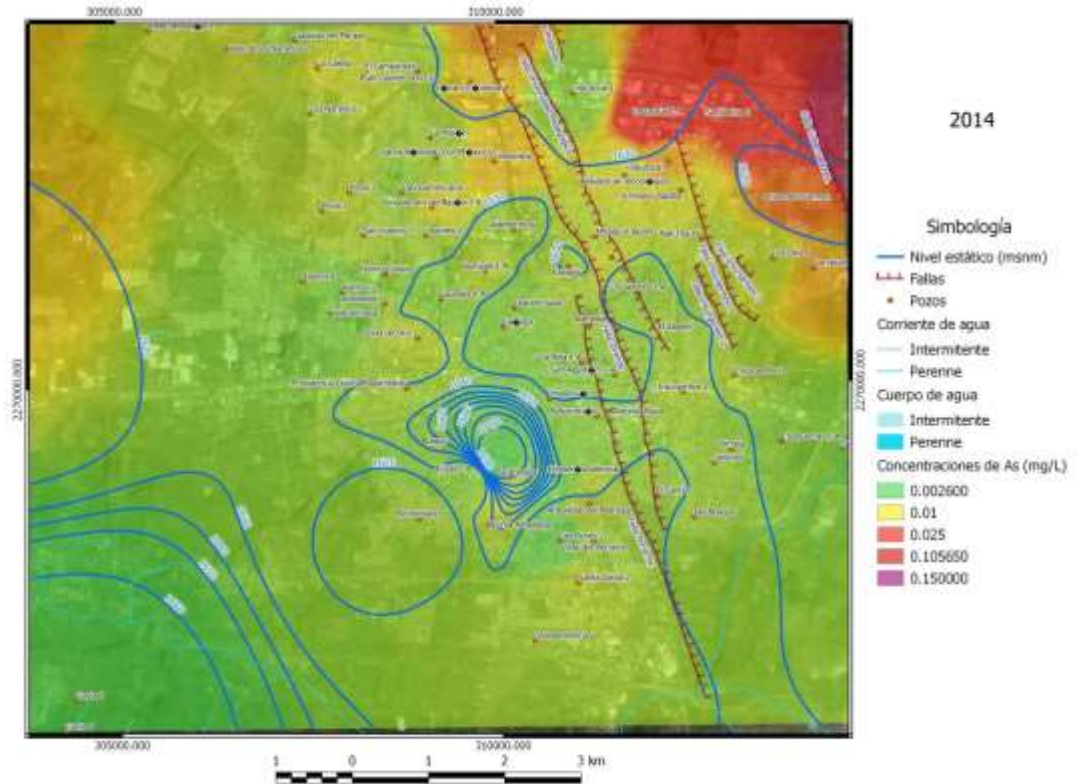


Anexo 2. Concentraciones de Arsénico, Flúor, Hierro y Manganeso y su relación con las fallas y el nivel estático por año.

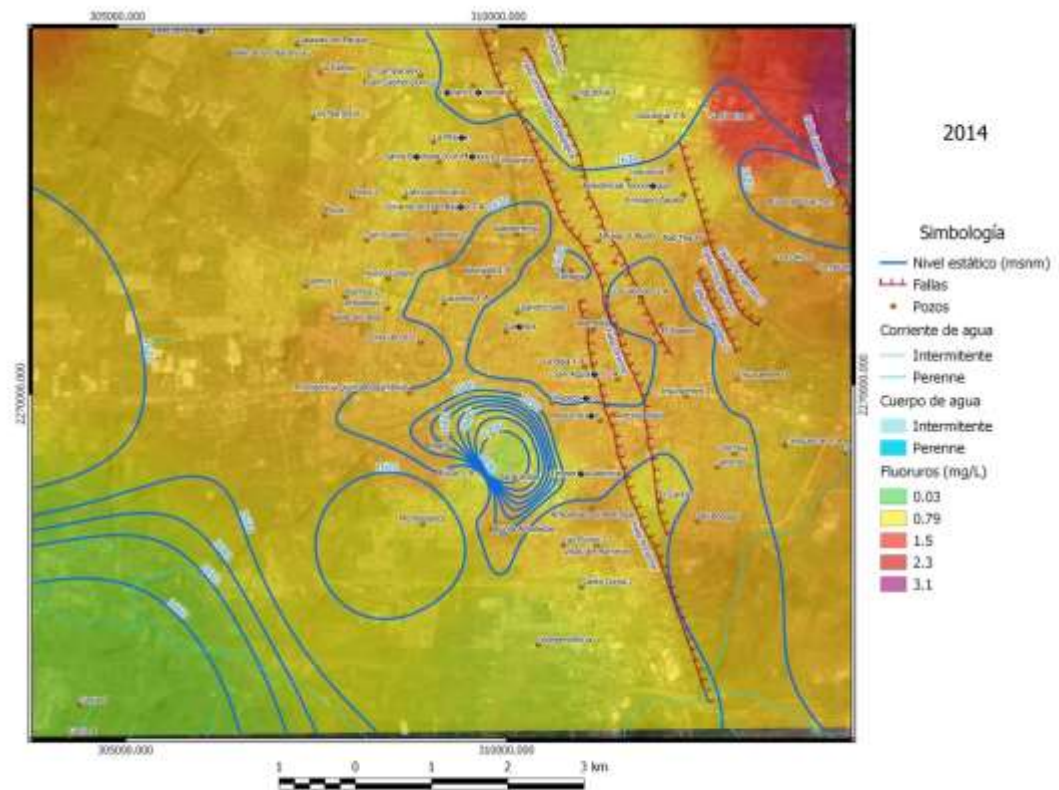
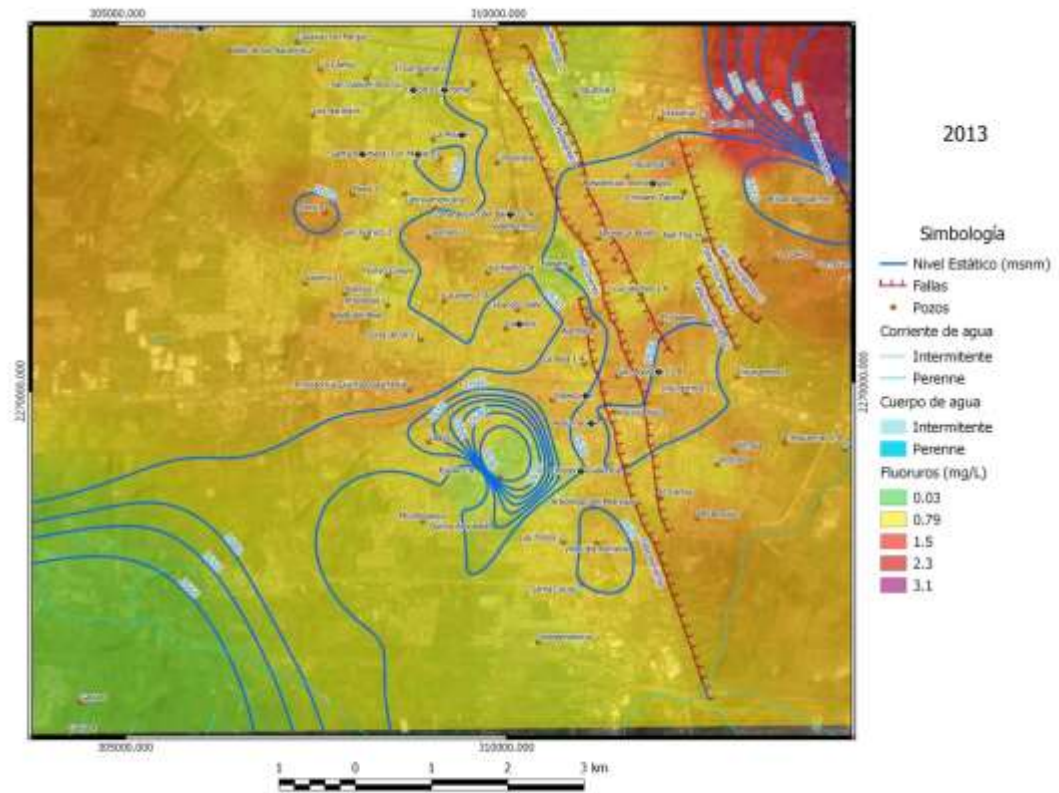
Se utilizaron datos del nivel estático de 50 pozos y de 75 pozos para la configuración de las concentraciones de las concentraciones de Arsénico, Flúor, Hierro, Manganeso y de las curvas de isovalores.

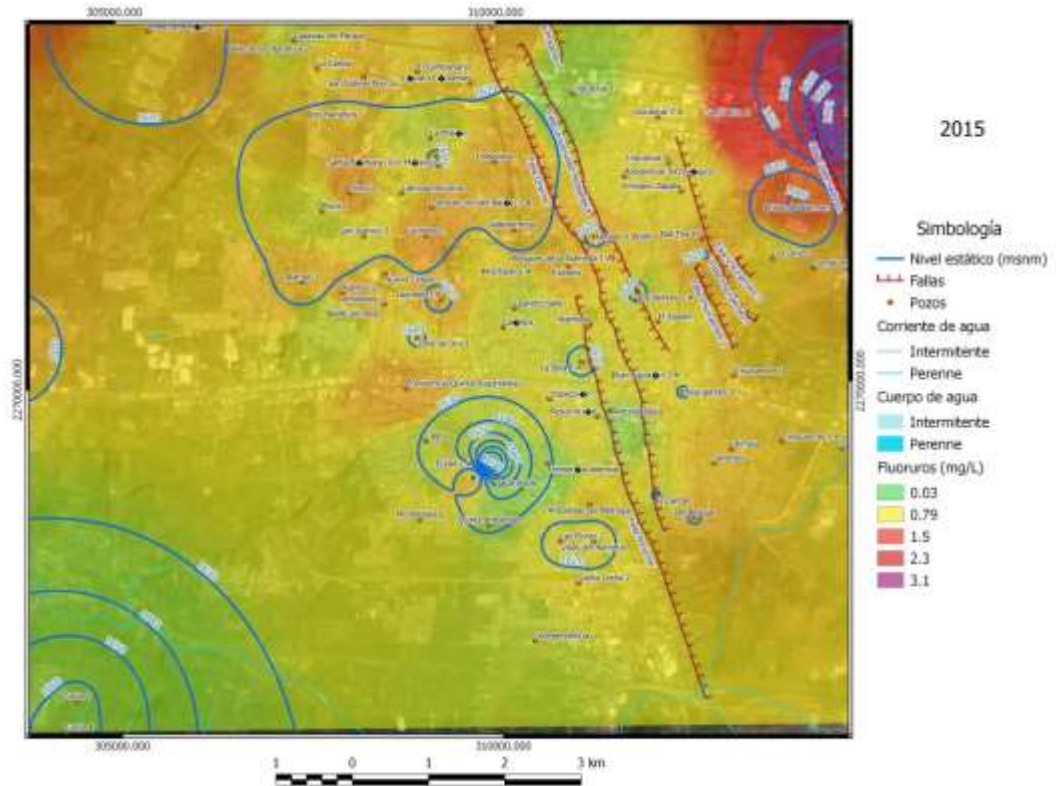
Arsénico



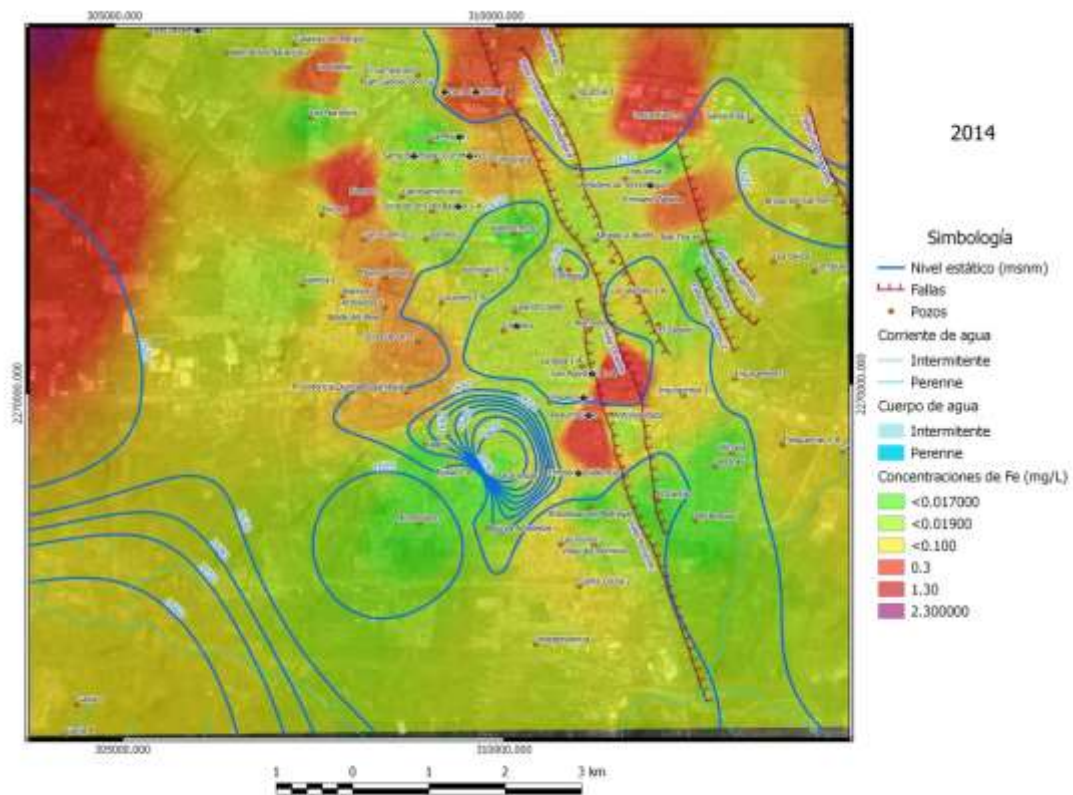
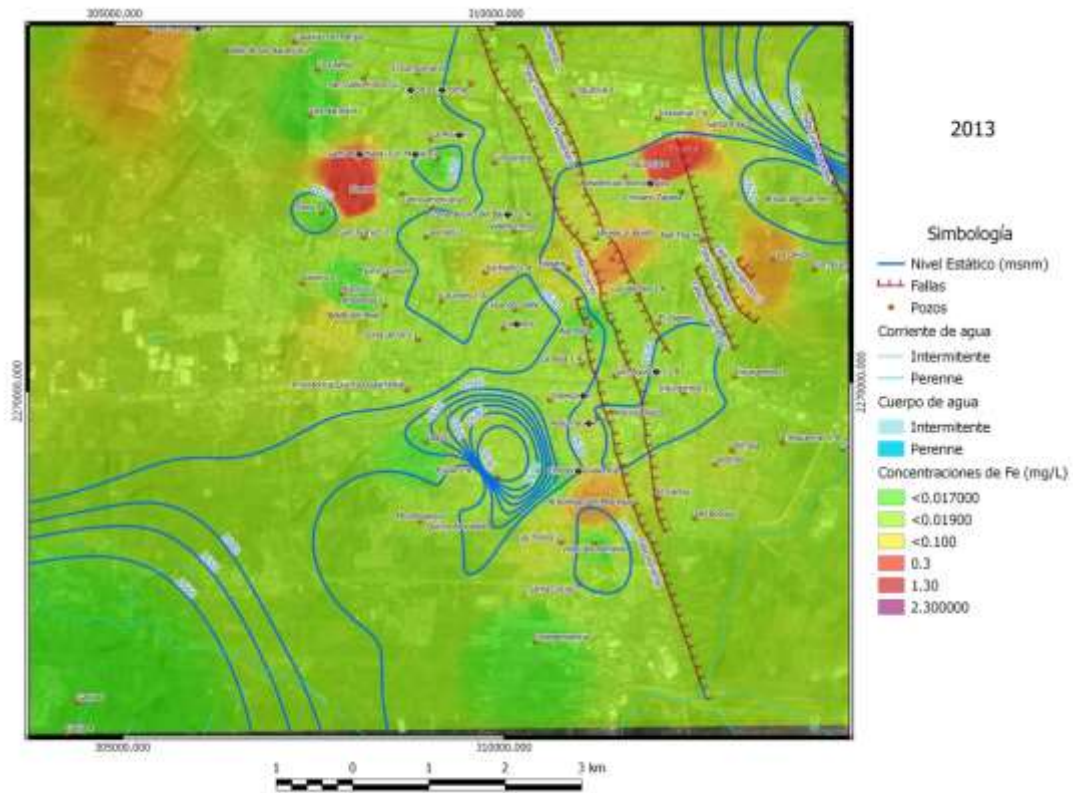


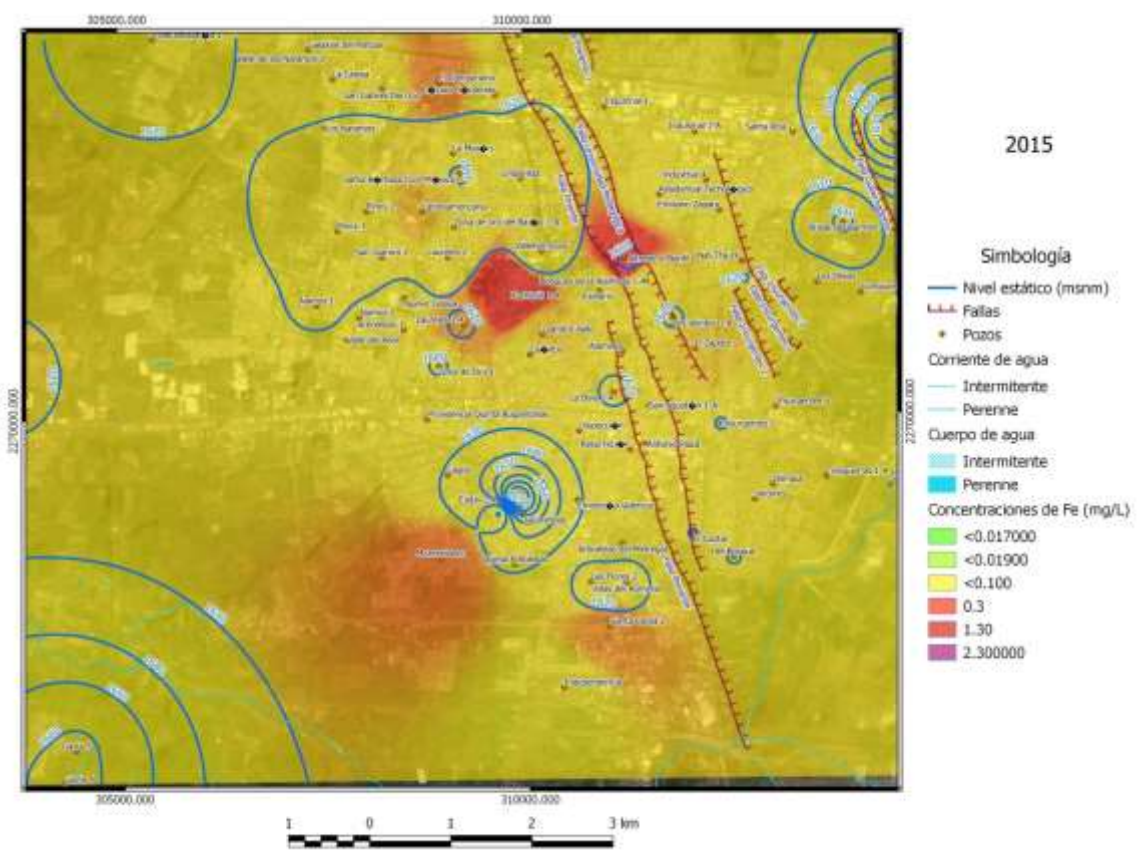
Fluoruros



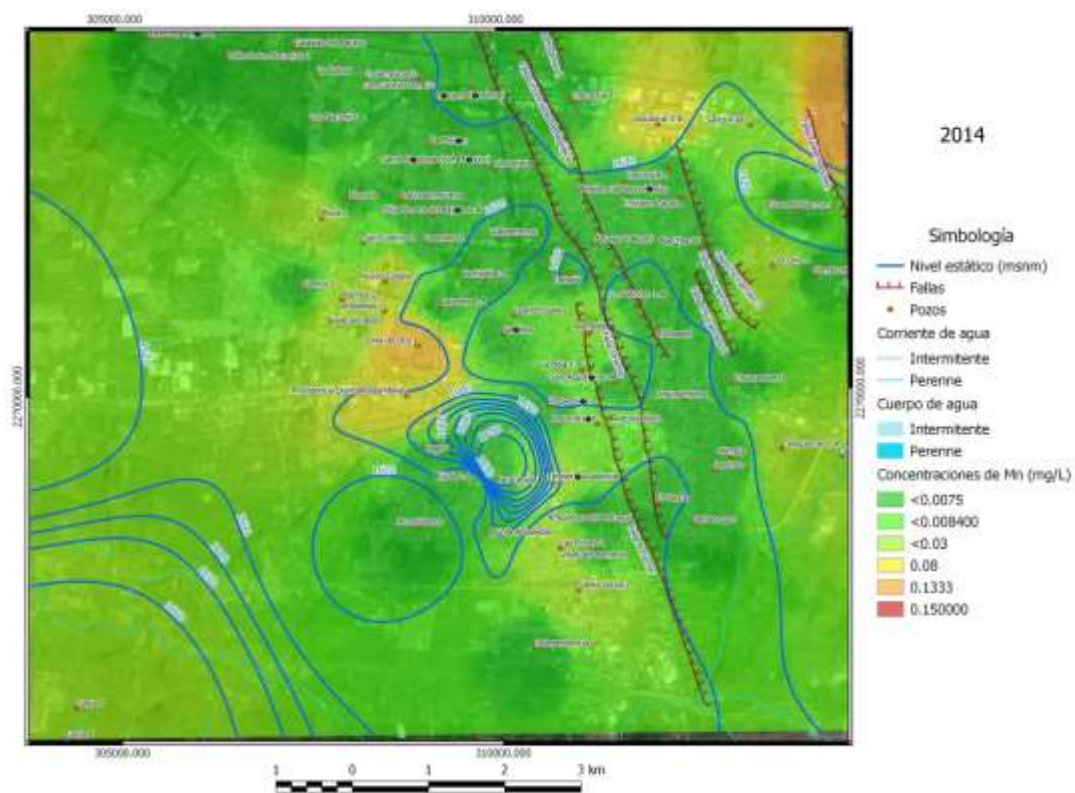
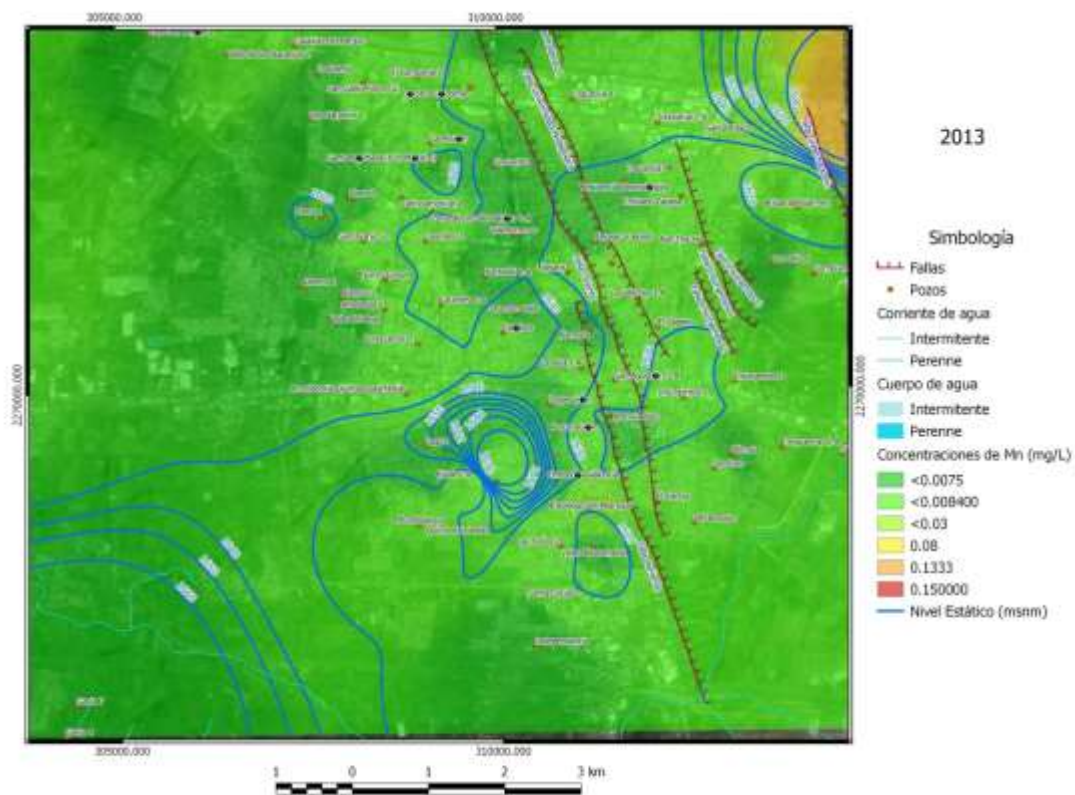


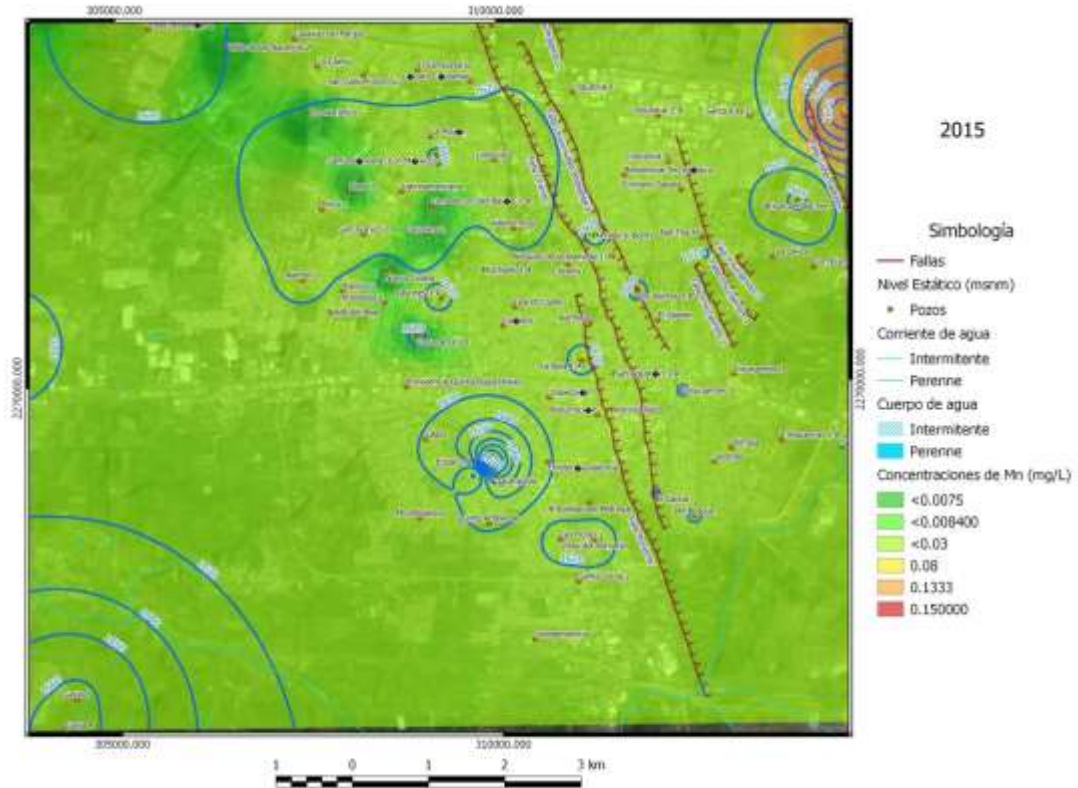
Hierro



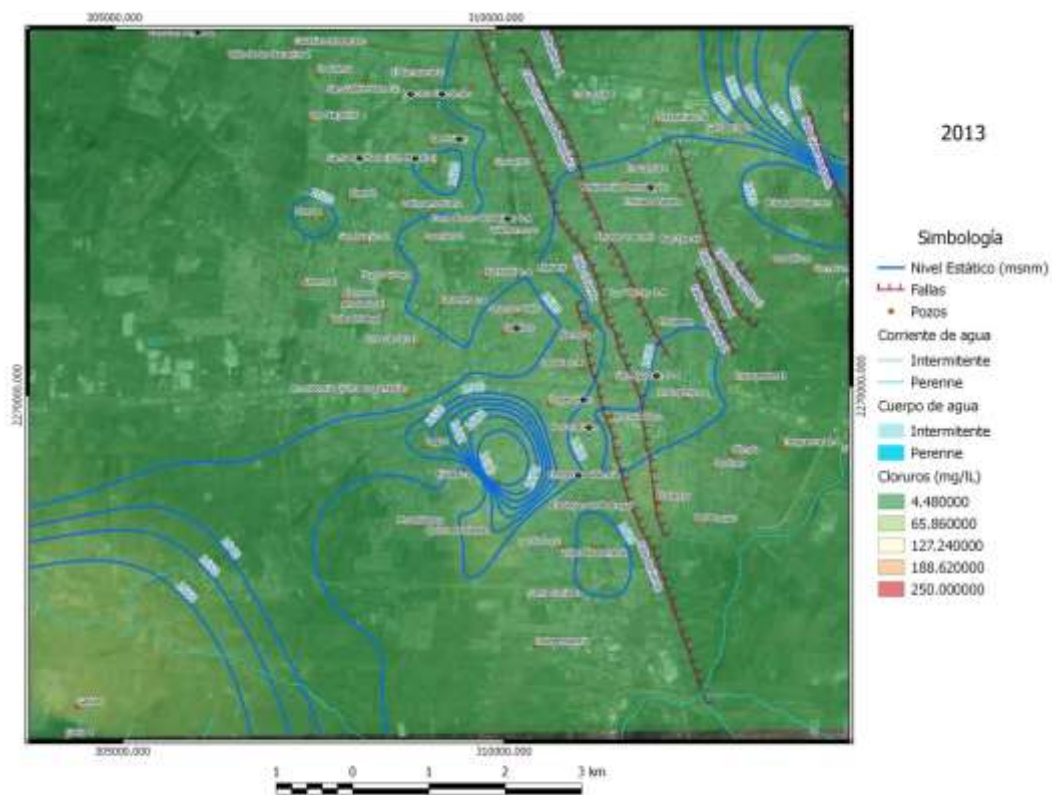


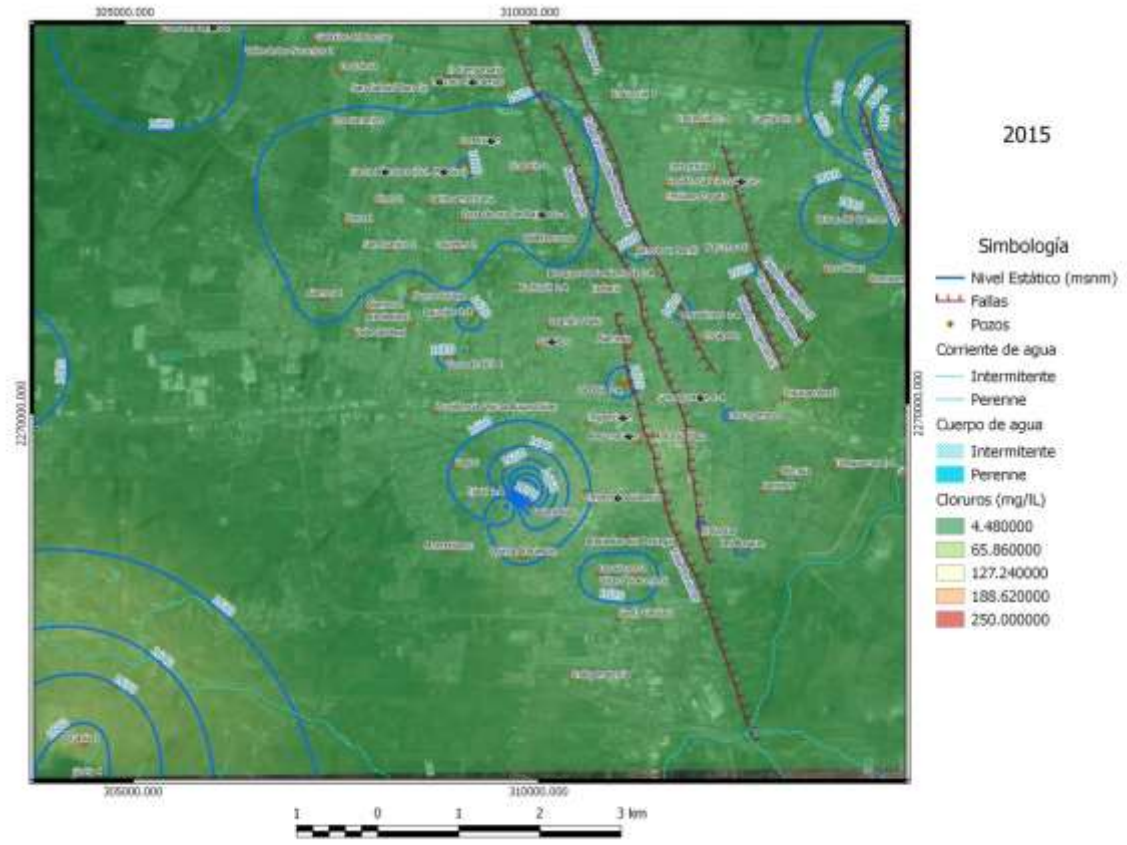
Manganeso



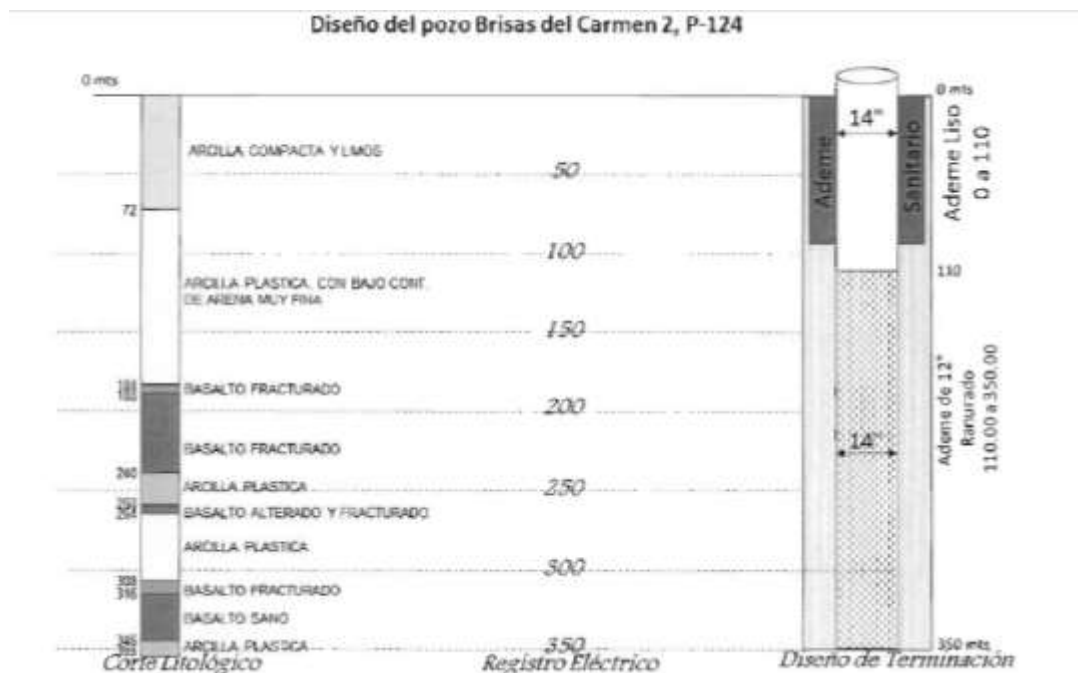
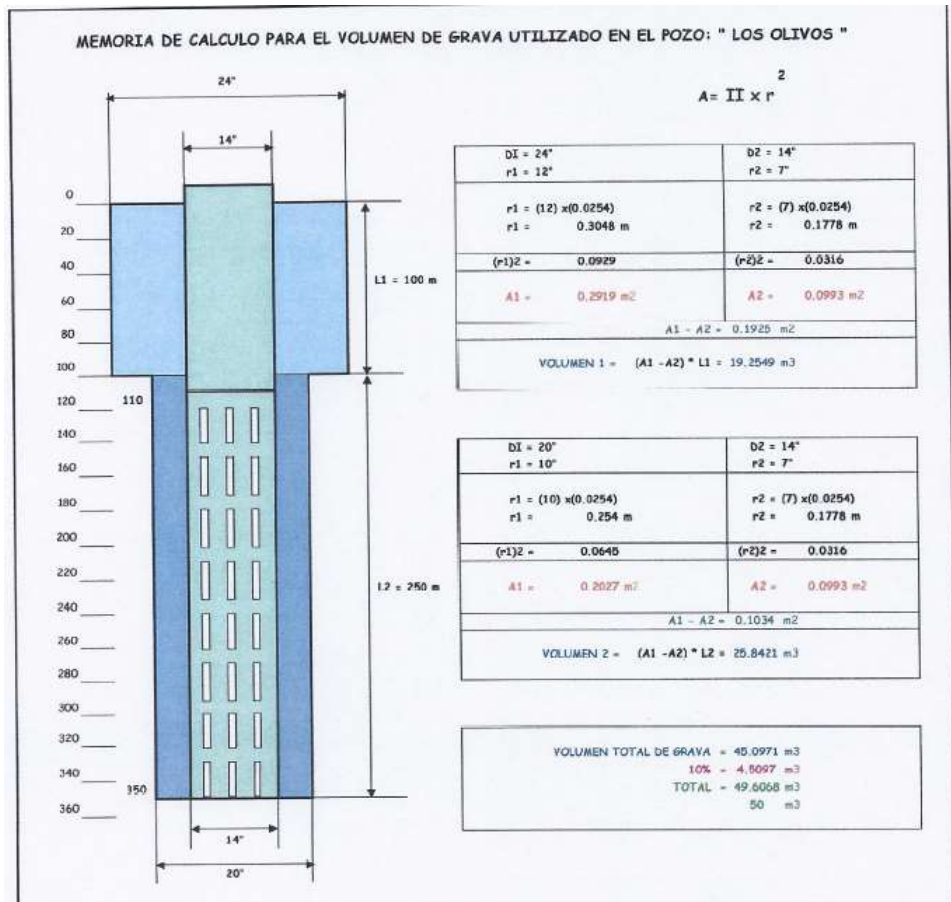


Cloruros



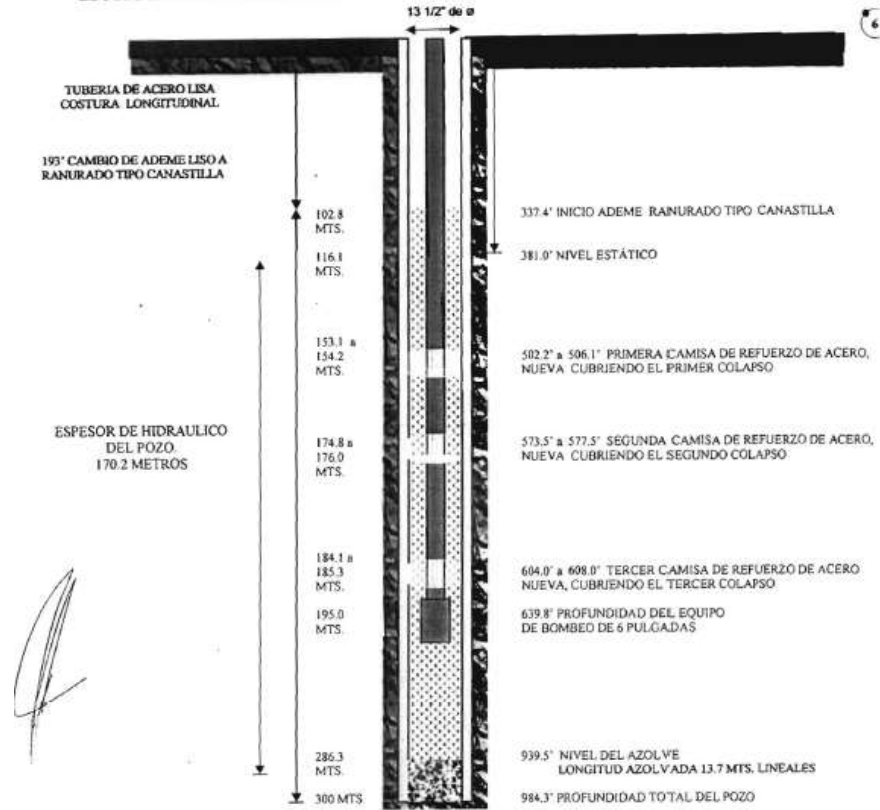


Anexo 3. Características constructivas de los pozos



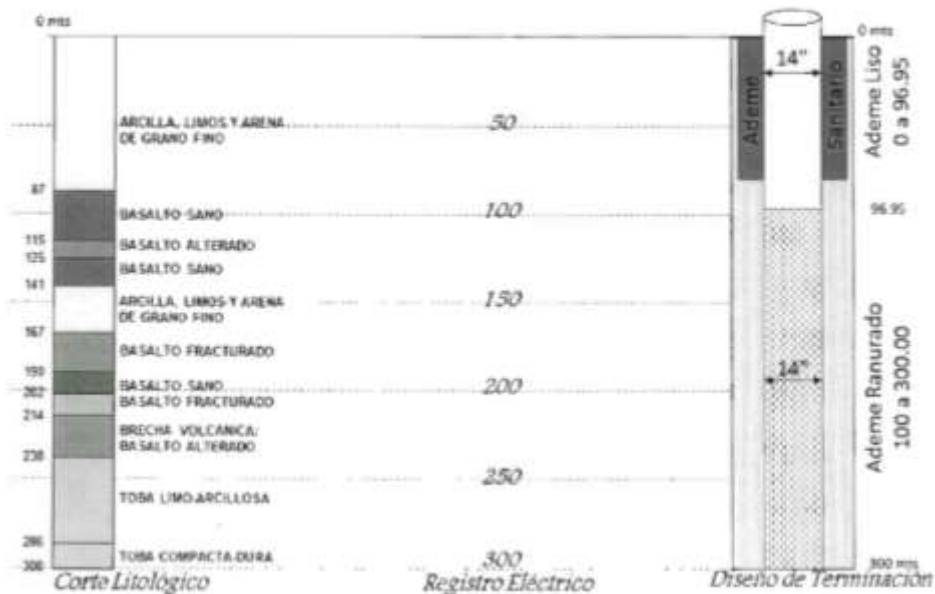
**CORTETE ESQUEMATICO DEL POZO LA CALESA PROPIEDAD DE JUMAPA
REHABILITACIÓN COLOCACIÓN 3 CAMISAS CUBRIENDO COLAPSOS 27-07-2011**

EL POZO SE ENCUENTRA EN BUENAS CONDICIONES (MEDIDAS FUERA DE ESCALA)

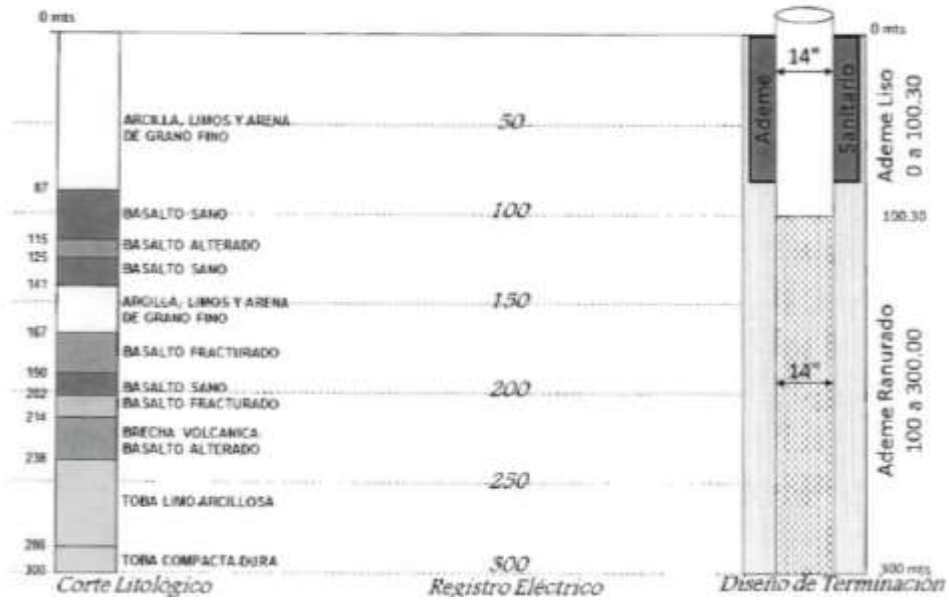


Características del Pozo

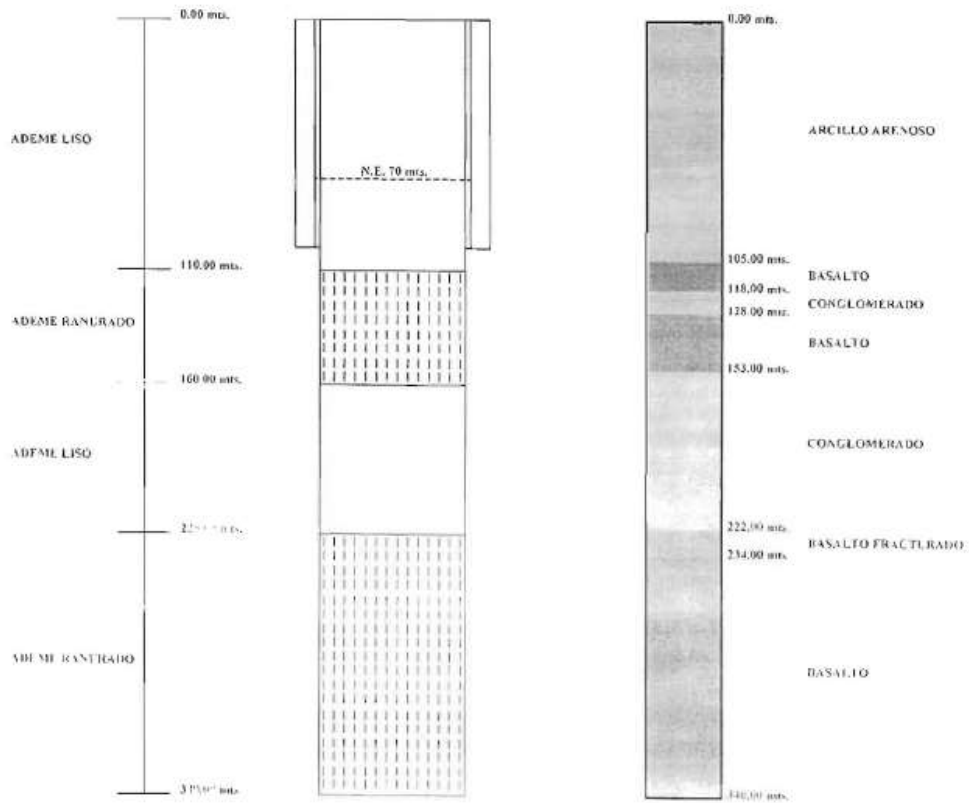
Diseño del pozo, Hacienda Don Gu, P., .



Características del Pozo Diseño del pozo, El Vergel, P., .



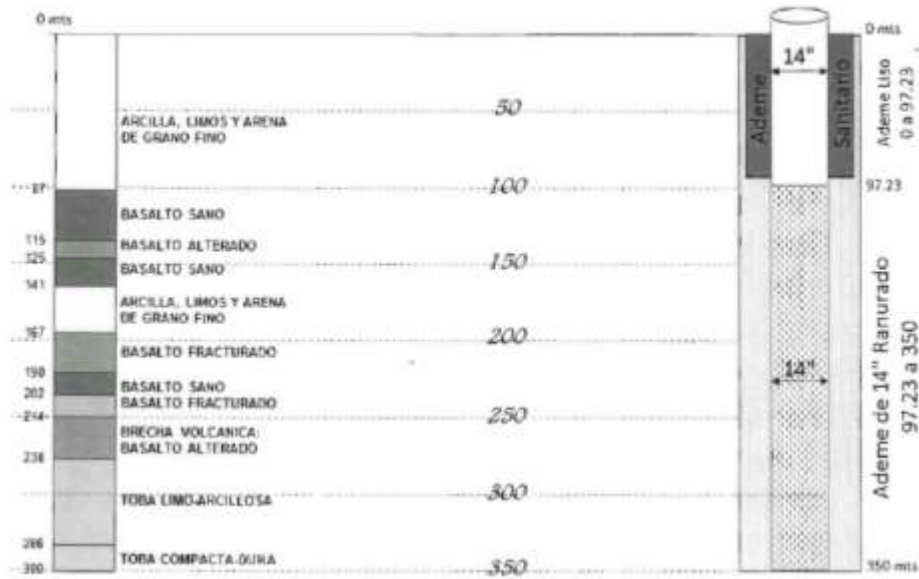
POZO HACIENDA NATURA



Características del Pozo Diseño del Pozo La Herradura, P-96

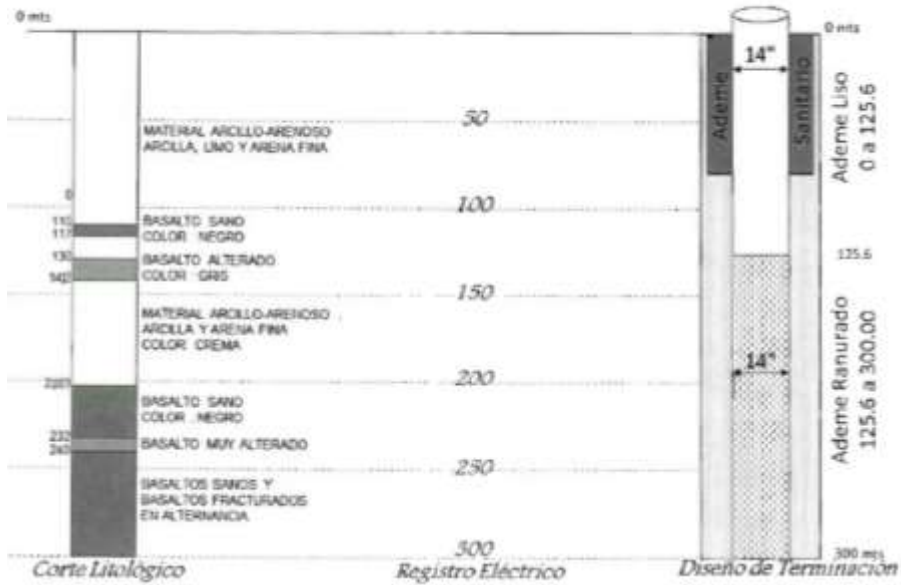


Características del Pozo Diseño del pozo, Los Naranjos, P-82, .



Características del Pozo

Diseño del Pozo Valle de los Naranjos 1, P-



VILLAS DE ELGUERA

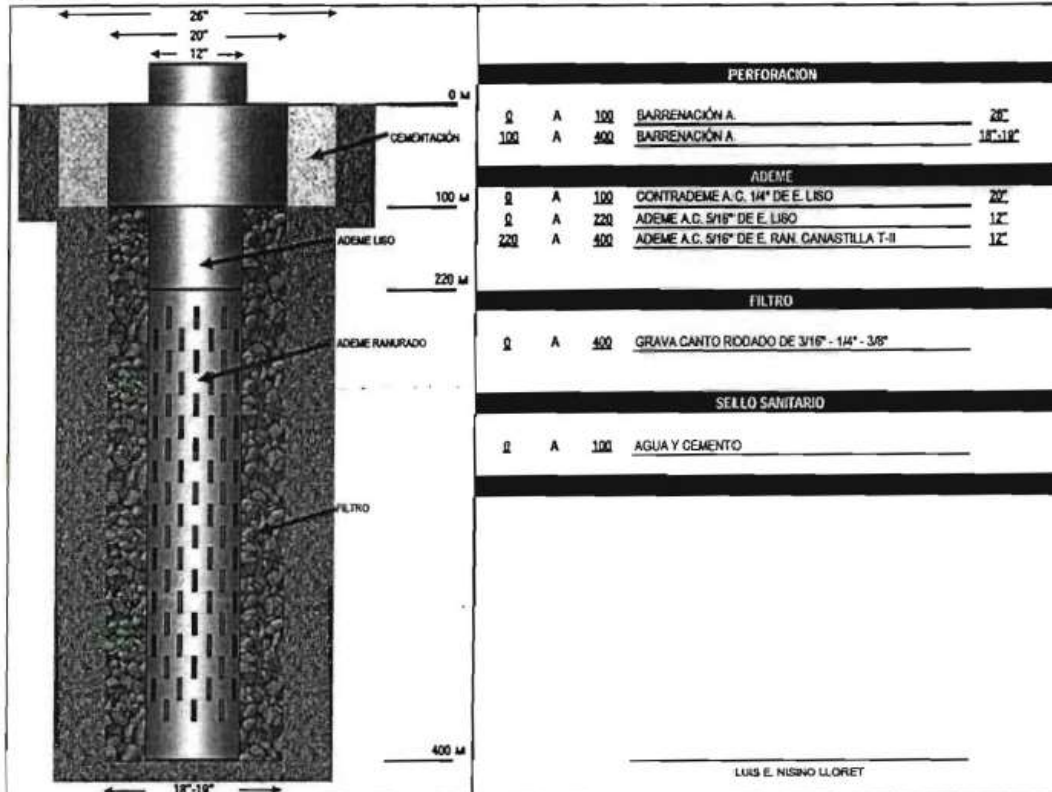
PABSA

MUNICIPIO:

ESTADO:

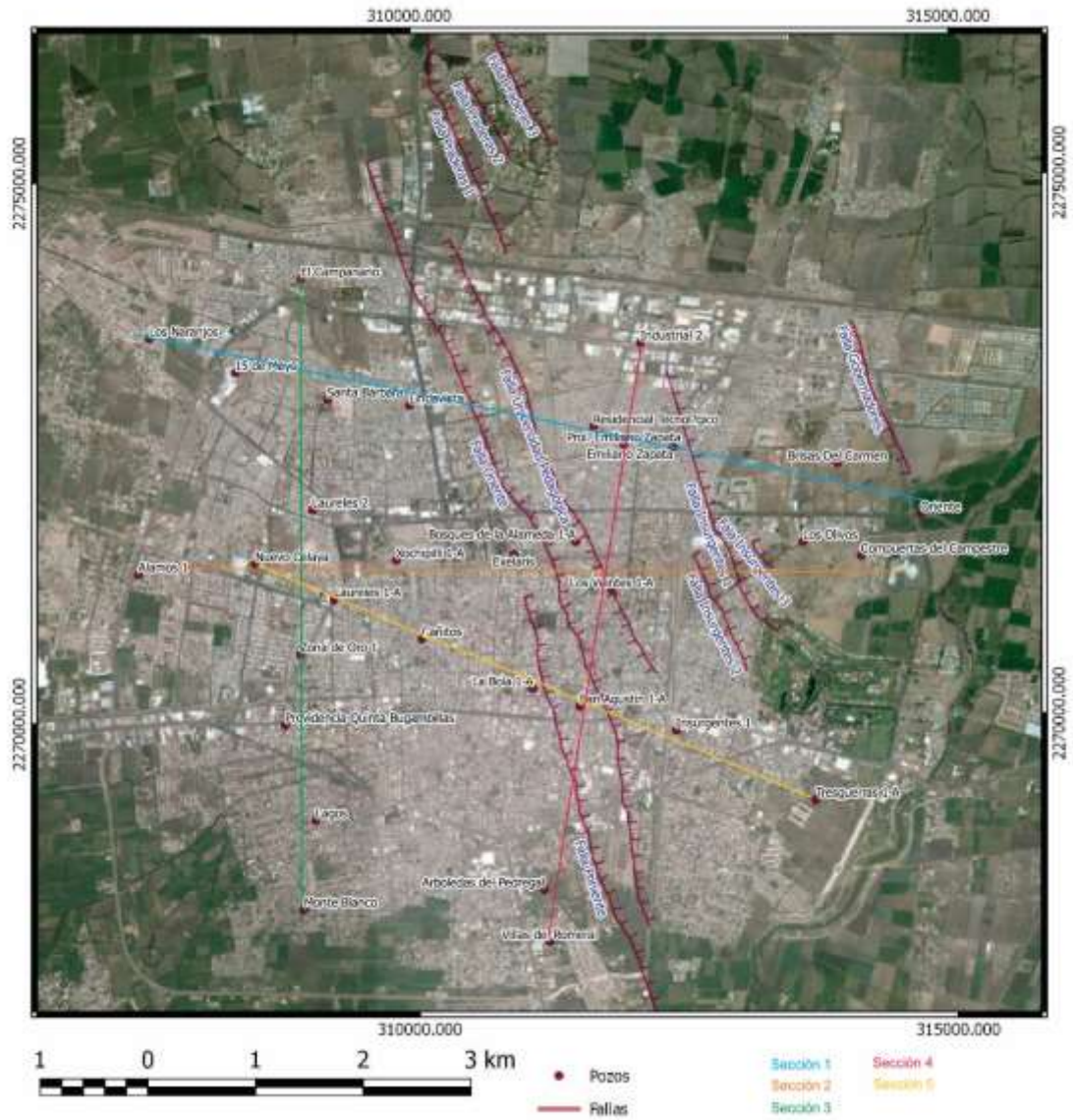
CELAYA

GUANAJUATO

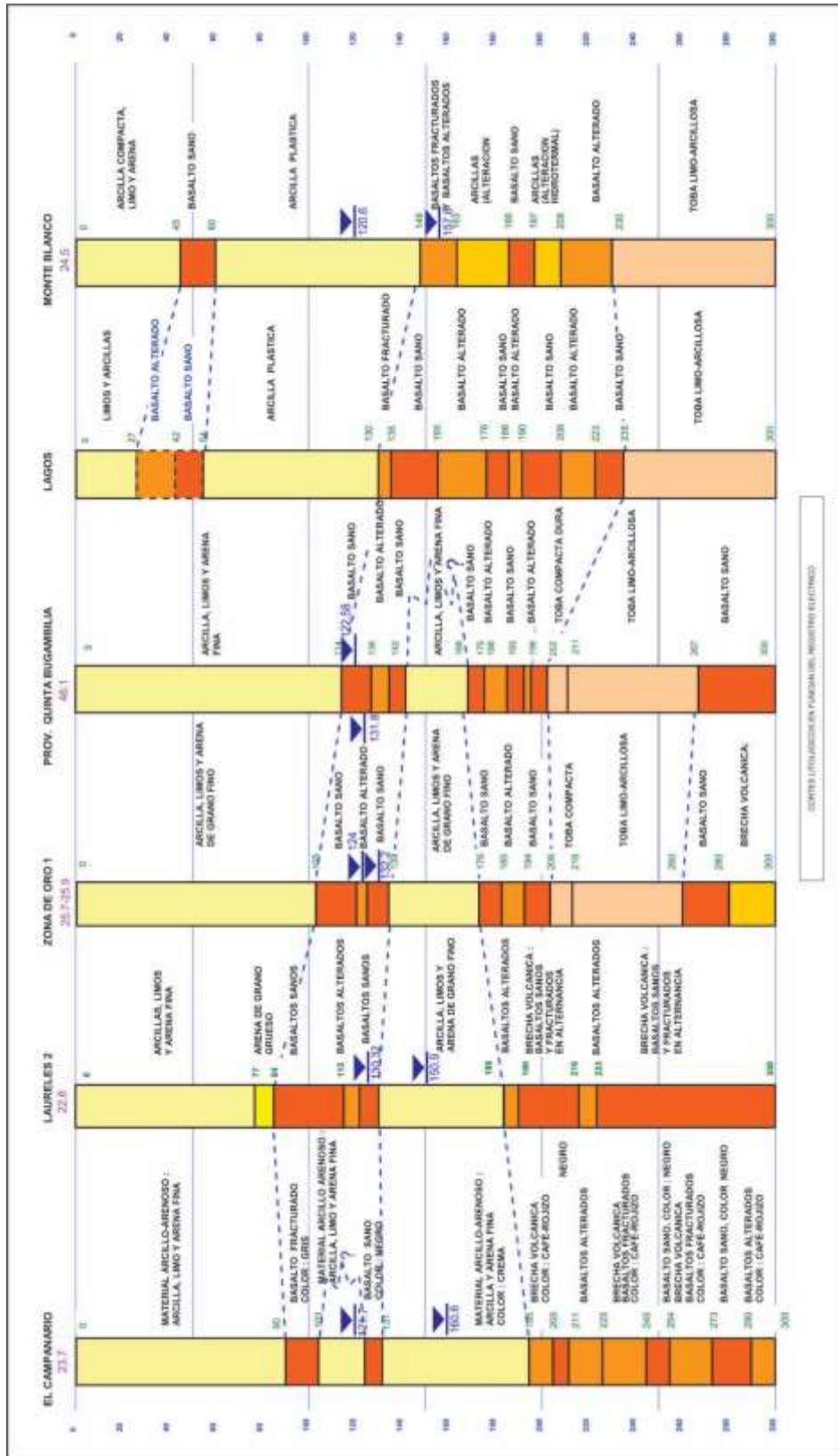


Anexo 4. Secciones

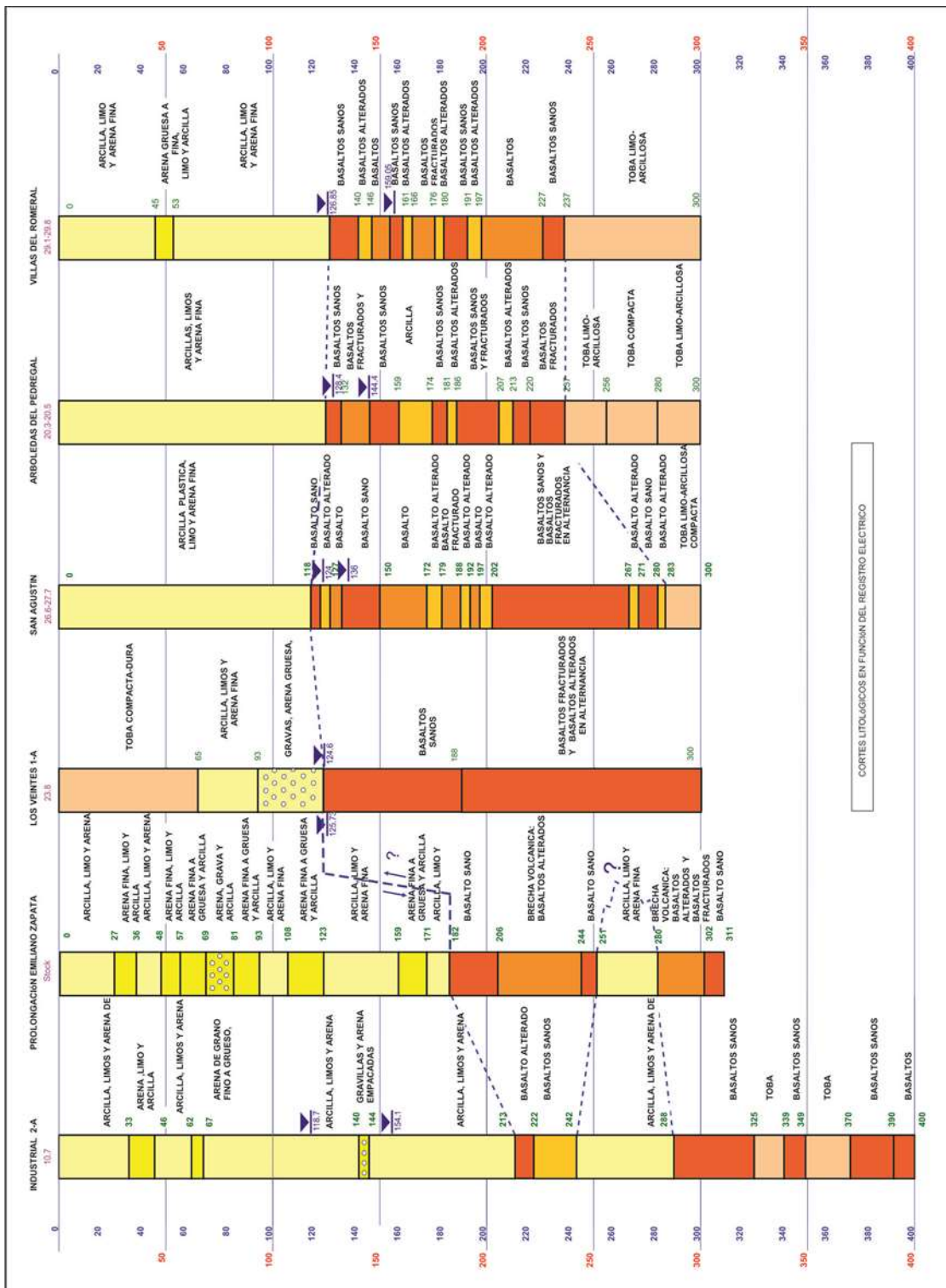
Ubicación de las secciones



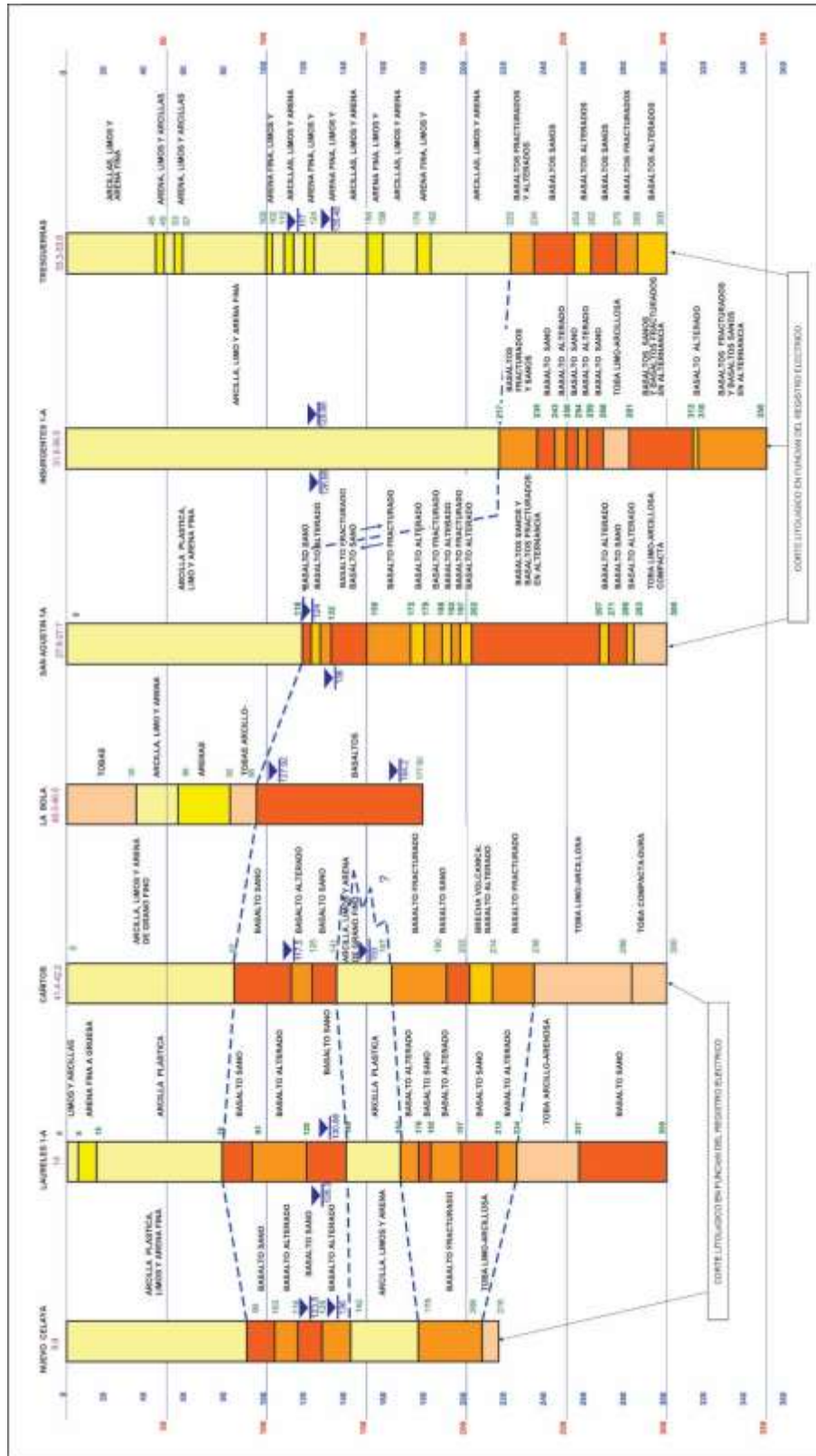
Sección 3



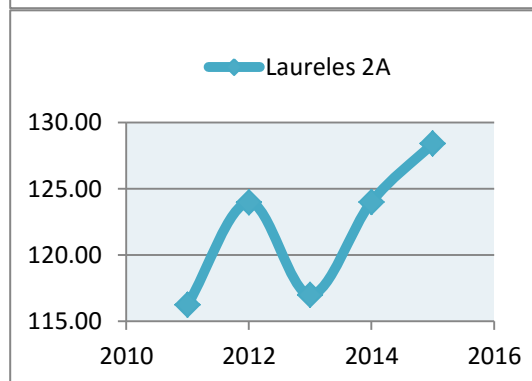
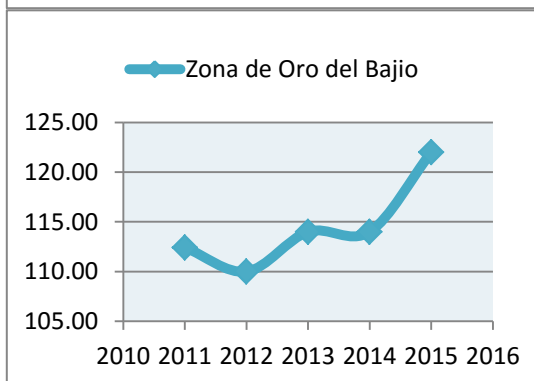
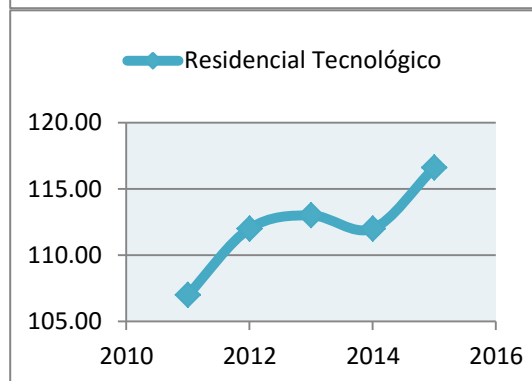
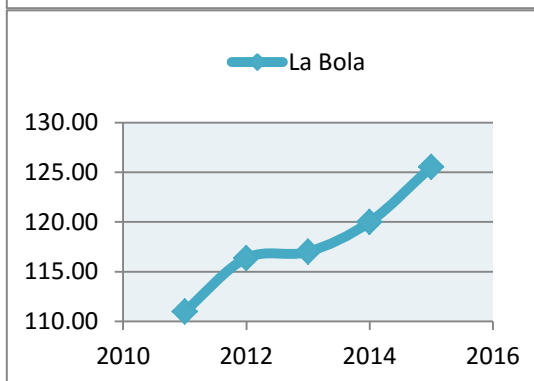
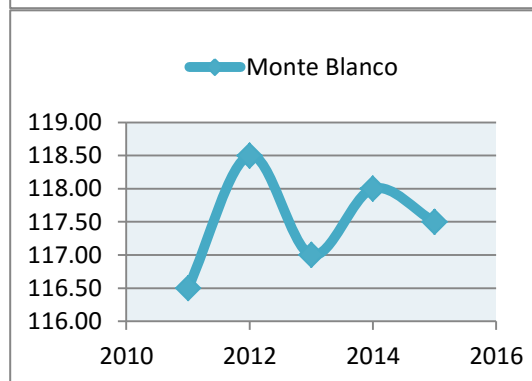
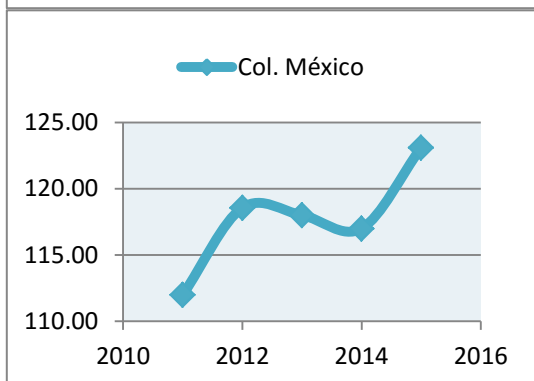
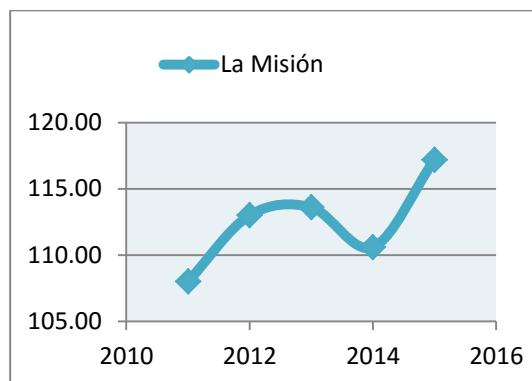
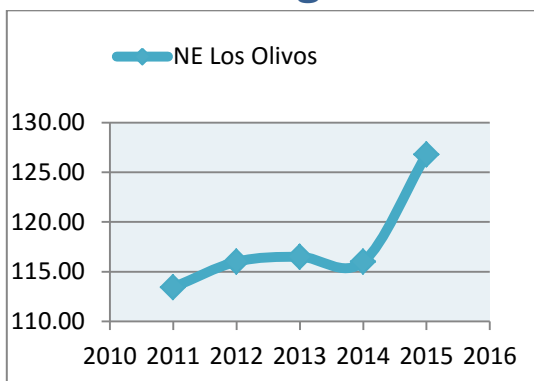
Sección 4

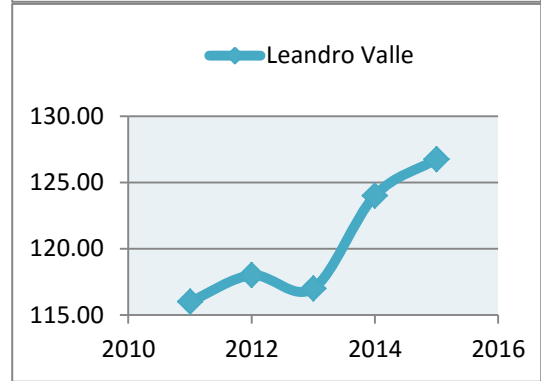
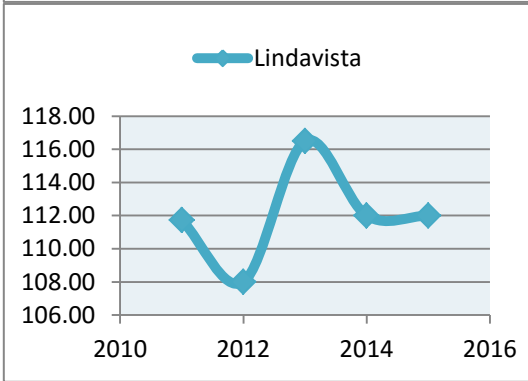
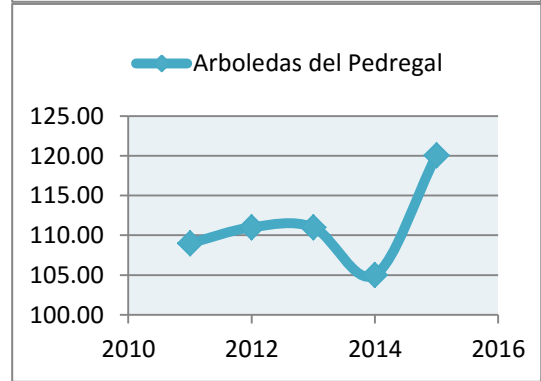
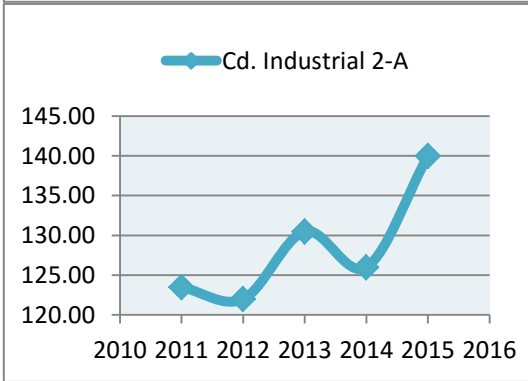
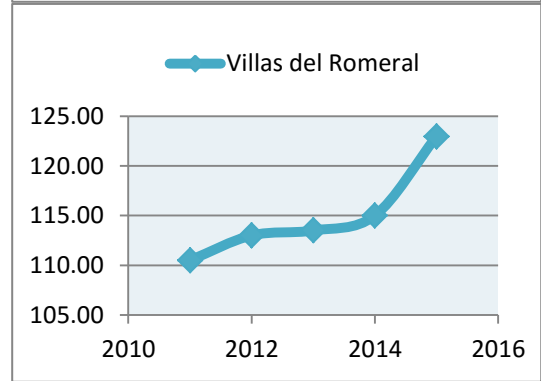
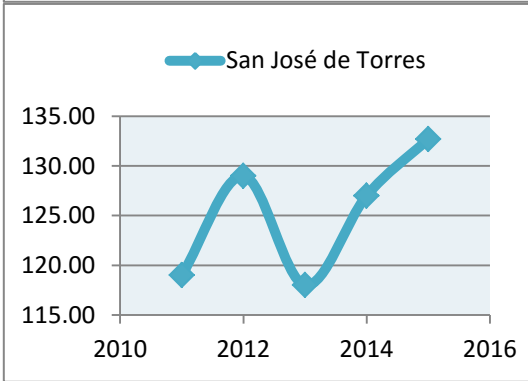
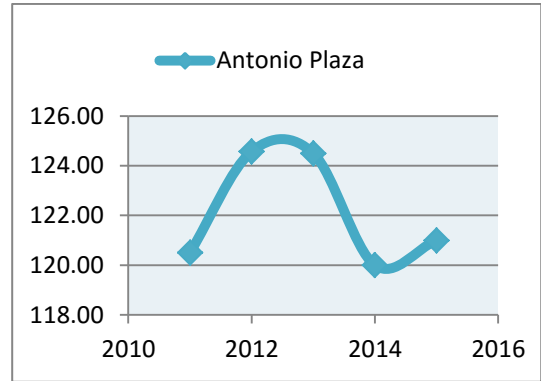
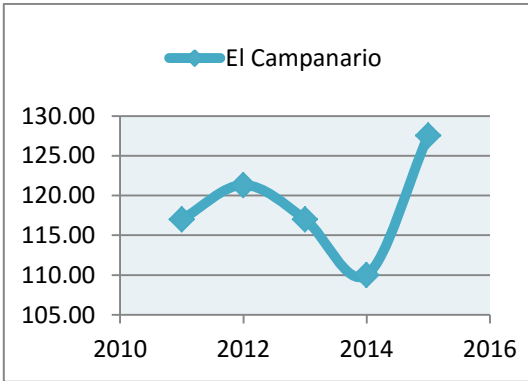


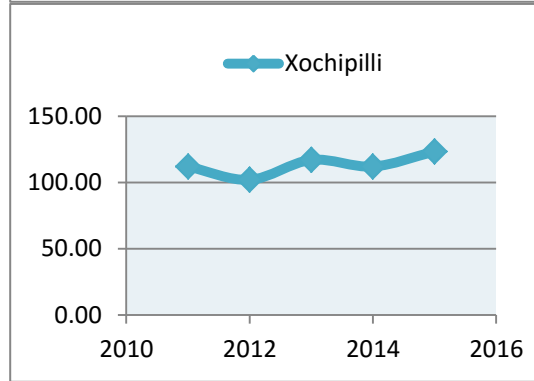
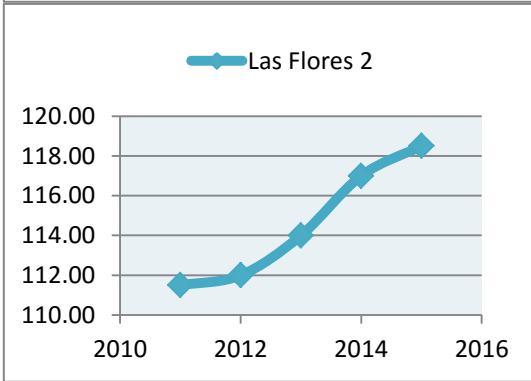
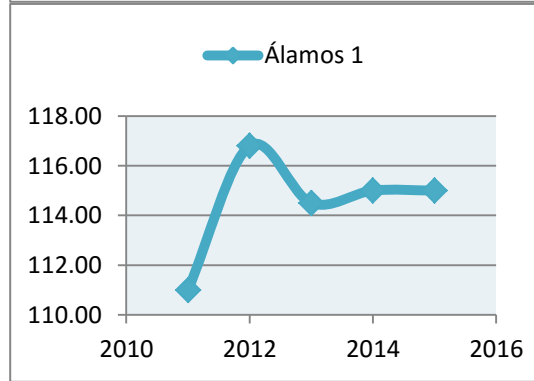
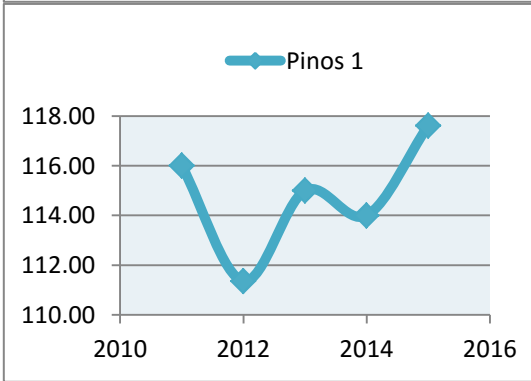
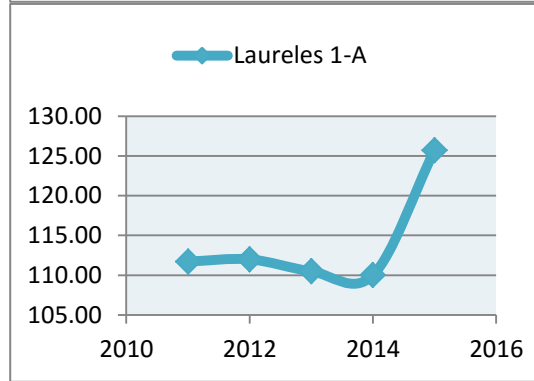
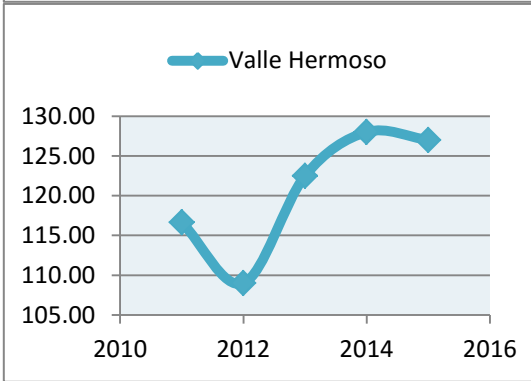
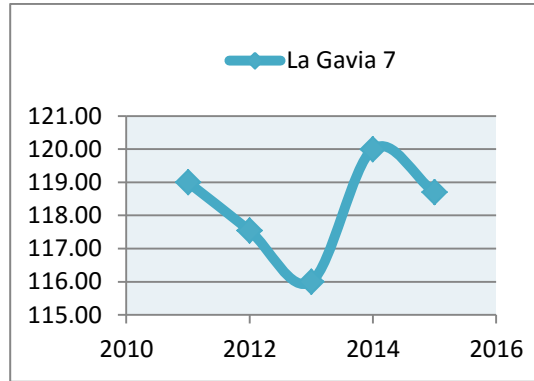
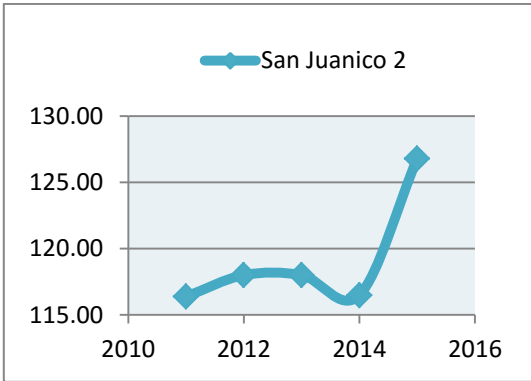
Sección 5

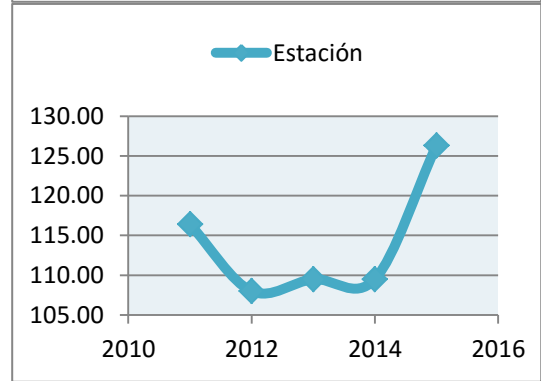
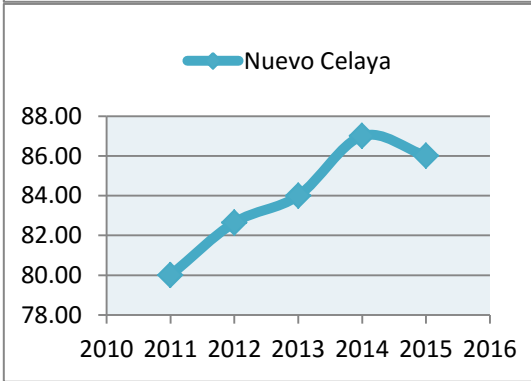
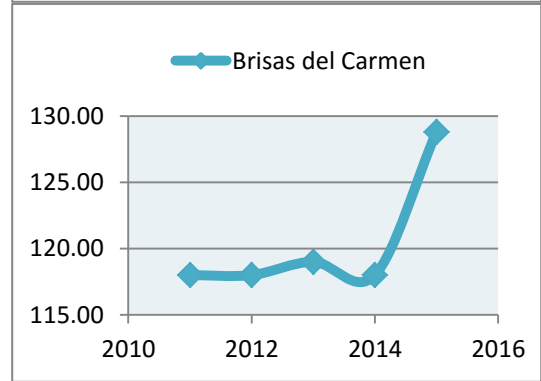
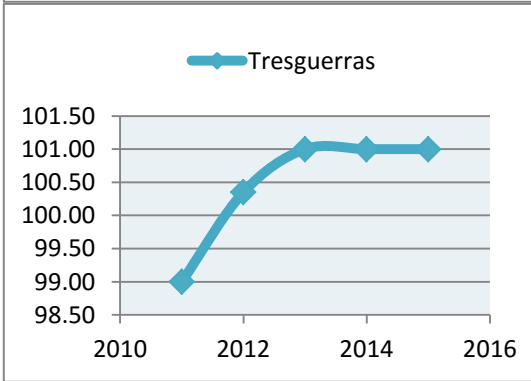
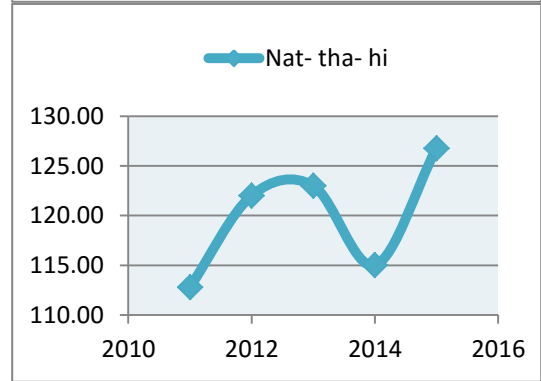
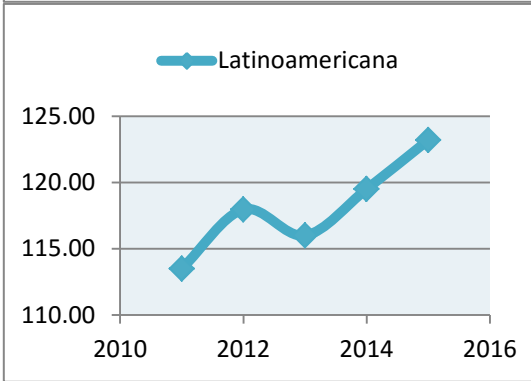
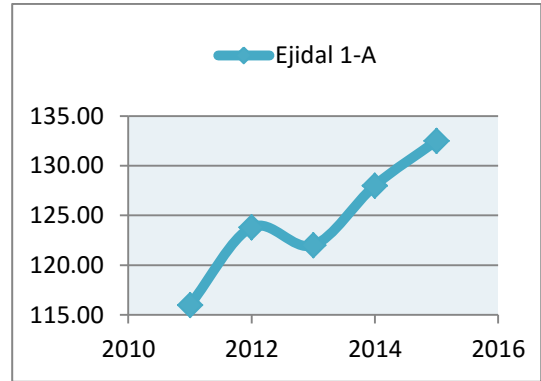
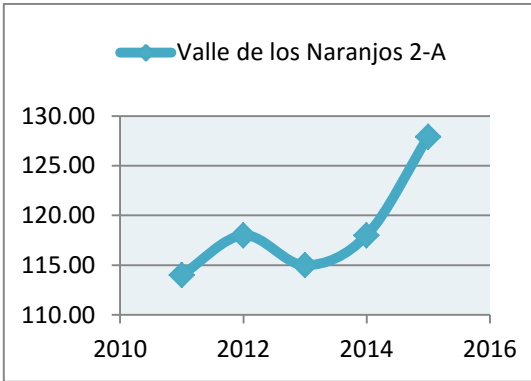


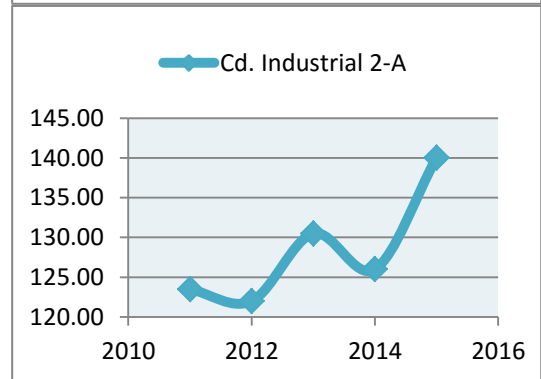
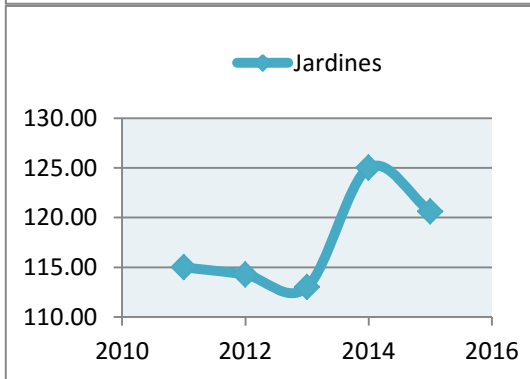
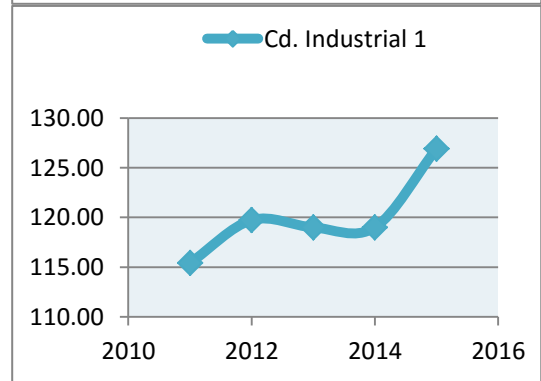
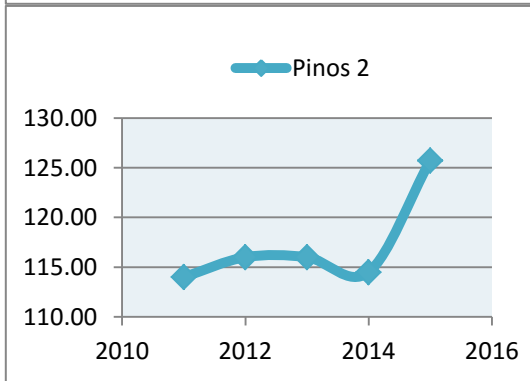
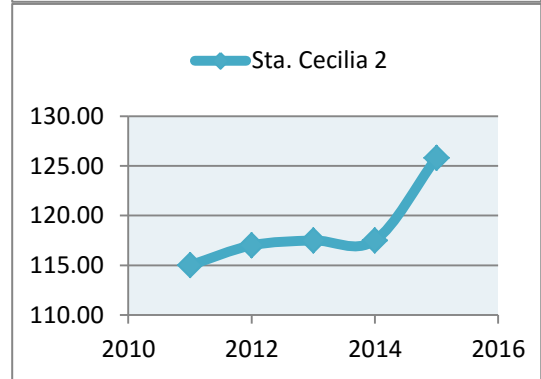
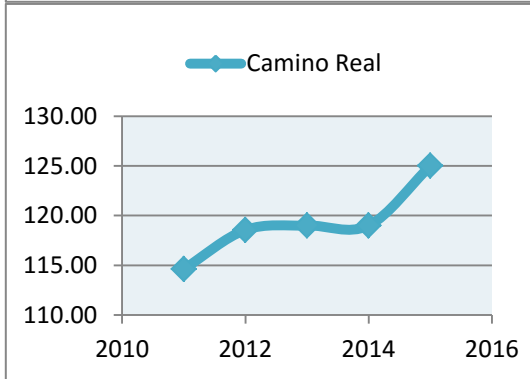
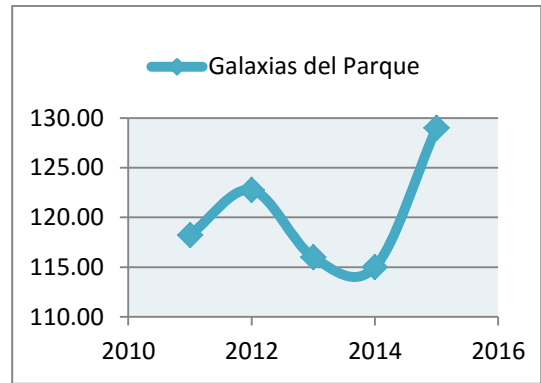
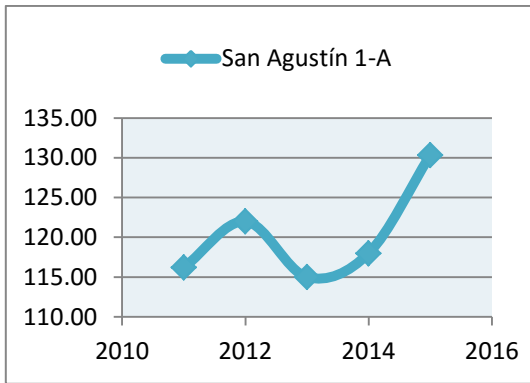
Anexo 5. Hidrógrafos del nivel estático

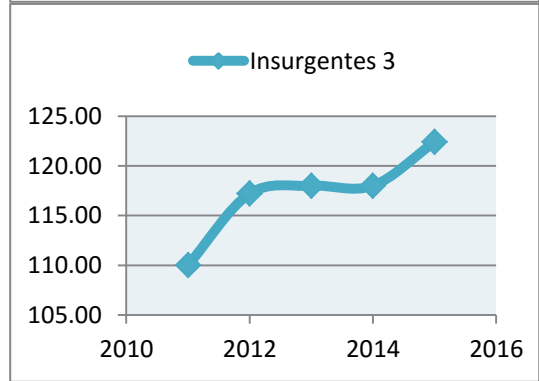
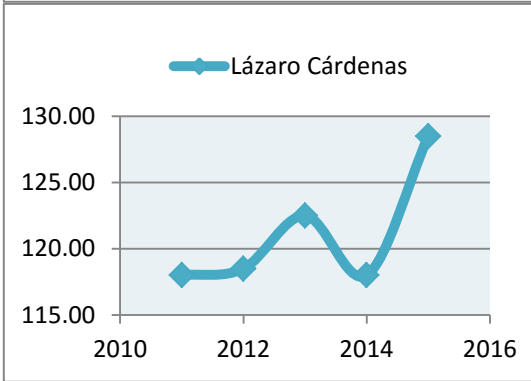
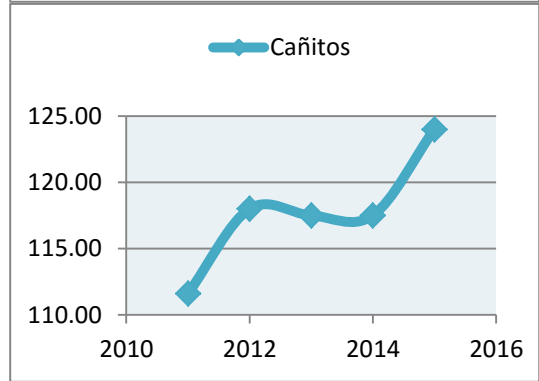
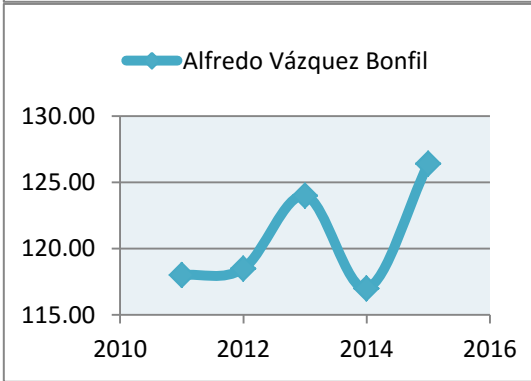
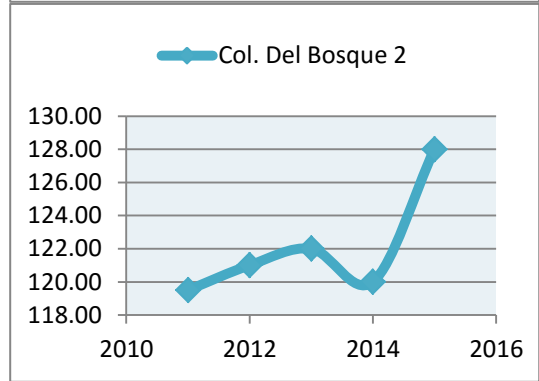
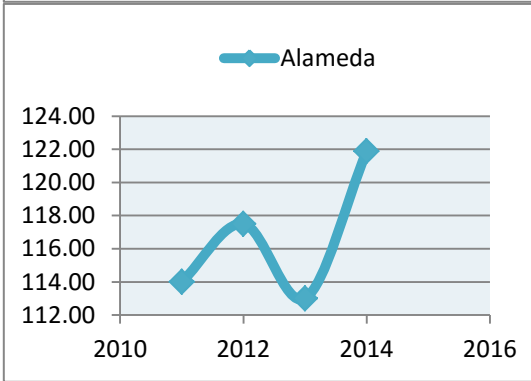
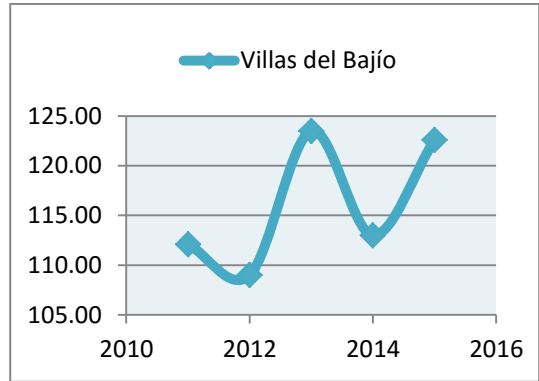
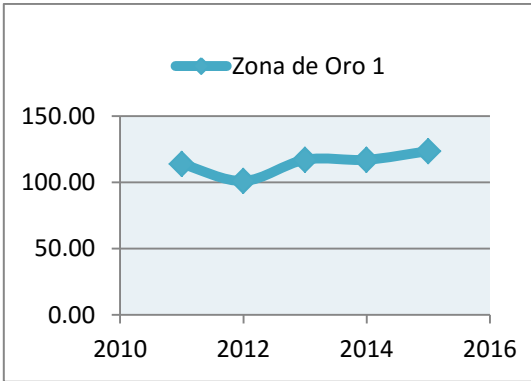


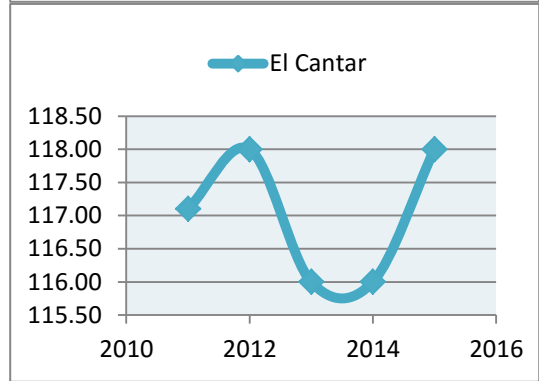
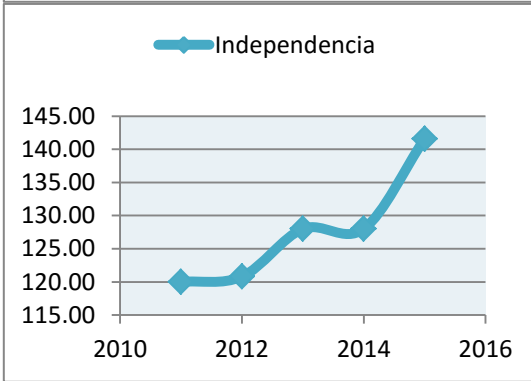
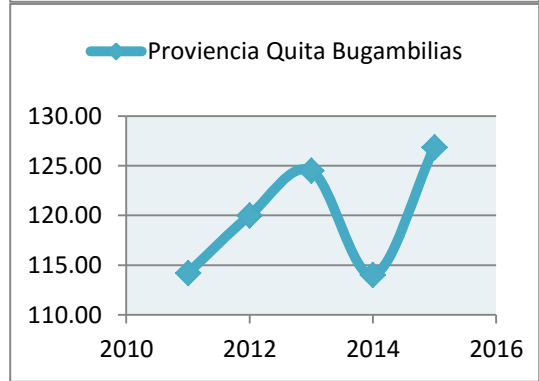
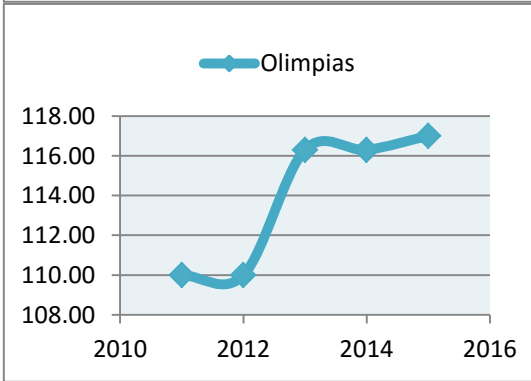
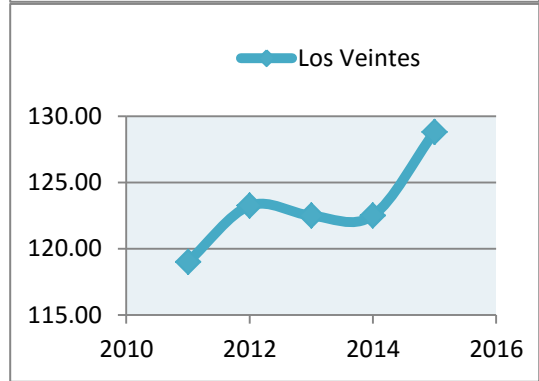
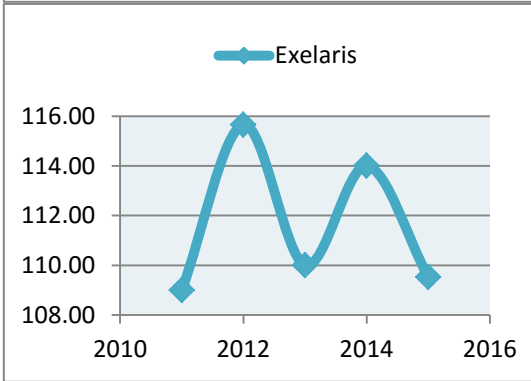
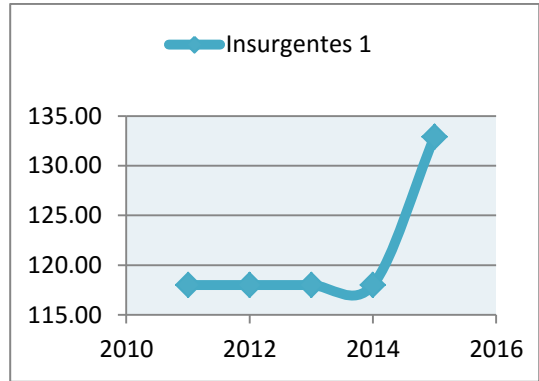
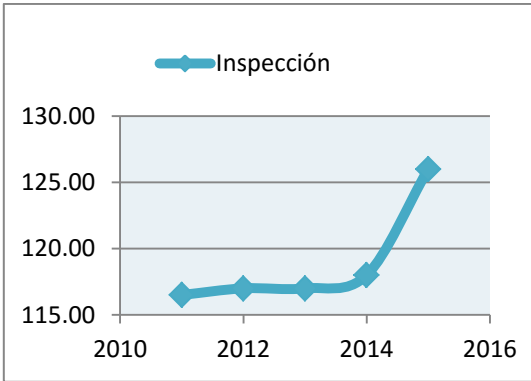


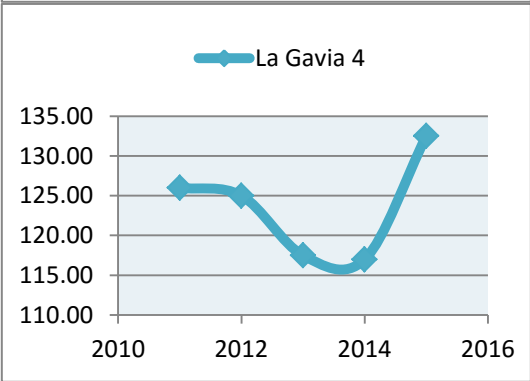
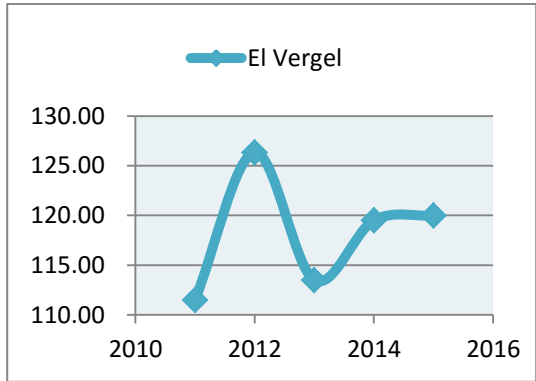
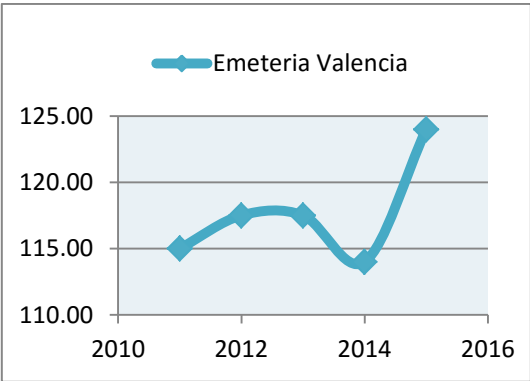




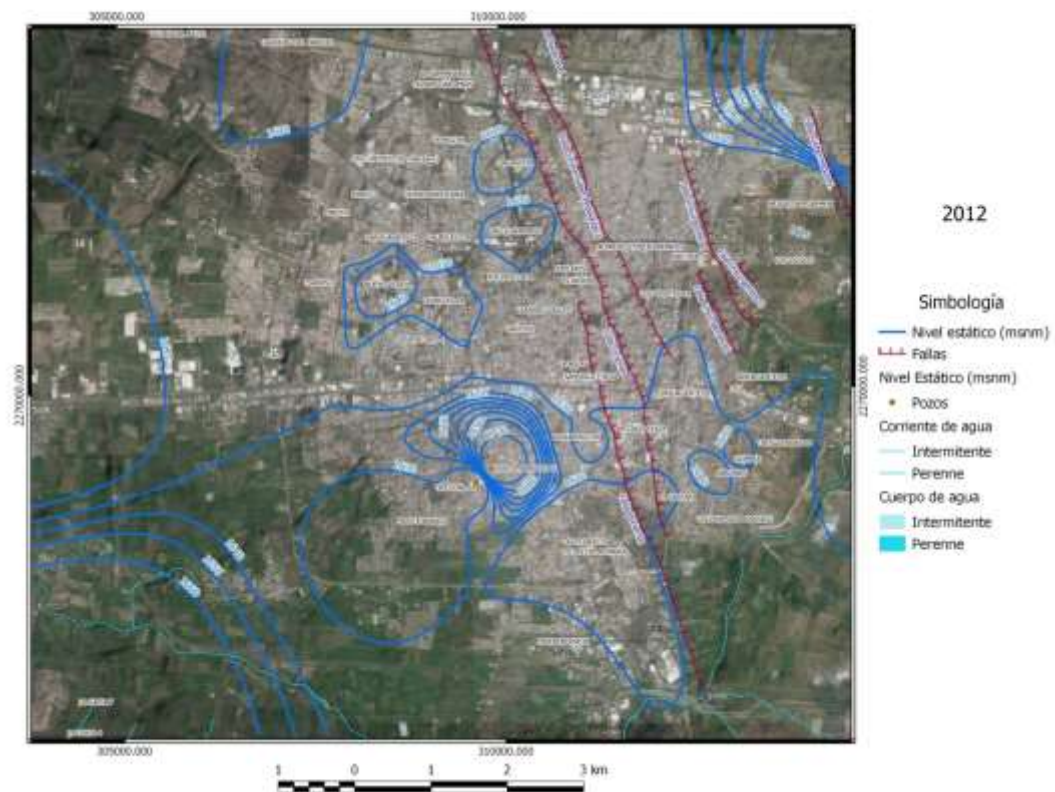
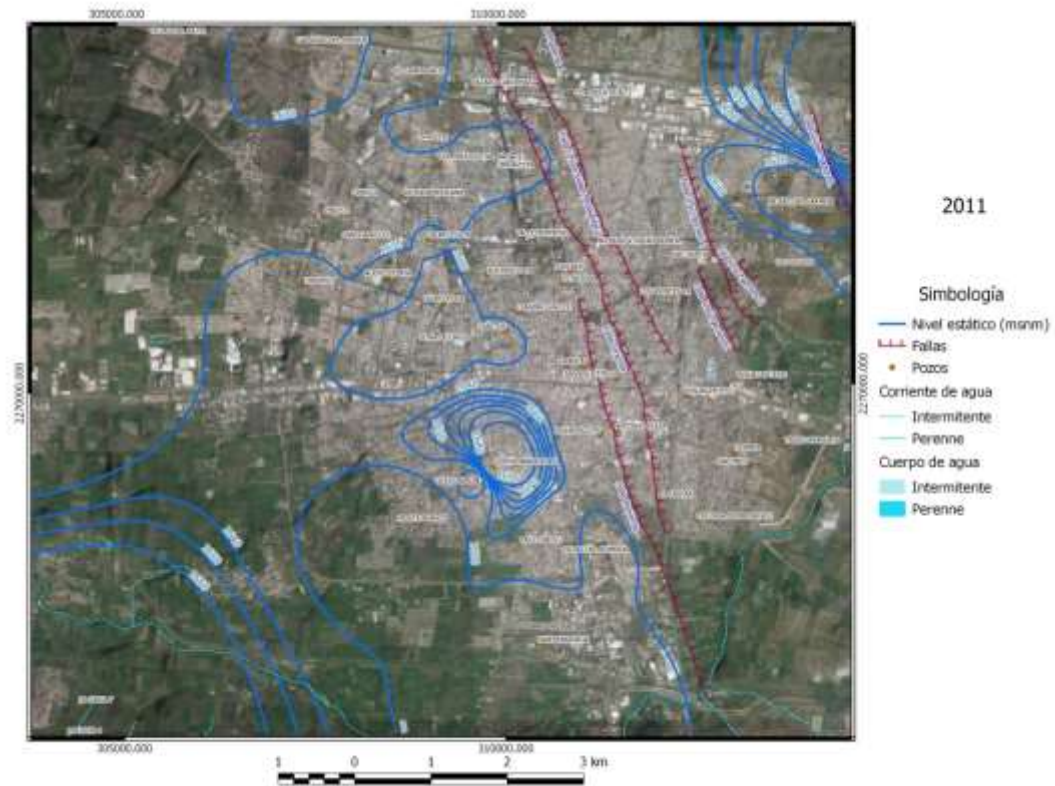


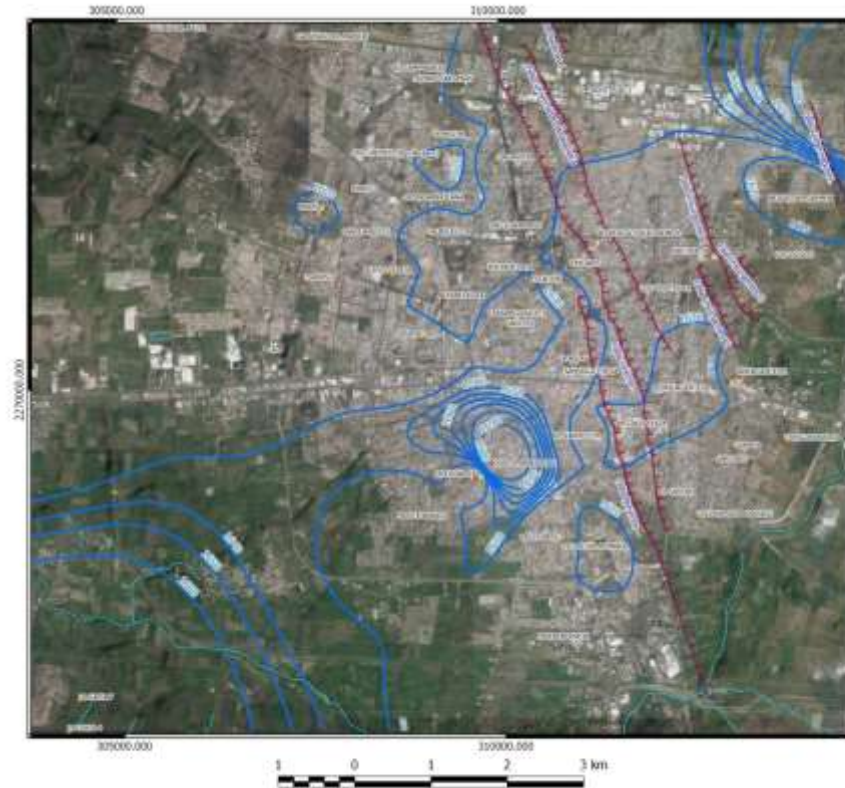






Anexo 6. Configuraciones del nivel estático







2015

Simbología

- Nivel estático (msnm)
- - - Fallas
- Pozos
- Cuerpo de agua
- Intermittente
- Perenne
- Cuerpo de agua
- Intermittente
- Perenne

Anexo 7. Gráficas de Temperatura (°C) por año

