

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**EVALUACIÓN DEL NIVEL PIEZOMETRICO DEL ACUÍFERO 0510 SALTILLO-
RAMOS ARIZPE AL CIERRE DEL AÑO 2018.**

POR:

JORDY COELLO CRISTINO

TESIS

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

NOVIEMBRE DEL 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**EVALUACIÓN DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO 0510 SALTILLO-RAMOS
ARIZPE AL CIERRE DEL AÑO 2018.**

POR:

JORDY COELLO CRISTINO

**QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL**

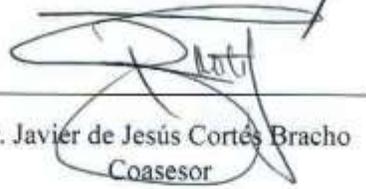
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR



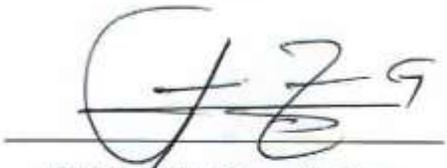
Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna
Asesor principal



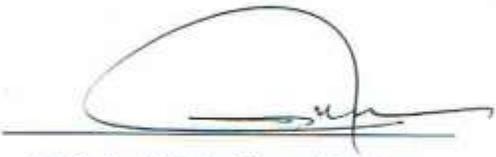
Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Coasesor



Dr. Santos Sáenz Delgado
Coasesor externo



M. C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coasesor



M.C. José Carlos Rivera Martínez
Coasesor externo



M. C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

“LO QUE SABEMOS ES UNA GOTA DE AGUA;
LO QUE IGNORAMOS UN VASTO OCÉANO”

ISAAC NEWTON

(1642 – 1727)

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero agradecer a **Dios Padre** por haberme dado la sabiduría, la salud y sobre todo por ser mi guía en estos Cinco años en la universidad.

A todo el pueblo de México, ya que con el pago de sus impuestos es posible la educación pública.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por haberme albergado en sus instalaciones, por brindarme los servicios necesarios para mi estancia en esta magnífica universidad y por darme la oportunidad de demostrar que puedo ser alguien digno de representar a esta casa máxima de estudios.

A mis padres **Lauro Coello Atilano y Fulgencia Cristino Fuentes** ya que sin ellos yo no sería nada, a mi padre por su apoyo económico e incondicional amistad. Por guiarme en el camino del bien, a mí madre por la educación que me dio y por transmitir hacia mí, sus sabios consejos que me ayudaron a tomar decisiones correctas en la vida, gracias viejos los quiero mucho.

Al **Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna** por sus conocimientos impartidos en clase tanto teóricos como prácticos y sobre todo por sus sabios consejos y lo más importante por haber colaborado en este trabajo al guiarme en el desarrollo del proyecto y por su asesoría.

Al **Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho** por sus sabios consejos que alguna vez me dio cuando era estudiante y por sus conocimientos impartidos en clase que fueron fundamentales para que este trabajo se realizara gracias Doc.

Al **Mc. Luis Rodríguez Gutiérrez** por sus consejos y más que nada por ser un buen amigo.

Al **Dr. Santos Sáenz Delgado** por su acertada corrección y supervisión de este documento

Al. M.C. José Carlos Rivera Martínez por su alto nivel de preparación en esta área y que depósito en mi persona sus observaciones.

DEDICATORIAS

Dedico esta obra a mis padres **Lauro Coello Atilano** y **Fulgencia Cristino** Fuentes con mucho cariño ya que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas, y por haberme apoyado incentiva y económicamente.

Dedico también esta obra a mis abuelos **Pedro Coello Cortes (†)**, **Rosa Alva Atilano (†)** que siempre me introdujeron en el mundo laboral del campo.

A mis **excompañeros de clase, de la generación CXXVI** gracias chicos por haberme apoyado cuando más lo necesitaba los extrañare, pero espero verlos pronto.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS	II
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VII
Índice de graficas	VIII
Resumen	IX
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	2
Justificación	2
OBJETIVOS	3
General:	3
Específico:	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	4
Ciclo hidrológico	4
Agua subterránea	5
Cuenca hidrográfica	6
Acuífero	7
Tipos de acuífero	8
Acuífugo	10
Acuícludo	10
Acuitardo	10
Recarga de un acuífero	11
Nivel Piezométrico	13
EXPLOTACIÓN Y SOBREPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS LIBRES	15
La situación del agua en la población actual	15
Perforación de pozos	16
Bombeo excesivo	18
Abatimiento	19
Nivel de recuperación	20
Recuperación	20
Curva de abatimiento	20
Curva de recuperación	21
	III

Balance de cuenca	21
MÉTODOS PARA EVALUAR EL NIVEL PIEZOMÉTRICO EN POZOS	23
Métodos indirectos	23
Método de Theis	24
Método y ley de Darcy para un acuífero libre.	26
Métodos directos	30
Sondas	30
RASGOS DEL ACUÍFERO	32
Ubicación	32
Población	34
Clima	34
Temperatura	34
Localización fisiográfica	34
Composición geológica y estructural	35
Tipos de acuíferos presentes	36
LA CIUDAD DE SALTILLO, COAHUILA, EN TÉRMINOS HÍDRICOS.	39
Fundación	39
La Gestión del Agua en Saltillo.	40
Historial de la explotación del agua del subsuelo en Saltillo con respecto a su desarrollo económico y productivo.	40
Aspectos de la Problemática del Agua en la Ciudad de Saltillo.	41
Estudios previos sobre la Situación Hídrica en Saltillo.	42
Aspectos hidrogeológicos	43
MATERIALES Y MÉTODOS	46
Localización	46
Método	48
Descripción de la metodología	50
Materiales	51
Desarrollo del proyecto	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
Conjunto de pozos SAARA	54
Conjunto de pozos seleccionados para el estudio	59
Aforos de pozos seleccionados	61
Nivele estático y dinámico de cada pozo con respecto al tiempo	62

Curvas de nivel estático y dinámico correspondientes de cada año	63
Línea piezométrica 2014-2018	66
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	68
La precipitación en los últimos años	68
El aumento de la población	70
Comparación de curvas e isoniveles por periodo de tiempo	73
NE 2014 - 2016	73
NE 2014 – 2018	74
ND 2014 – 2016	75
ND 2014 – 2018	76
CONCLUSIONES	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
Bibliografía complementaria no citada	82

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico del agua	4
Figura 2. Formación de agua en el suelo	5
Figura 3. Cuenca hidrográfica	6
Figura 4. Representación de un acuífero subterráneo	7
Figura 5. Diferentes formaciones geológicas	8
Figura 6. Diferentes tipos de acuífero	10
Figura 7. Esquematación del concepto general del nivel piezométrico	13
Figura 8. Formación de un cono de depresión en el nivel freático alrededor de un pozo	17
Figura 9. Descenso del nivel freático debido al bombeo excesivo	18
Figura 10. Abatimiento de un pozo en una prueba de bombeo	19
Figura 11. Abatimiento de un pozo	19
Figura 12. Recuperación de un pozo después de una prueba de bombeo	20
Figura 13. Curva de abatimiento de un pozo	21
Figura 14. Curva de abatimiento obtenida por el método de Theis y su comparación con otros métodos	25
Figura 15. Descripción de la aplicación de la ley de Darcy en un acuífero libre	27
Figura 16. Descripción de un acuífero libre y parámetros	28
Figura 17. Sonda de medición	31
Figura 18. Introducción del cable de la sonda por el ADEME del pozo	31
Figura 19. Localización geográfica del acuífero 0510 Saltillo Ramos Arizpe	32
Figura 20. Acuífero 0510 Saltillo-Ramos Arizpe	33
Figura 21. Composición estructural del acuífero, sección Zapaliname	35
Figura 22. Composición estructural y dirección de flujo del agua, en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, sección Zapaliname	36
Figura 23. Composición estructural y descripción del acuífero presente en el valle de Saltillo-Ramos Arizpe.	37
Figura 24. Variación del nivel estático en las diferentes formaciones y acuíferos del acuífero 0510 Saltillo- Ramos Arizpe	38
Figura 25. Cambio del nivel estático en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe debido a la presencia de nuevos pozos y proyectados a futuro	39

Figura 26. Ciudad de Saltillo dentro del acuífero 0510 Saltillo-Ramos Arizpe	46
Figura 27. Formación geológica del acuífero	47
Figura 28. Medición del nivel estático y dinámico con la sonda diferencial	48
Figura 29. Sonda ocupada durante el estudio	51
Figura 30. Conjunto de pozos SAARA	58
Figura 31. Conjunto de pozos seleccionados	59
Figura 32. Nivel estático 2014	63
Figura 33. Nivel dinámico 2014	64
Figura 34. Nivel estático 2016	64
Figura 35. Nivel dinámico 2016	65
Figura 36. Nivel estático 2018	65
Figura 37. Nivel dinámico 2018	66
Figura 38. Nivel estático 2014-2016	73
Figura 39. Nivel estático 2014-2018	74
Figura 40. Nivel dinámico 2014-2016	75
Figura 41. Nivel dinámico 2014-2018	76
Figura 42. Comportamiento del nivel estático 2014	78
Figura 43. Comportamiento del nivel estático 3D 2018	78
Figura 44. Comportamiento del nivel dinámico 2014	79
Figura 45. Comportamiento del nivel dinámico 2018	79

Índice de tablas

Tabla 1. Coordenadas geográficas del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe	33
Tabla 2. Extracciones en el valle de saltillo	44
Tabla 3. Historial de extracción de agua en el Valle de Saltillo	44
Tabla 4. Conjunto de pozos que conforman el acuífero 0510 Saltillo Ramos Arizpe	54
Tabla 5. Pozos seleccionados y levantamiento de la ubicación con GPS	60
Tabla 6. Aforos obtenidos durante las mediciones y los testigos correspondientes	61
Tabla 7. Nivel estático y dinámico de cada pozo en los respectivos años de estudio	62
Tabla 8. Nivel estático y dinámico de cada pozo conforme a la atura sobre el nivel del mar de los pozos	67

Tabla 9. Precipitación acumulada de cada año en el periodo de estudio 2014-2018	69
Tabla 10. Evolución de las poblaciones de los municipios de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga en el periodo 1900-2006	71
Tabla 11. Crecimiento de la población de las tres ciudades en cada década	71

Índice de graficas

Grafica 1. Porcentaje de extracción de pozos	44
Grafica 2. Porcentaje de caudales de extracción	45
Grafica 3. Precipitación acumulada anual de cada año en el intervalo de estudio elaboración a partir de datos de la estación meteorológica: 763900 (MMIO) Saltillo Coahuila.	69
Grafica 4. Aumento de la población por década en el área de Saltillo y Ramos Arizpe	72
Grafica 5. Crecimiento poblacional por década	72

Resumen

El presente proyecto de investigación se realizó en el valle de saltillo Coahuila, misma que se encuentra parcialmente, dentro del acuífero 0510 Saltillo-Ramos Arizpe que se localiza en la porción sureste del Estado de Coahuila y cuenta con una superficie de 1,446 kilómetros cuadrados y cubre parcialmente a los municipios de Ramos Arizpe y Arteaga. Este proyecto tiene como principal objetivo medir el descenso del nivel freático para el caso de acuífero libre presente en este valle. Comparar los resultados obtenidos en campo, para el año 2018, con un testigo de hace 6 años estos datos fueron medidos en el año 2014 y 2016.

El proyecto nace de la necesidad de monitorear el descenso del nivel freático para el caso de acuífero libre en los últimos años en este valle debido a factores como el cambio climático que ha traído como consecuencia la prolongación de la sequía, pocas precipitaciones que afectan la recarga de acuífero y el aumento de la población que trae como consecuencia el aumento de la demanda de agua potable y de buena calidad.

En él se midieron al azar las siguientes variables de 29 pozos:

- Nivel estático y dinámico,
- Aforo de los pozos
- Ubicación de los mismos.

Para validar el trabajo se planteó la hipótesis de que en este valle a pesar de que ha aumentado la población y que en los últimos años se han construido un sinnúmero de pozos el en clandestinaje y la sobreexplotación del caudal de los pozos ya presentes y registrados han aumentado, no se ha visto afectado el descenso del nivel freático en estos últimos 6 años. El descarto o aceptación de la hipótesis se verificó con la creación de isoniveles en el programa ArcGIS, para después compararlas por periodos de tiempo de dos años 2014-2016, 2014-2018, para el caso del nivel estático y dinámico.

La conclusión se hizo a partir de la comparación de los isoniveles y de la creación de mallas 3D en el paquete Surfer.

Palabras clave: Sobreexplotación, nivel freático, acuífero libre, isoniveles, ArcGIS, Surfer, pozos

INTRODUCCIÓN

La distribución de agua potable sigue siendo un modelo de desigualdad característico de una región con agudas disparidades socioeconómicas sumadas a condiciones de baja precipitación, zonas desérticas e incremento en la población consecuencia de un crecimiento desordenado en relación a la baja disponibilidad del recurso. Los recursos hídricos en México están constituidos por ríos, arroyos, lagos y lagunas, así como por almacenamientos subterráneos y grandes masas de agua oceánica. Existe una gran cantidad de cuencas hidrológicas, sobre todo en las zonas donde las sierras están en contacto directo con el mar y en el Altiplano.

El estudio del recurso hídrico dulce disponible se justifica por la demanda de consumo que se tiene por parte de los seres vivos. Por lo tanto, es importante monitorear el comportamiento del agua subterránea, sobre todo en los acuíferos de alta demanda

El área metropolitana de Saltillo constituye un área de estudio interesante para la aplicación de la metodología del presente trabajo. De acuerdo a los resultados de los censos de población publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010) saltillo contaba con una población de 709,671 habitantes, con el tiempo esta zona, ha presentado un crecimiento urbano muy importante en los últimos años que se estima en aproximadamente 985,229 habitantes hasta y la demanda de agua es abastecida parcialmente por el acuífero "Saltillo-Ramos Arizpe", ya que cuenta con otras fuentes importantes del subsuelo de agua dulce, pero con la especificación de ser una cuenca semiendorreica; sin embargo, el número de grandes cuencas que abarcan amplias zonas del país es reducido.

A esta velocidad cada vez se exploran a mayor profundidad recursos de agua que se deberían guardar para un futuro más promisorio, pero al contrario se extrae más agua y de mayor distancia de otros ecosistemas para poder cumplir la sedienta demanda de las manchas urbanas, que tal parece da la imagen de ser infinita, deteriorando las cuencas y en consecuencia los ecosistemas que convergen en el área.

El mecanismo de explotación del agua subterránea es a través de norias u orificios a cielo abierto en la corteza terrestre, y en los últimos 100 años por pozos profundos realizados con maquinaria especializada en roturar el suelo a mayores profundidades.

Siendo el noreste de México una zona semiárida en base a la baja precipitación, perforar a grandes profundidades es como predestinar a una sociedad al deterioro de su calidad de vida, ya que estas predisponiendo de un recurso que en el futuro generara un déficit hídrico. La recarga del agua del subsuelo de estas zonas proviene solo de la precipitación, el escurrimiento, la infiltración somera y de la influencia profunda (Villarreal, 2013).

En el desarrollo de una ciudad se considera no solo la capacidad de ser autosuficiente en cuanto a producción ya sea (industrial, agrícola, e infraestructura) sino también en el ser capaces de ser cuidadosos en el cuidado del potencial en cuanto a hidrología, sin embargo, este último recurso se ha dado de que hablar en los últimos años debido a la alta demanda, por parte de la población, lo que conlleva a que la sobreexplotación de acuíferos sea algo representativo como una amenaza al proceso productivo.

HIPÓTESIS

Dada las condiciones actuales de recarga y extracción por bombeo en el denominado “acuífero 0510 Saltillo-Ramos Arizpe” y en base al número excesivo de pozos sin registro **“Considero”** que aún este recurso de agua del subsuelo tiene capacidad de aportar un gasto mayor sin llegar al límite de sobreexplotado.

Justificación

La sobre explotación del gasto en los acuíferos céntricos de las manchas urbanas trae en consecuencia el abatimiento de los niveles normales y la contaminación del fluido, ***pero el criterio más real es la evaluación de sus niveles piezómetros con respecto al tiempo, parámetro que nos ayuda a determinar si realmente la extracción es mayor que la recarga manifestándose en una depresión del cono de abatimiento.***

A lo largo de los últimos 6 años se ha operado un conjunto de pozos que fueron diseñados y construidos con una total ausencia de asistencia técnica, pozos construidos por personal que carece de la preparación en el área de la geología estructural e hidrología subterránea, solo como una acción mecánica de un pozo a cielo abierto, muchos de ellos son muy antiguos, unos datan ya de más de 60 años y otros se construyeron en el clandestinaje para irrigar pequeñas huertas el cual jamás se registraron, por lo que el padrón que existe no es el real número de ellos en funcionamiento.

Entre la recarga y la extracción el nivel debería de cambiar o abatirse, por lo cual no hay tal diferencia y en este trabajo tiene como objetivo medir realmente estos niveles demostrando que entre los pozos del padrón y los no registrados no impactan con tanta seriedad el nivel del mismo en los últimos 6 años.

OBJETIVOS

General:

- Evaluar de 29 pozos y un afloramiento en el área más representativa del centro de la ciudad de Saltillo Coahuila el comportamiento de los niveles piezométrico del acuífero 0510 en un acuífero libre y superficial montado sobre los rellenos.

Específico:

- Construir una línea piezométrica con respecto al tiempo de 6 años del comportamiento del nivel dinámico de los pozos en acuíferos superficiales.

REVISIÓN DE LITERATURA

FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

Ciclo hidrológico

El ciclo del agua en la tierra o ciclo hidrológico, es la circulación continua del agua en sus diferentes estados en el planeta. No tiene principio ni fin, pero el concepto de ciclo hidrológico suele describirse normalmente comenzando desde los océanos porque éstos constituyen la fuente principal del agua en circulación.

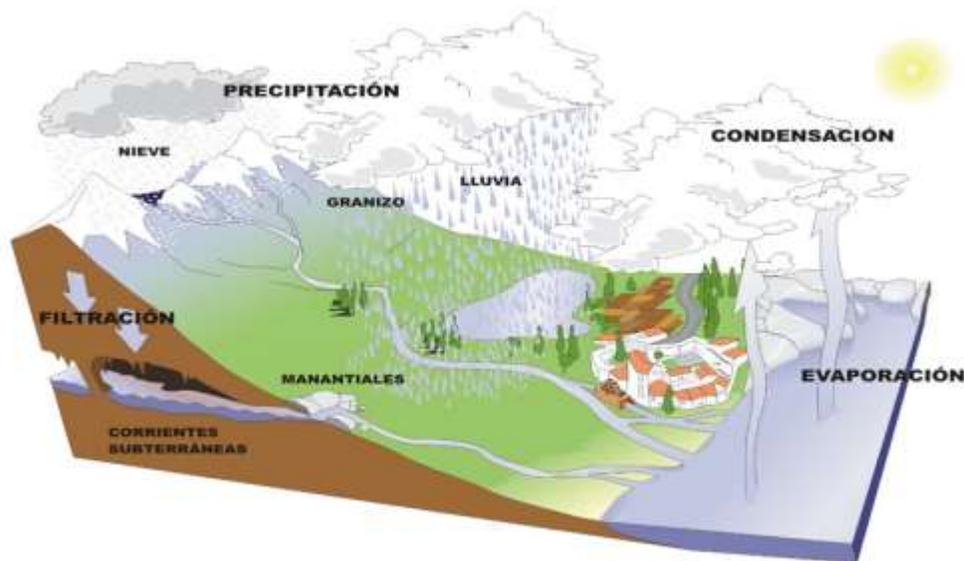


Figura 1. Ciclo hidrológico del agua

Fuente: Davis S. (2008) Teledetección y SIG en la gestión de aguas subterráneas

El ciclo hidrológico empieza con la evaporación del agua desde la superficie de los océanos o de otras fuentes de agua libre. A medida que se eleva (evaporación) el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua (condensación) las gotas se juntan y forman una nube, para luego caer por su propio peso (precipitación).

Una parte del agua que llega a la superficie terrestre será aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como escorrentía. Otro porcentaje del agua se filtrará a través del suelo, formando capas de agua subterránea, conocidas como acuíferos. Este proceso es la percolación. Tarde o temprano, esta agua llegará a la superficie y volverá nuevamente a la atmósfera, dando inicio a un nuevo ciclo (Trevizan, 2011).

Chereque (1989), menciona que se entiende como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso) como en su forma (superficial, sub-superficial, subterránea, etc.).

Agua subterránea

(Morales, 2012), menciona que es el agua que ocupa todos los espacios vacíos dentro del estrato geológico conocido como subsuelo comprende toda el agua que se encuentra por debajo del nivel freático, que se encuentra en la zona de saturación y que alimenta pozos, manantiales y escorrentía subterránea Figura 2.

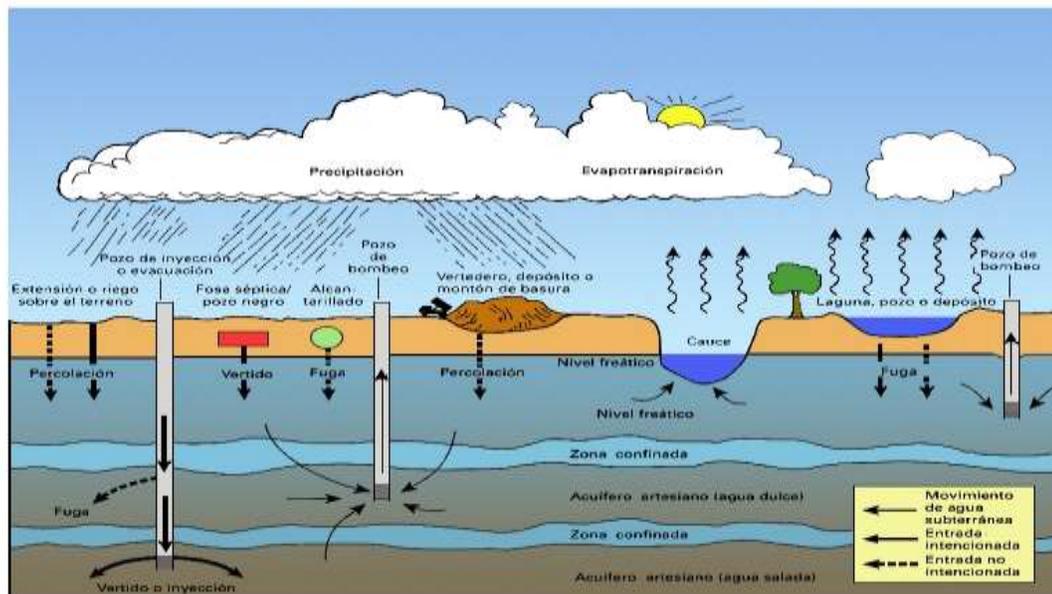


Figura 2. Formación de agua en el suelo

Fuente: Chávez, A. S., Flores, N., Moyabed, E., García, J., Ríos, M., Hernández. (1990).

El agua subterránea fluye a través de las formaciones rocosas presentes del suelo hacia los niveles más bajos que los de la infiltración, esta a su vez puede retomar naturalmente su camino hacia la superficie en forma de manantial o hacia el cauce de un río. Por otra parte, esto no representa el volumen total de la lluvia precipitada debido a que una parte se escurre hacia causas dentro de una cuenca cerrada y se evapora. De esta manera, el agua subterránea solo representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento en los continentes. Éstas están almacenadas en acuíferos, ubicados a diferentes niveles de profundidad, hasta sistemas confinados que están a varios kilómetros por debajo de la superficie. Se pueden encontrar aguas subterráneas en casi cualquier parte, trátase de zonas húmedas, áridas o semiáridas.

Cuenca hidrográfica

Las cuencas son superficies cóncavas u oquedades, como las de los ojos. Las cuencas hidrográficas en geografía física son depresiones territoriales por las que regular fluye un río, que drena las aguas del área desde las partes más altas hacia una salida al mar Figura 3.

Las cuencas hidrográficas son el resultado de una intersección entre dos elementos de la naturaleza, uno relativamente estable y diverso, como en la morfología de la corteza terrestre, y otro dinámico y cíclico, como es el movimiento de los elementos de la atmosfera. Entre estos dos planos ocurre parte del ciclo del agua (Melville, 1997).

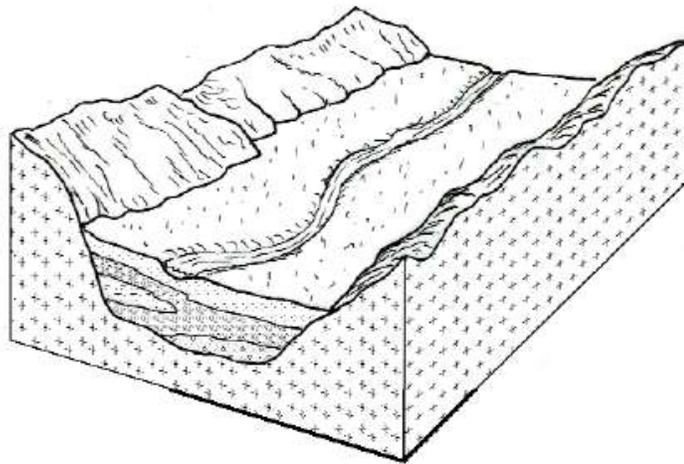


Figura 3. Cuenca hidrográfica
Fuente: Doe, T. and W. H.. Ground Water Monitoring

Una cuenca y una cuenca hidrológica se diferencian en que la cuenca se refiere exclusivamente a las aguas superficiales, mientras que la cuenca hidrológica incluye las aguas subterráneas (acuíferos).

Muchas veces hay cierta confusión cuando se utilizan los términos de Cuenca Hidrológica y Cuenca Hidrográfica, por ello damos una aclaración de lo que significa cada uno de los términos (Ordoñez, 2011).

- **Cuenca Hidrográfica:** se refiere a la definición geográfica de la misma, es el contorno o límite de la misma que drena agua en un punto en común Figura 3.
- **Cuenca Hidrológica:** se suele entender como una unidad para la gestión que se realiza dentro de la cuenca hidrográfica Figura 3.

Acuífero

Es aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros y/o grietas intercomunicados entre sí, capaz de almacenar agua y cederla con facilidad. Dentro de estas formaciones podemos encontrarnos con materiales muy variados como gravas de río, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas y depósitos de dunas, etc., (Hernández, 2017).

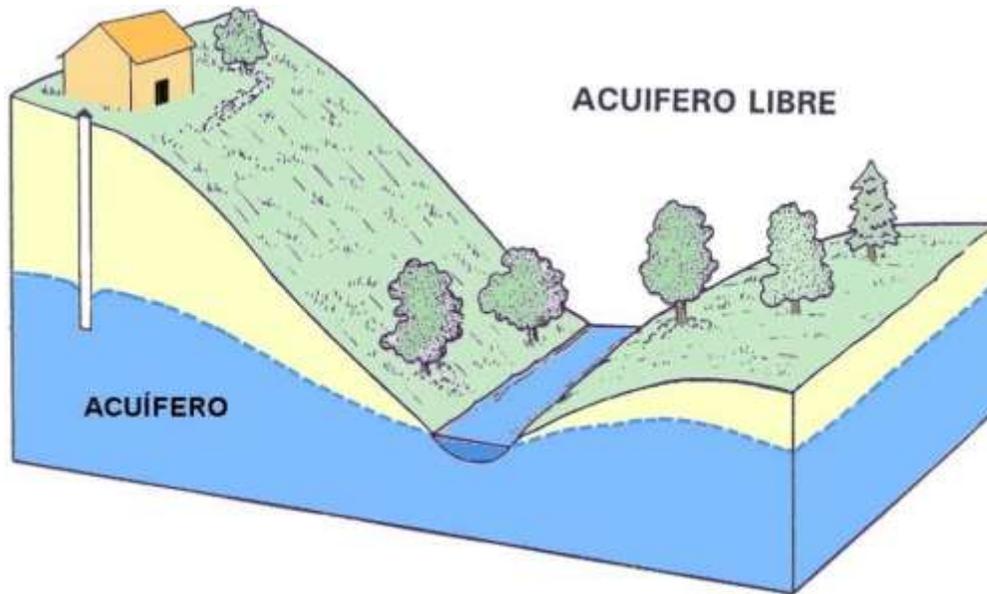


Figura 4. Representación de un acuífero subterráneo
Fuente: Davis, J. (1986). *Statistics and data analysis in geology*

Todos los acuíferos tienen dos características fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de permitir el flujo del agua subterránea. Pero el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra y su magnitud puede variar con la estructura geológica, de unos cuantos m^2 a muchos miles de km^2 .

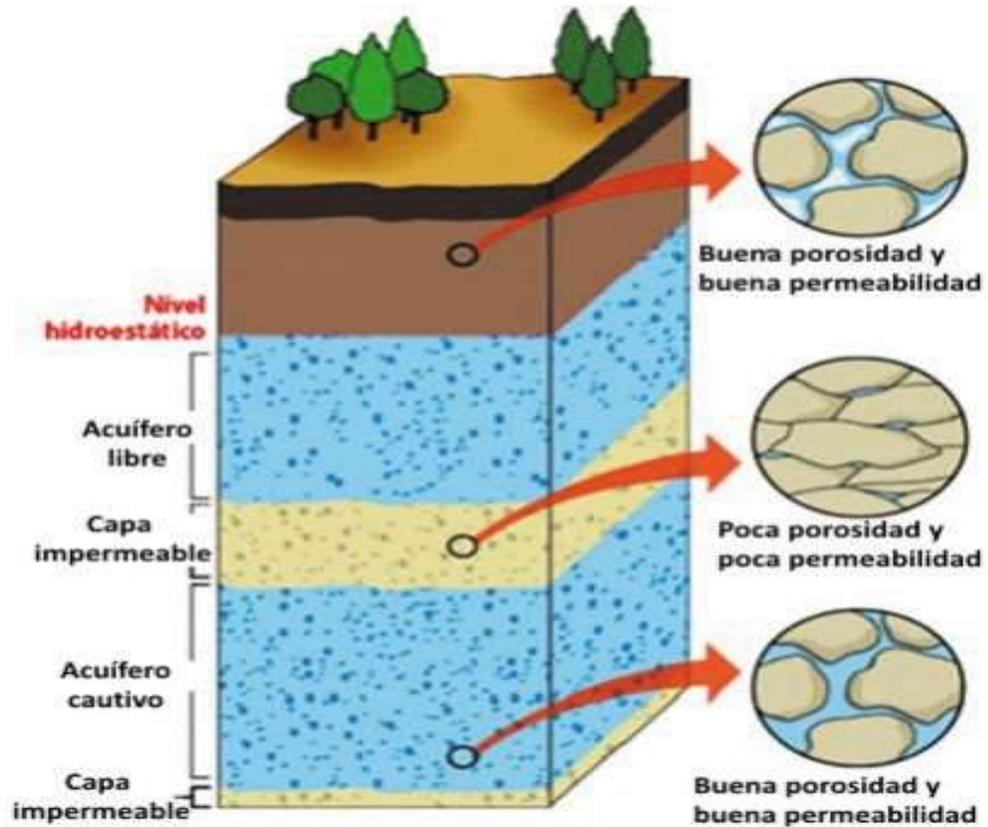


Figura 5. Diferentes formaciones geológicas
 Fuente: **Sánchez, J. (2019).** *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*

Tipos de acuífero

Acuíferos libres:

Son aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos y que se encuentran a presión atmosférica. La superficie del agua será el nivel freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no, pero lo importante es que no tenga por encima ningún material impermeable. En estos acuíferos, al perforar pozos que los atravesasen total o parcialmente, el agua alcanza un nivel que sería el mismo que tendría dentro de la

formación geológica, es decir el nivel freático (nivel real) coincide con el nivel piezométrico (nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica).

Acuíferos confinados:

En este tipo de acuífero, el agua que contienen está sometida a cierta presión, superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Están sellados por materiales impermeables que no permiten que el agua ascienda hasta igualar su presión a la atmosférica. Por este motivo al perforar que atraviesen el límite superior del material que constituye el acuífero, se observará que el nivel del agua asciende muy rápido hasta que se estabiliza en el nivel piezométrico. Podrán darse pozos surgentes si el nivel del agua queda por encima del nivel topográfico y pozos artesianos si el nivel se estabiliza por debajo de la cota del terreno. De esta manera, si imaginamos una serie de pozos atravesando un acuífero de este tipo, y unimos los niveles que alcanza el agua en cada uno, obtendríamos una superficie piezométrica que no coincide con el nivel freático que tenía el acuífero en estado natural. (Figura 7)

Acuíferos semiconfinados:

Constituyen una variedad de los confinados, y se caracterizan por tener el techo (parte superior) o/y el muro (parte inferior) sellado por materiales que no son totalmente impermeables, sino que constituyen un acuitardo, es decir, un material que permita una filtración vertical que alimenta muy lentamente al acuífero principal. En estos casos, habrá situaciones en los que la recarga podrá hacerse en ambos sentidos en función de la diferencia de potencial.

Acuíferos colgados:

Algunas veces se da una capa de material más o menos impermeable por encima del nivel freático. El agua que se infiltra queda atrapada en esta capa para formar un lentejón, que normalmente tiene una extensión limitada sobre la zona saturada más próxima. Los acuíferos colgados son más comunes de lo que se pueda suponer, aunque quizás sólo ocupan unos pocos centímetros de espesor, o sólo se alimentan después de una recarga muy excepcional. No suponen un recurso muy fiable, ya que a veces se puede perforar del todo y el pozo construido facilita el drenaje del agua contenida en el lentejón hacia la zona saturada (Hernández, 2017).

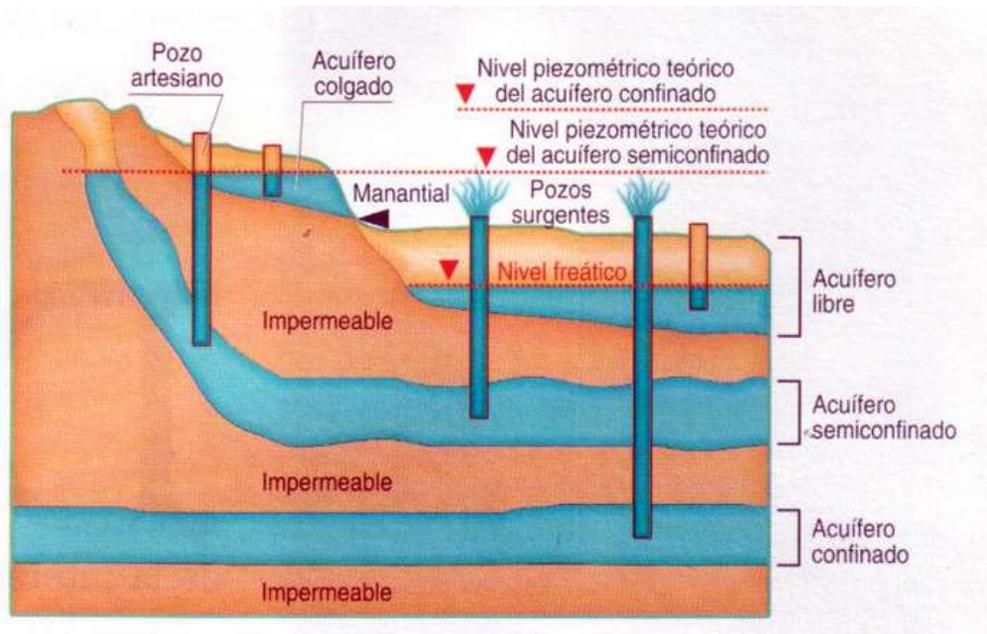


Figura 6. *Diferentes tipos de acuífero*
Fuente Freeze, R.A. y J.A. Cherry (1979). *Groundwater*

Acuífugo

Un acuífugo es una formación geológica subterránea que se caracteriza por ser impermeable, por tanto, es incapaz de absorber o transmitir agua.

Formación geológica que ni contiene agua en cantidades apreciables ni permite su circulación. Son materiales no porosos ni fisurados, e "impermeables", como los granitos o las cuarcitas no alterados.

Acuícludo

Es una formación geológica poco permeable, que conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite, por lo tanto, no es posible su explotación. Generalmente los acuícludos son depósitos subterráneos de arcilla

Formación geológica capaz de almacenar agua, pero que no permite su libre circulación. Arcillas, margas o piedra pómez, de alta porosidad, pero prácticamente impermeables.

Acuitardo

Es una formación geológica semipermeable, que conteniendo apreciables cantidades de

agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos.

Formación geológica capaz de almacenar agua, pero que la transmite dificultosamente. Son materiales porosos, pero poco permeables, como limos, arenas arcillosas o pizarras poco fisuradas. Son materiales semipermeables o semiconfinantes.

Recarga de un acuífero

La recarga es el proceso por el cual el exceso de infiltración sobre la evapotranspiración drena desde la zona radicular y continúa circulando en dirección descendente a través de la zona no saturada hacia la capa freática, donde se refleja el aumento o descenso del almacenamiento de agua subterránea (Freeze y Cherry, 1979).

Hay tres tipos principales de recarga, definidos como recarga directa, indirecta y localizada. La recarga directa hace referencia al agua excedente que ingresa por percolación vertical a través de la zona no saturada y pasa a formar parte del agua subterránea luego de satisfacer el déficit de humedad del suelo y los requerimientos por evapotranspiración. La recarga indirecta consiste en la percolación hacia el nivel freático desde el lecho de cuerpos de agua superficial. La recarga localizada se debe a la concentración horizontal de agua en superficie en ausencia de canales bien definidos (Simmers, 1997).

La infiltración, hace referencia a la penetración del agua desde la superficie hacia el interior del terreno y, dependiendo de la profundidad del nivel freático, la parte de la infiltración que se convierte en recarga (recarga en tránsito) puede tardar más o menos tiempo en alcanzar el acuífero. Para determinar la cantidad de agua precipitada que puede infiltrarse es necesario descontar el agua que es interceptada por la vegetación y retenida en superficie y posteriormente evaporada, además, dependiendo de las características del terreno otra parte de lo precipitado puede escurrir en superficie y si se dan las condiciones necesarias, infiltrarse aguas abajo. La tasa a la que se infiltrará el agua depende de la permeabilidad del suelo y de las condiciones antecedentes de humedad, y el agua comenzará a descender cuando se supere la capacidad de campo (Custodio, 1998).

Una parte del agua infiltrada desciende hasta el nivel freático y otra asciende para reponer las pérdidas por evapotranspiración, esto define un plano de flujo nulo por debajo del cual la recarga en tránsito pasa a denominarse percolación y se conformará más tarde en

recarga al acuífero. Lo descripto hace referencia a una infiltración difusa, pero existe también casos en que la existencia de grietas, conductos verticales y fisuras en el terreno permiten lo que se denomina recarga directa a través de una infiltración preferencial (Custodio, 1998).

La recarga se encuentra así influenciada por factores meteorológicos, geomorfológicos, edafológicos, hidrológicos, por el tipo de cobertura vegetal, el uso del suelo y las propiedades del medio subterráneo, lo que determina que la recarga muestre una marcada variación tanto temporal como espacial (Samper, 1998).

La recarga produce el ascenso transitorio del nivel freático del acuífero o una disminución de la velocidad de descenso y también un aumento en las descargas. Estas consecuencias de la recarga se ven amortiguadas por la transferencia del agua a través de la zona no saturada y el efecto se disipa lentamente a medida que el agua fluye hacia las zonas de descarga (Custodio, 1998).

En la caracterización de un balance de agua en el suelo debe considerarse el factor climatológico y la respuesta del acuífero, el suelo y la vegetación. El agua infiltrada dependerá de la capacidad de infiltración del suelo, propiedad que es una función parabólica decreciente del contenido de humedad del suelo (ley de Horton) y que será máxima cuando el suelo tenga una humedad igual al punto de marchitez. La capacidad de infiltración será constante cuando la humedad sea superior a la capacidad de campo, produciéndose escorrentía superficial (E_s) cuando la precipitación supere la capacidad de infiltración.

Por lo que es de suma importancia tener en cuenta la precipitación, la evapotranspiración, los flujos hipodérmico y subterráneo, y las variaciones en el contenido de humedad y del nivel de agua en el acuífero

Las fuentes de agua que intervienen en el proceso de recarga son múltiples y variadas y pueden agruparse en los siguientes tipos:

- Agua de Lluvia
- Agua superficial que circula por cauces permanentes, estacionales o efímeros o bien que se encuentra almacenada en lagos, lagunas o humedales.
- Agua procedente de otros acuíferos y acuitardos.
- Agua de riegos, fugas de redes de abastecimiento o infiltración de embalses

- artificiales.

Nivel Piezométrico

El nivel piezométrico corresponde en los acuíferos libres a la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar, y en los acuíferos confinados, corresponde a la presión existente y la altura que alcanzaría el agua sobre un punto del acuífero en el cual está se encuentra o un pozo o un sondeo hasta equilibrarse con la presión atmosférica; Por lo tanto, en cada punto donde exista una perforación de un acuífero confinado se tiene un nivel piezométrico propio y diferente.

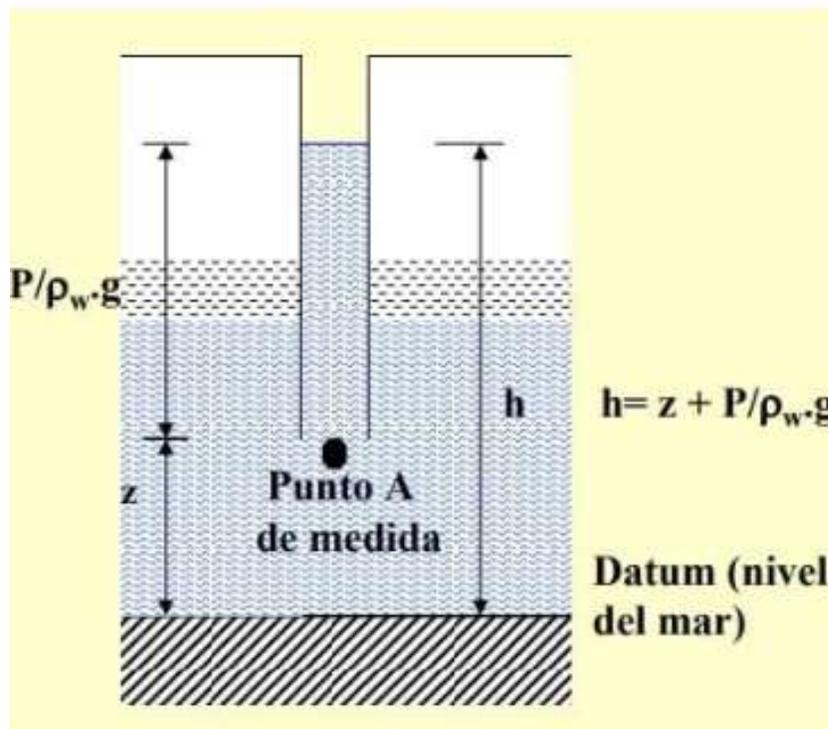


Figura 7. Esquematación del concepto general del nivel piezométrico
Fuente: Custodio, E. Llamas, M.R. (1976). Hidrología subterránea

En la imagen anterior, se describe de forma esquemática la definición de nivel piezométrico donde:

h = Es el nivel piezométrico en el punto de medida A (Altura que tendrá la tabla de agua dentro del sondeo desde un punto inicial o datum).

z = Representa la energía generada por la elevación del punto A sobre el nivel de referencia o datum.

P = Es la presión que ejerce la columna de agua sobre el punto A

P_w = Es el valor de la densidad del agua.

g = Es la constante de la gravedad.

$P/P_w \cdot g$ = Es la fórmula que representa la longitud de la columna de agua dentro del sondeo o la perforación.

EXPLOTACIÓN Y SOBREPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS LIBRES

La situación del agua en la población actual

El agua dulce se está convirtiendo en uno de los problemas más críticos de los recursos naturales que enfrenta la humanidad y se agrava porque la población mundial se está multiplicando rápidamente, lo que implica una gran y exigente demanda que no logrará ser lo suficientemente satisfecha por la cantidad de agua dulce existente y el uso inadecuado que se está haciendo de ella.

(Bosch, 2001), menciona que los asentamientos humanos se han hecho tradicionalmente en entornos con agua y/o con facilidad defensivas. El hombre utilizó en principio el agua en un régimen natural, generando un residuo contaminado. En las regiones áridas y/o en los periodos más secos el hombre tuvo que recurrir a sistemas de captación. Cambiando en gran medida el régimen natural de los ríos o de los acuíferos.

A medida que la humanidad aumenta en número de individuos, la demanda de agua crece, con el consiguiente aumento de residuos que son susceptibles de deteriorar la calidad de otras masas de agua limpias.

Cuando tiene lugar el abandono del acuífero se puede producir paralelamente un grave problema socioeconómico, que se traduce en la disminución del nivel de vida y en el empobrecimiento que a menudo se acompaña por emigraciones masivas hacia lugares con mayor disponibilidad de agua. Las soluciones pasan con frecuencia por la explotación de agua o por métodos muy costosos desalación lo cual no es siempre realizable (Bosch, 2001).

El crecimiento económico en México ha ocurrido sin tener en cuenta plenamente las señales de escasez de agua. La concentración de la población y la actividad económica han creado zonas de alta escasez, no sólo en las regiones de baja precipitación pluvial, sino también en zonas donde eso no se percibía como un problema al comenzar el crecimiento urbano o el establecimiento de la agricultura de riego (Becerra, et al Sáinz, et al Muñoz, 2006).

Perforación de pozos

Los pozos existen desde hace más de 3000 años antes de cristo, así lo demuestran las antiguas culturas de los persas y la cultura china, en donde aún en la actualidad se pueden observar en el Cairo grandes obras de infraestructura del subsuelo realizados con una gran calidad artesanal y ademados con lajas de rocas provenientes de grandes distancias, esto nació desde que el hombre tuvo conocimiento real del ciclo hidrológico y en sus cálculos observo que del balance de cuenca entre la superficie y la lámina precipitada se quedaba gran parte de esto en el suelo trato de investigar cómo se almacenaba y por qué resaltaban en los manantiales, como fluía ese recurso entre los diferentes materiales.

De los 25 millones de km³ de agua dulce en el planeta, 7.7 millones de Km³ es el volumen de agua subterránea representando el 30.8 %. Siendo los acuíferos el medio estructural del suelo que tiene la capacidad de retener y confinar el agua de la recarga o infiltrada por medio de las rocas, suelos o conglomerados y que en base a la propiedad física de estos elementos estratigráficos se puede evaluar el grado de disponibilidad del agua, así como su calidad (Villarreal, 2013).

Los pozos sirven a modo de pequeños depósitos a los cuales migra el agua subterránea y de los cuales puede bombearse a la superficie.

El nivel freático puede fluctuar considerablemente a lo largo de un año, descendiendo durante las estaciones secas y elevándose tras los períodos de lluvia. Por consiguiente, para asegurar un abastecimiento continuo de agua, un pozo debe penetrar debajo del nivel freático. Cuando se extrae agua de un pozo, el nivel freático alrededor del pozo se reduce. Este efecto, denominado descenso de nivel, disminuye al aumentar la distancia desde el pozo. El resultado es una depresión en el nivel freático, de forma aproximadamente cónica, conocida como cono de depresión Figura 8.

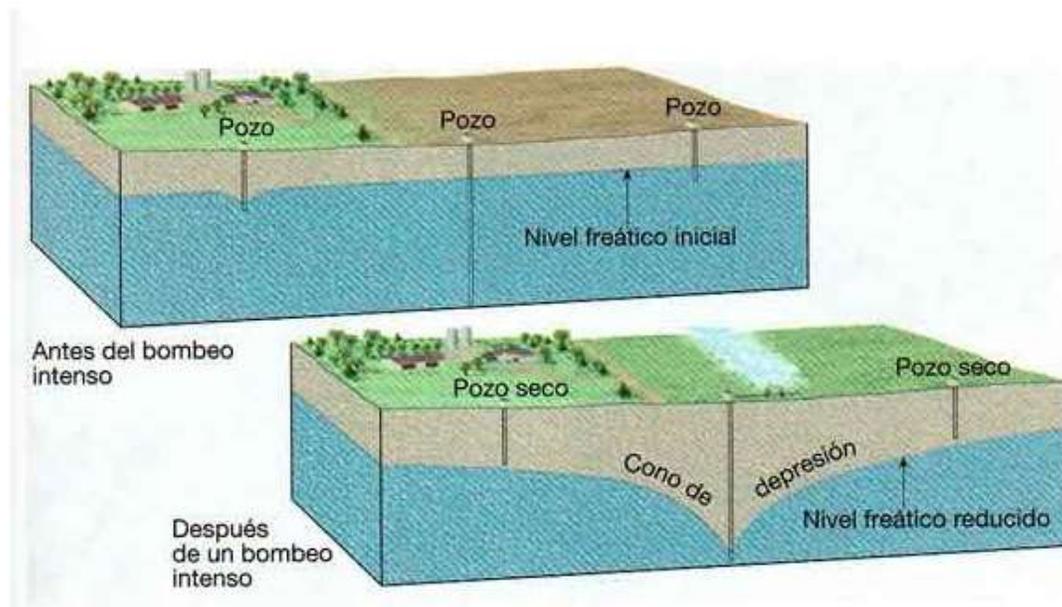


Figura 8. Formación de un cono de depresión en el nivel freático alrededor de un pozo
Fuente: geofisica.unam.mx

Dado que el cono de depresión aumenta el gradiente hidráulico cerca del pozo, el agua subterránea fluirá más deprisa hacia la apertura. Para la mayoría de los pozos domésticos más pequeños, el cono de depresión es despreciable. Sin embargo, cuando los pozos están siendo bombeados con mucha intensidad para el regadío o con fines industriales, la extracción del agua puede ser lo bastante grande como para crear un cono de depresión muy ancho y empinado.

Esto puede reducir sustancialmente el nivel freático de un área y secar los pozos poco profundos de los alrededores.

Como ocurre con muchos de nuestros valiosos recursos naturales, el agua subterránea está siendo explotada a un ritmo creciente. En algunas zonas, la sobreexplotación amenaza la existencia del abastecimiento de agua subterránea. En otros lugares, su extracción ha hecho que se hunde el terreno y todo lo que descansaba sobre él. En otros lugares hay preocupación por la posible contaminación del abastecimiento de las aguas subterráneas

Debido al aumento de la población en las manchas urbanas, se hace más evidente los escasos de agua, esto se ve demostrado en las fuentes de abastecimiento de agua subterráneas que al descender en los últimos años el nivel freático, se han visto en la necesidad de realizar perforaciones más profundas y la realización de nuevos pozos.

Al aumentar el número de perforaciones de pozos y bombear mayor cantidad de agua, en consecuencia, el nivel de los acuíferos libres va descendiendo lo que provoca un abatimiento y la recuperación es más lenta. En casos extremos que se abata definitivamente el nivel superficial conlleva a que se construyan pozos más profundos; esto no representaba un problema hace algunos años, pero ahora está generando que los acuíferos libres desaparezcan poco a poco y como consecuencia que un gran número de pozos sean cerrados o que se profundicen estos.

Bombeo excesivo

La pregunta de qué cantidad de agua podría bombearse de un acuífero poco profundo sin comprometer a los ecosistemas locales no tiene una respuesta clara. El bombeo excesivo o no regulado puede llevar al abatimiento del nivel freático.

Toda el agua en la superficie y el subsuelo tiene su origen en la precipitación. Desde una perspectiva global, alrededor de un tercio de la precipitación se convierte en escorrentía superficial y es descargada finalmente a los océanos por sistemas de drenaje exorreicos (Ponce, 2006).

En tanto que en los últimos años el desarrollo y el crecimiento urbano de las ciudades demandan agua los pozos perforados en un acuífero somero, extraen más agua de la que se infiltra lo que ocasiona que en nivel no se recupere en su debido tiempo.

En el caso anterior cabe destacar también que al haber varios pozos en un acierta región varios de estas hagan un descenso más rápido del nivel freático.

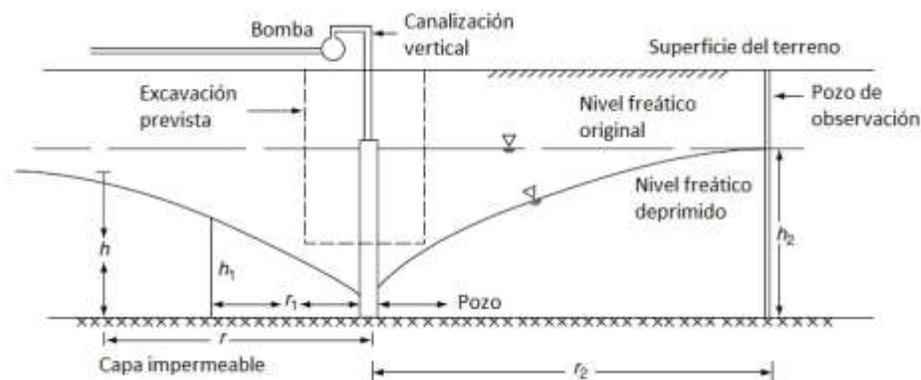


Figura 9. Descenso del nivel freático debido al bombeo excesivo
Fuente: Mendoza, M. A. (2005). Determinación de los coeficientes de permeabilidad para un flujo de pozo en un simulador hidrológico Instituto Politécnico Nacional,

Abatimiento

Es la diferencia en metros entre el nivel estático y el nivel dinámico(bombeo); o sea la distancia vertical medida en metros que desciende el nivel estático de un pozo bajo la influencia del bombeo.

En condiciones de extracción de un pozo la carga hidráulica inicial en cualquier punto del acuífero cambia, la distancia vertical entre la carga hidráulica inicial en el acuífero y la posición baja de la carga hidráulica para el mismo punto es llamado abatimiento.

Para un acuífero libre el nivel del agua en el nivel freático está determinado por la distancia $s(x, y, z, t)$, la cual es el abatimiento.



Figura 10. Abatimiento de un pozo en una prueba de bombeo
Fuente: Villareal (2013) Evaluación del potencial hídrico y su impacto en el desarrollo de Saltillo Coahuila.

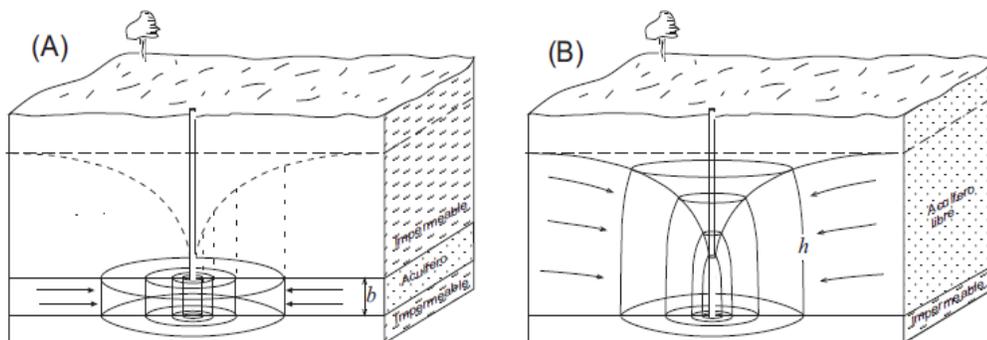


Figura 11. Abatimiento de un pozo
Fuente: Estrela, T. and A. Sahuquillo. (1997). Modeling the response of a karstic spring at Arteta aquifer in.

Nivel de recuperación

Son las distancias verticales medidas en metros desde el brocal del pozo, hasta los niveles libres del agua a partir del momento que fue suspendido el bombeo y alcance su estabilidad.

Recuperación

Es el lapso medido en la unidad de tiempo que tarda en estabilizarse el nivel de recuperación. El lapso de tiempo puede tardar de unos cuantos minutos hasta una hora dependiendo de la porosidad del suelo, que también está en base a la unidad de tiempo en que se infiltra el agua si ha ocurrido algún escurrimiento.



Figura 12. Recuperación de un pozo después de una prueba de bombeo
Fuente: Villareal (2013) Evaluación del potencial hídrico y su impacto en el desarrollo de Saltillo Coahuila.

Curva de abatimiento

Es la curva característica hidráulica de un pozo, relaciona a los caudales extraídos con el nivel de descenso del nivel de bombeo en el pozo (abatimiento) y un índice de eficiencia de la productividad que es la relación del caudal extraído y el abatimiento (gasto específico).

El conocimiento de esta esta curva hidráulica constituye una herramienta fundamental para la planificación de y la estabilidad del acuífero donde se hace la extracción de agua. Además, se pueden tomar decisiones acerca de explotar más el pozo o sino encontramos en el punto límite.

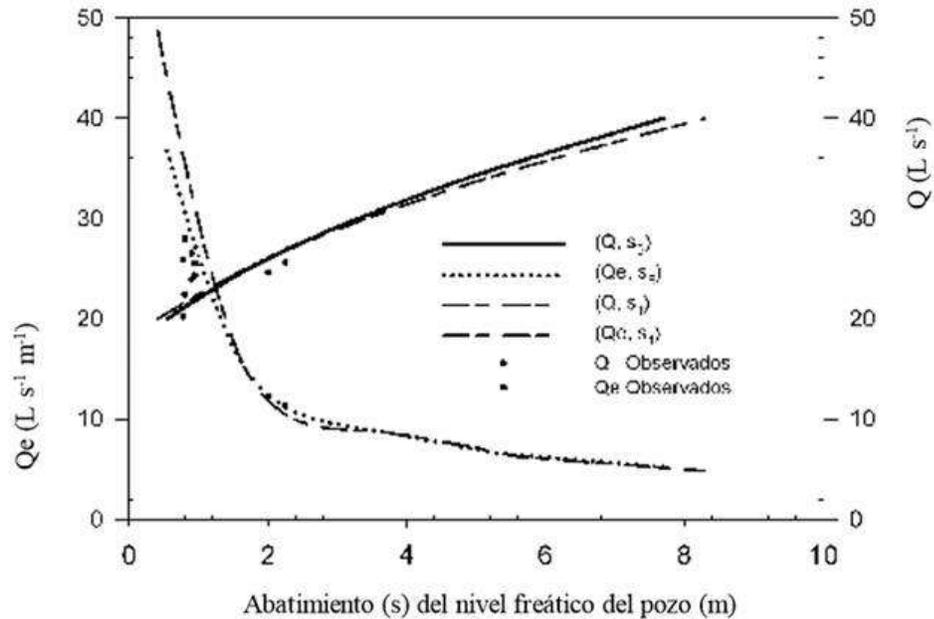


Figura 13. Curva de abatimiento de un pozo

Fuente: Cheema, T. J. and M. R. Islam. (1995). A new modeling approach for predicting flow in fractured formations

Curva de recuperación

También llamada curva característica de un pozo a la relación gráfica entre el caudal y el abatimiento de un pozo. También se llaman curvas características a las relaciones gráficas entre los caudales específicos y los abatimientos. Que denotan los tiempos de recuperación de un pozo estos tiempos de recuperación varían en función al funcionamiento del pozo.

Balance de cuenca

Si elaboramos una ecuación de balance diríamos que la entrada del fluido a un sistema sería la recarga, el depósito sería el acuífero o medio confinante y el bombeo sería la extracción. O sea, a mayor recarga y menor bombeo tendríamos saturación y excedente de agua, a menor recarga y mayor bombeo tendríamos abatimiento, más sin embargo lo importante de este análisis es cuánto tiempo tarda el fluido en regresar a recargar el sistema y lo llamaremos **tiempo de retorno** y en el caso contrario si el tiempo de retorno es muy largo específicamente años y el bombeo es excesivo se presentará un abatimiento que rebasaría el punto de inflexión del sistema o **punto sin retorno**.

El balance de aguas subterráneas se planteó para la superficie completa del acuífero. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

Por otro lado, se menciona, que los niveles de agua subterránea no han sufrido variaciones significativas en su posición de funcionamiento, los abatimientos anuales son sólo de unos pocos centímetros, el comportamiento de las líneas de flujo no se ha modificado en el periodo de estudio. Por otra parte, podemos concretar que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero (Villarreal, 2013, Hugo 2010).

MÉTODOS PARA EVALUAR EL NIVEL PIEZOMÉTRICO EN POZOS

Métodos indirectos

Típicamente se interpretan usando un modelo analítico de flujo en un acuífero (siendo el más fundamental la solución de Theis). Así, se hacen calzar los datos observados en el contexto real, asumiendo que los parámetros del modelo ideal son aplicables al acuífero del contexto real. En casos más complejos, un modelo numérico podría ser usado para analizar los resultados de una prueba de bombeo, pero el añadir mayor complejidad no asegura mejores resultados.

Para el caso de la estimación por métodos directos se debe elegir un modelo o solución adecuado a la ecuación de flujo subterráneo, para calzar los datos observados. Hay varios modelos para elegir, dependiendo de los factores que se consideren relevantes. Entre estos se incluyen:

- Acuitardo filtrante (del inglés leaky),
- Flujo no confinado (retraso en el rendimiento),
- Penetración parcial de los pozos de bombeo u observación,
- Radio del pozo finito - que puede conducir a almacenamiento en el pozo,
- Porosidad dual (de uso típico en rocas fracturadas),
- Acuífero anisotrópico,
- Acuífero heterogéneo,
- Acuífero finito (se observan efectos de barreras físicas en la prueba), y
- Combinaciones de las situaciones anteriores.

Solución de Cooper-Jacob

La solución de Cooper-Jacob corresponde a una generalización gráfica de la solución de Theis. Es de gran utilidad cuando se analizan los datos del bombeo directamente en el campo, ya que es una solución muy simple, pero que entrega resultados muy similares a los otros métodos de solución

Otras soluciones incluyen:

- Hantush-Jacob
- Neuman (para acuíferos libres)
- Boulton (para acuíferos anisotrópicos) de la solución de Theis.

Método de Theis

Theis (1935) desarrolló una fórmula para régimen de flujo transitorio, en la cual, se introduce el factor tiempo y el coeficiente de almacenamiento.

En el trabajo de Theis se considera que el caudal de descarga de un pozo en un acuífero confinado es directamente proporcional a los abatimientos multiplicados por el coeficiente de almacenamiento y esto sumado sobre el área de influencia. Debido a que el agua bombeada de un acuífero confinado proviene de la reducción de su almacenamiento, el nivel piezométrico descenderá continuamente, siempre y cuando el acuífero sea de extensión infinita. Por lo tanto, no existen condiciones de flujo permanente. Sin embargo, los abatimientos son menores a mayores distancias del pozo de bombeo y eventualmente llegan a ser tan pequeños, que para fines prácticos se consideran despreciables como para suponer flujo estable (CONAGUA, 2007).

Las ecuaciones vienen dadas por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$W(u) = -0.577 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \frac{u^5}{5 \cdot 5!} - \dots$$

Dónde:

s= Abatimiento medido en el piezómetro (m)

r= Distancias del piezómetro al pozo de bombeo (m)

Q= Caudal constante de descarga en el pozo de bombeo (m³ /día)

S= Coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional)

T= Transmisividad del acuífero (m² /día)

t= Tiempo de bombeo (días)

$W(u) =$ Función de pozo de Theis $= -0.5772 - \ln(u) + u - (u^2/4) + (u^3/18) - \dots + (-1)^n (u^n / n!)$

El método de ajuste de curvas de Theis (1935), está basado en las suposiciones y condición limitante de que: El flujo hacia el pozo es transitorio, es decir, las diferencias de abatimiento con el tiempo no son despreciables, ni tampoco el gradiente hidráulico es constante.

Observaciones

Las ecuaciones teóricas del método de Theis (1935) se basan principalmente en las hipótesis de que el caudal es constante y que el agua bombeada provoca un abatimiento instantáneo del nivel piezométrico. Esto no sucede en la realidad, sino hasta unos minutos después de haber comenzado el bombeo, lo cual provoca que la curva teórica difiera de la curva observada en su primera porción. Por otra parte, si los datos observados, al hacer la gráfica en un papel logarítmico, presentan una curva muy aplanada (como la que presenta la curva tipo cuando $1/u < 100$), la solución por este método gráfico se considera indeterminada, ya que son factibles varias soluciones. En tales casos es necesario recurrir a algún otro método (CONAGUA, 2007).

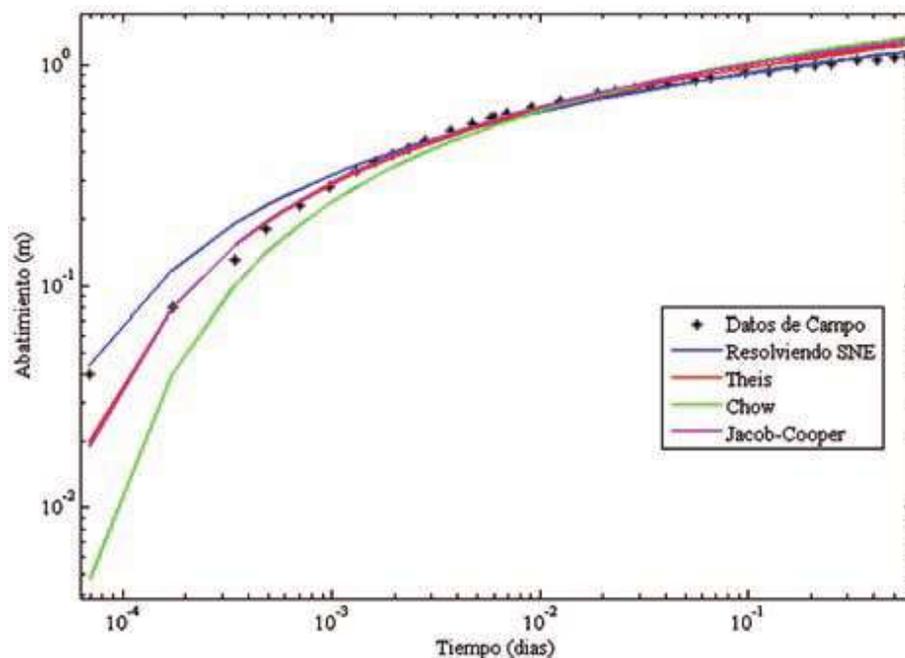


Figura 14. Curva de obtenida por el método de Theis y su comparación con otros métodos. Fuente: (SNE CHILE)

Método y ley de Darcy para un acuífero libre.

El ingeniero Henry Darcy trabajó muchos años en el abastecimiento de agua en la ciudad francesa de Dijon. Se interesó en el flujo del agua a través de los medios porosos porque se utilizaban filtros de arena para depurar el agua y por la observación de pozos que contribuían al abastecimiento de la ciudad. En 1856 presentó un voluminoso informe sobre el tema, que incluía un pequeño apéndice describiendo sus experimentos y la obtención de la ley. Ese pequeño anexo puede considerarse el nacimiento de la hidrogeología como ciencia, porque esta ley describe el movimiento del agua en un medio poroso y esto también ha sido la base de todos los estudios físico-matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea.

Validez de la ley de Darcy para un medio poroso

A partir de los trabajos iniciales de Darcy, muchos otros investigadores han analizado y puesto a prueba esta ley, a través de estos trabajos posteriores se ha podido determinar que mantiene su validez para la mayoría de los tipos de flujo en los suelos.

Para filtraciones de líquidos a velocidades muy elevadas y la de gases a velocidades muy bajas, la ley de Darcy deja de ser válida.

En el caso de agua circulando en suelos, existen evidencias abrumadoras en el sentido de verificar la vigencia de la Ley de Darcy para suelos que van desde los limos hasta las arenas medias. Asimismo, es perfectamente aplicable en las arcillas, para flujos en régimen permanente.

Para suelos de mayor permeabilidad que la arena media, deberá determinarse experimentalmente la relación real entre el gradiente y la velocidad para cada suelo y porosidad estudiados.

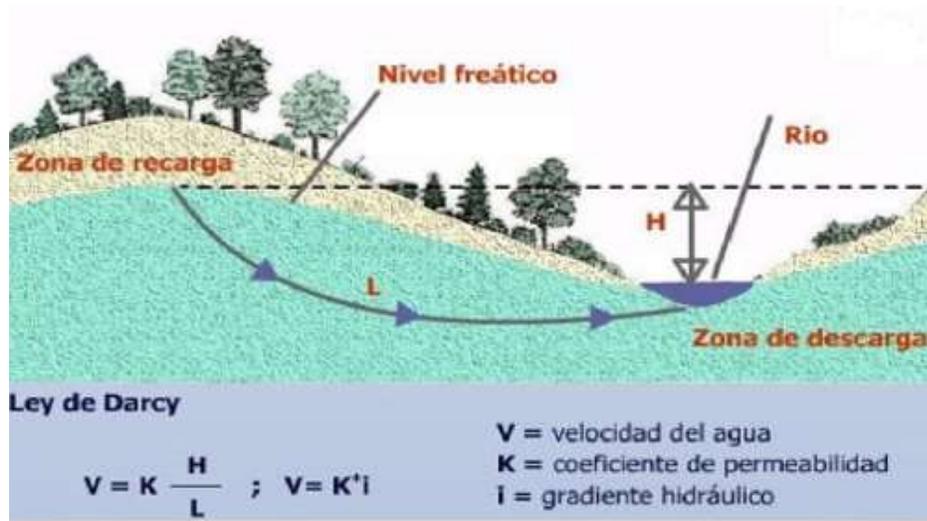


Figura 15. Descripción de la aplicación de la ley de Darcy en un acuífero libre
Fuente: Dpto. de Geología--Univ. Salamanca (España)

Ecuaciones de un acuífero libre a partir de la ley de Darcy

Partiendo de la ecuación de Darcy se tiene lo siguiente:

$$Q = K i S$$

Donde:

k = Conductividad Hidráulica

i = dy / dx (gradiente hidráulico)

S = 2 π x y (superficie)

Resulta:

$$Q = K \left(\frac{dy}{dx} \right) 2\pi xy$$

Despejando:

$$Q \left(\frac{dx}{x} \right) = K 2\pi y dy$$

Integrando:

$$Q \int \frac{dx}{x} = 2\pi K \int y dy$$

Resulta:

$$Q \ln x = 2\pi K y^2 + C$$

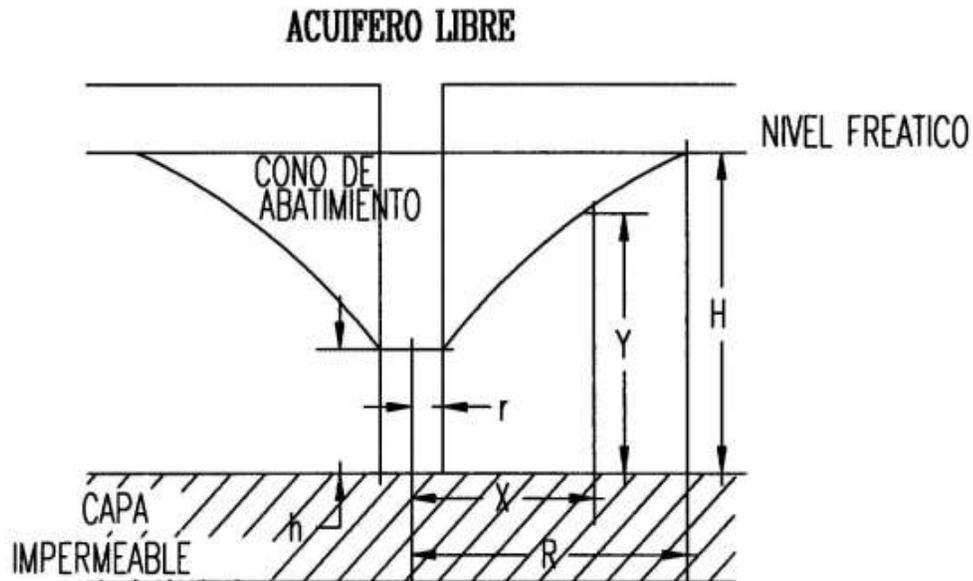


Figura 16. Descripción de un acuífero libre y parámetros

Fuente: Villareal (2013) Evaluación del potencial hídrico y su impacto en el desarrollo de Saltillo Coahuila.

Sustituyendo (x) y (y) de la figura 16, por r, R, h y H

$$Q \ln r = \pi K h^2 + C$$

$$Q \ln R = \pi K H^2 + C$$

Despejando e igualándolas

$$Q \ln r - \pi K h^2 = Q \ln R - \pi K H^2$$

Agrupando términos similares:

$$Q \ln \left(\frac{R}{r} \right) = \pi K (H^2 - h^2)$$

Despejando Q de obtiene: (1)

$$Q = \pi K (H^2 - h^2) / \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

Donde:

$$(H^2 - h^2) = (H - h) (H + h)$$

Si $\Delta = H-h$; o sea $h = H - \Delta$

Sustituyendo resulta: (2)

$$H - (H - \Delta) [H + (H - \Delta)] = \Delta (2H - \Delta)$$

Sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 1: (3)

$$Q = \pi K [\Delta (2H - \Delta)] / \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

Si además se tiene que: (4)

$$\pi K / \ln \left(\frac{R}{r} \right) = C$$

Al sustituir la ecuación (4) en la (3), resulta:

$$Q = C \Delta (2H - \Delta)$$

(Es decir: Que la ecuación se comporta como la fórmula general $Y = ax^2 - a b x$)¹

$$Q = -C \Delta^2 + C \Delta 2H$$

¹ Esta demostración se hizo a partir de la ecuación de Darcy y de los parámetros presentados en el archivo Aforo de pozos tesis de licenciatura (Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro)

Métodos directos

El método más directo, y generalmente confiable, para mejorar el control de la profundidad del muestreo de aguas subterráneas es la instalación de pozos de monitoreo, o piezómetros perforados a propósito a una profundidad dada con un filtro situado a un intervalo de profundidad conocido.

Una vez que el pozo es instalado correctamente, ofrece la posibilidad de obtener muestras representativas de aguas subterráneas a un costo operacional bajo. También se pueden realizar pruebas hidráulicas en estas instalaciones para estimar los parámetros hidráulicos de un acuífero.

En contraste con la mayoría de los pozos de producción de agua, aquéllos específicamente diseñados para monitoreo frecuentemente se acaban con materiales inertes (tales como PVC, teflón, acero inoxidable), son de diámetros más pequeños (normalmente menos de 100 mm y en algunos casos menos de 50 mm) y tienen un área de entrada más limitada (normalmente menos de 5 m y en algunos casos solamente 1 m) El procedimiento de construcción de pozos de monitoreo sigue la misma secuencia que los de producción; esto es, perforación, instalación del filtro del pozo junto con el revestimiento sólido y colocación de un sello sanitario.

La selección del diseño más apropiado para los pozos de monitoreo debe tomar en consideración los objetivos y los límites financieros del programa de monitoreo, los parámetros de interés y su posible nivel de concentración, el equipo de muestreo disponible,

Sondas

Este método se basa en el principio de la conductividad eléctrica del agua y su resistencia eléctrica en donde se hace circular una corriente eléctrica por dos cables estos al tocar el material de estudio, hacen prender un sensor que indica que ha circulado la corriente a través del material.



Figura 17. Sonda de medición
Fuente: Equipos geohidrológicos S. A. de C. V.

El principio es básico se inserta el cable por una manguera unida al tubo de succión de la bomba después de esto el cable mide el nivel estático del pozo prendiendo una luz roja o blanca que indica que se ha alcanzado el nivel estático. Para la medición del nivel dinámico se sigue el mismo procedimiento, pero con la única condición de que se tiene que poner en funcionamiento la bomba y dejar que se extraiga el agua en un cierto periodo de tiempo, pasado este tiempo se apaga la bomba y se introduce el cable para medir el nivel dinámico debido a que ha descendido el nivel del agua con respecto al nivel estático.



Figura 18. Introducción del cable de la sonda por el ADEME del pozo

RASGOS DEL ACUÍFERO ²

Ubicación

El acuífero 0510 Saltillo-Ramos Arizpe que se localiza en la porción sureste del Estado de Coahuila, cuenta con una superficie de 1,446 kilómetros cuadrados y cubre parcialmente a los municipios de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga del Estado de Coahuila.

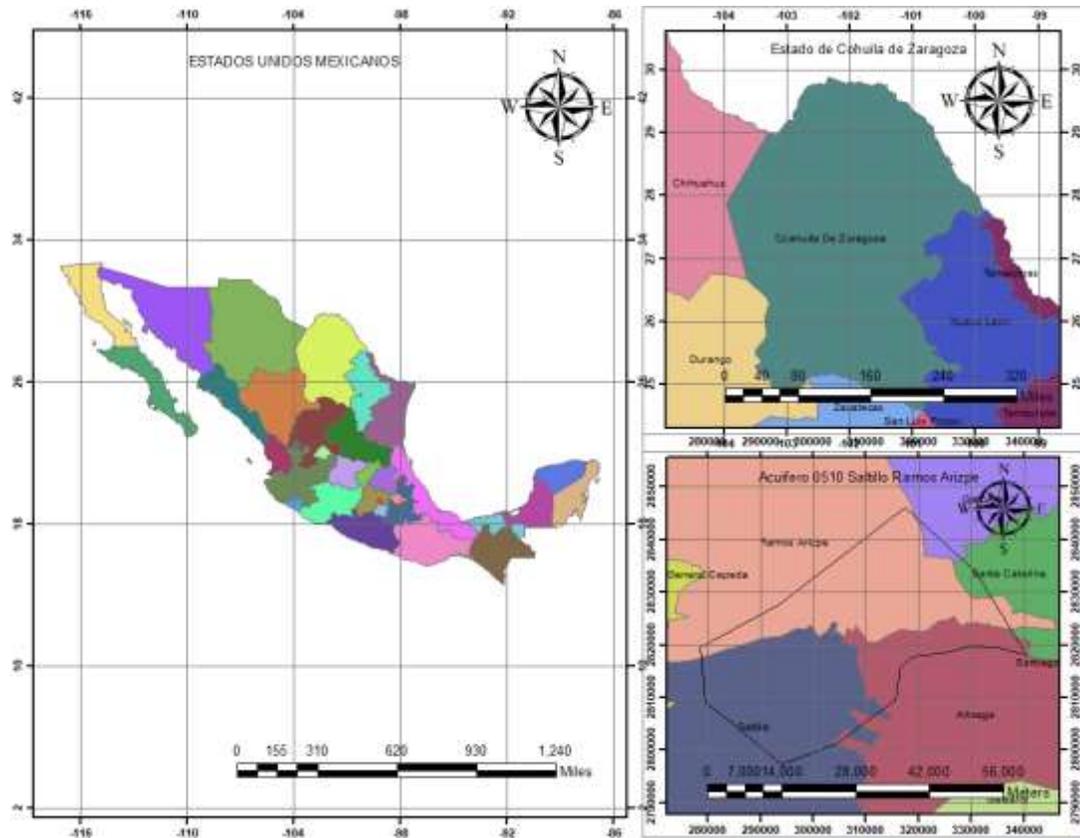


Figura 19. Localización geográfica del acuífero 0510 Saltillo Ramos Arizpe
Fuente: elaboración propia

Los límites del acuífero corresponden a los incluidos en el acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional y están definidos por la poligonal simplificada cuyos vértices se presentan a continuación

² Desde ubicación hasta, tipos de acuíferos son datos obtenidos en el diario oficial de la federación documento creado el 11/10/2011 y que lleva por nombre: ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de los acuíferos Cañón del Derramadero, clave 0502, General Cepeda-Sauceda, clave 0505, Saltillo-Ramos Arizpe, clave 0510 y Región Manzanera-Zapalinamé, clave 0511, en el Estado de Coahuila.

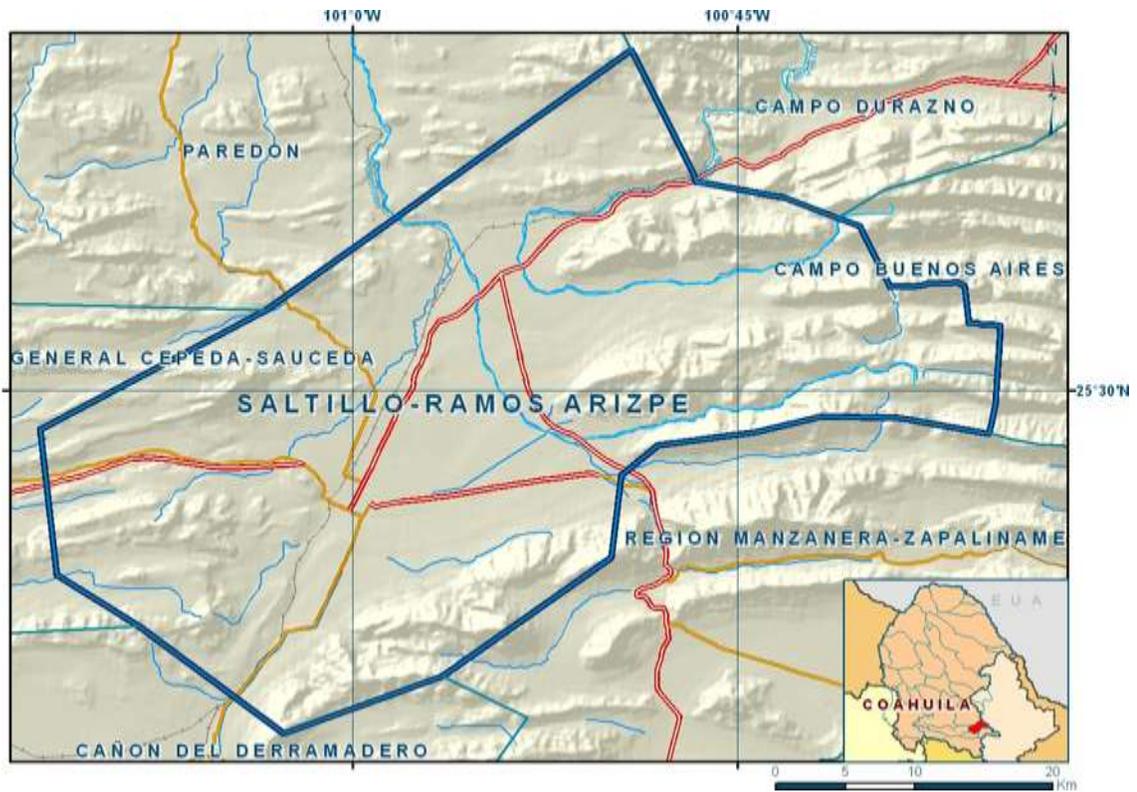


Figura 20. Acuífero 0510 Saltillo-Ramos Arizpe
Fuente: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

Tabla 1. Coordenadas geográficas del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	100	49	7.8	25	43	17.7
2	100	41	6.9	25	36	46.1
3	100	35	11.1	25	28	18.5
4	100	38	41.7	25	28	57.3
5	100	41	40.4	25	29	0.9
6	100	44	16.6	25	28	22.8
7	100	48	5.4	25	27	53.0
8	100	49	32.6	25	26	42.1
9	100	49	55.6	25	23	29.3
10	100	56	29.9	25	18	51.8
11	101	2	41.7	25	16	37.1
12	101	8	20.2	25	20	47.9
13	101	11	32.6	25	22	48.6
14	101	12	11.4	25	28	29.9
15	101	3	23.3	25	33	8.4
1	100	49	7.8	25	43	17.7

Población

Dentro del área que ocupa el acuífero se encuentran la ciudad de Saltillo, capital del Estado y las poblaciones de Ramos Arizpe y Arteaga. De acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía en el 2010, la ciudad de Saltillo contaba con una población de 633,667 habitantes, el Municipio de Saltillo con 648,929 habitantes y su zona metropolitana con 725,529 habitantes. Actualmente al cierre del 2018 su población es de 712,671 y con toda su área conurbada SAARA 985,229 habitantes

Clima

Según el sistema de clasificación de climas de Köppen: BSh, modificado por Enriqueta García, en la zona de estudio se presentan tres tipos de clima: semiseco templado con lluvias escasas todo el año hacia la zona sur, en la Sierra de Zapalinamé; seco templado con lluvias escasas todo el año hacia la planicie de Saltillo; y seco semicálido con lluvias escasas todo el año con un invierno fresco en la zona de Ramos Arizpe. En las tres zonas el porcentaje de precipitación invernal es mayor del 18%.

Temperatura

La temperatura media anual en la zona de sierras varía de 12 a 14 grados Celsius; incrementa su valor hacia la planicie, donde varía de 16 a 18 grados Celsius. La precipitación media anual en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe de acuerdo a la configuración de isoyetas, varía de 600 a 500 milímetros hacia las Sierras de Zapalinamé, Arteaga y San Lucas; La precipitación se distribuye a lo largo del año, con lluvias principalmente en los meses de julio a septiembre. La precipitación media anual en la estación climatológica Observatorio de Saltillo, es de 460 milímetros y en la estación Ramos Arizpe es de 333 milímetros.

Localización fisiográfica

El acuífero Saltillo-Ramos Arizpe se localiza en la provincia fisiográfica denominada de las Sierras y Cuencas, en el límite con la provincia Sierra Madre Oriental. La provincia Sierras y Cuencas se divide en dos zonas con características diferentes: una con topografía relativamente suave que corresponde al valle de Saltillo-Ramos Arizpe; zona de sierras del poniente orientadas este-oeste con topografía abrupta.

Composición geológica y estructural

El acuífero está constituido por depósitos aluviales de gravas, arenas, limos y arcillas, conglomerados, calizas y lutitas fracturadas. El acuífero es de tipo libre en porción a la ciudad de Saltillo, en otra porción del municipio de Ramos Arizpe es de tipo semiconfinado. En la porción del acuífero conformada por calizas, el agua de lluvia se infiltra fácilmente y circula con rapidez a través de las fracturas y conductos de disolución, además de que los pozos resultan de alto rendimiento; mientras que, en la porción del acuífero conformada por materiales de baja permeabilidad, la capacidad de infiltración y circulación del agua subterránea es reducida, y los pozos extraen caudales reducidos. El basamento está conformado por lutitas no fracturadas o con fracturas selladas que impiden la circulación del agua subterránea.

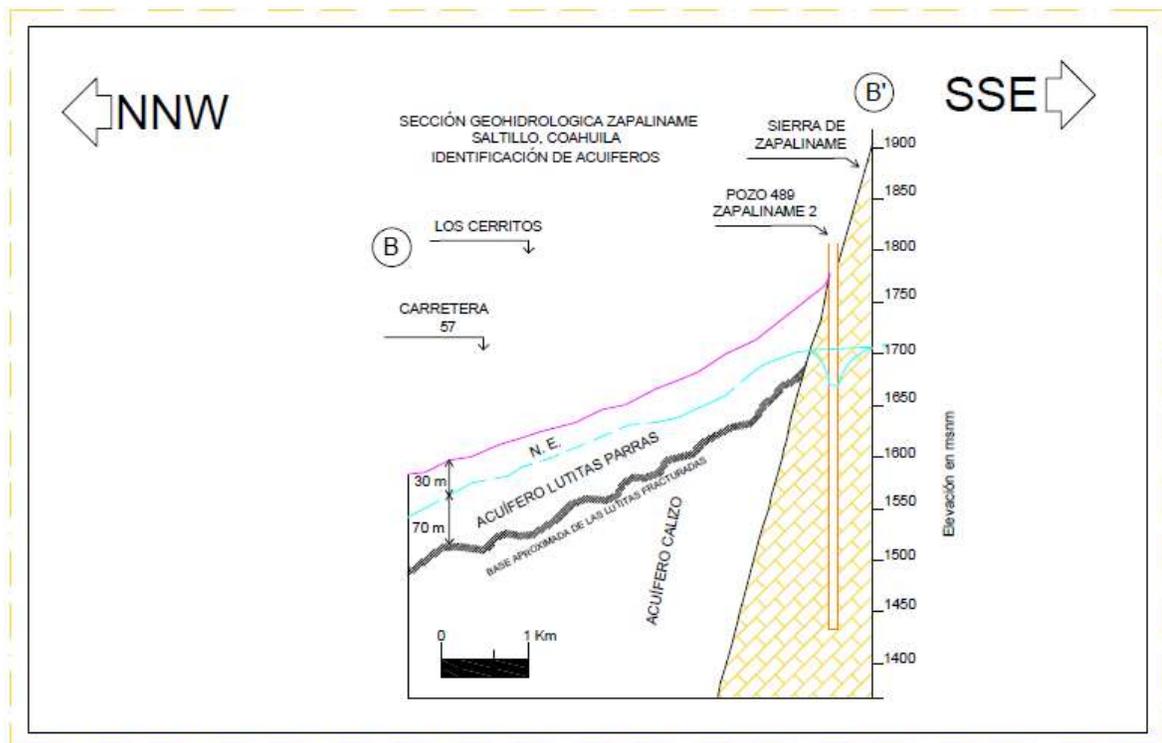


Figura 21. Composición estructuras del acuífero, sección Zapaliname
Fuente: elaboración propia a partir de datos de Lesser y asociados S. A. de C. V.
estudio geohidrológico del valle de Saltillo-Ramos Arizpe

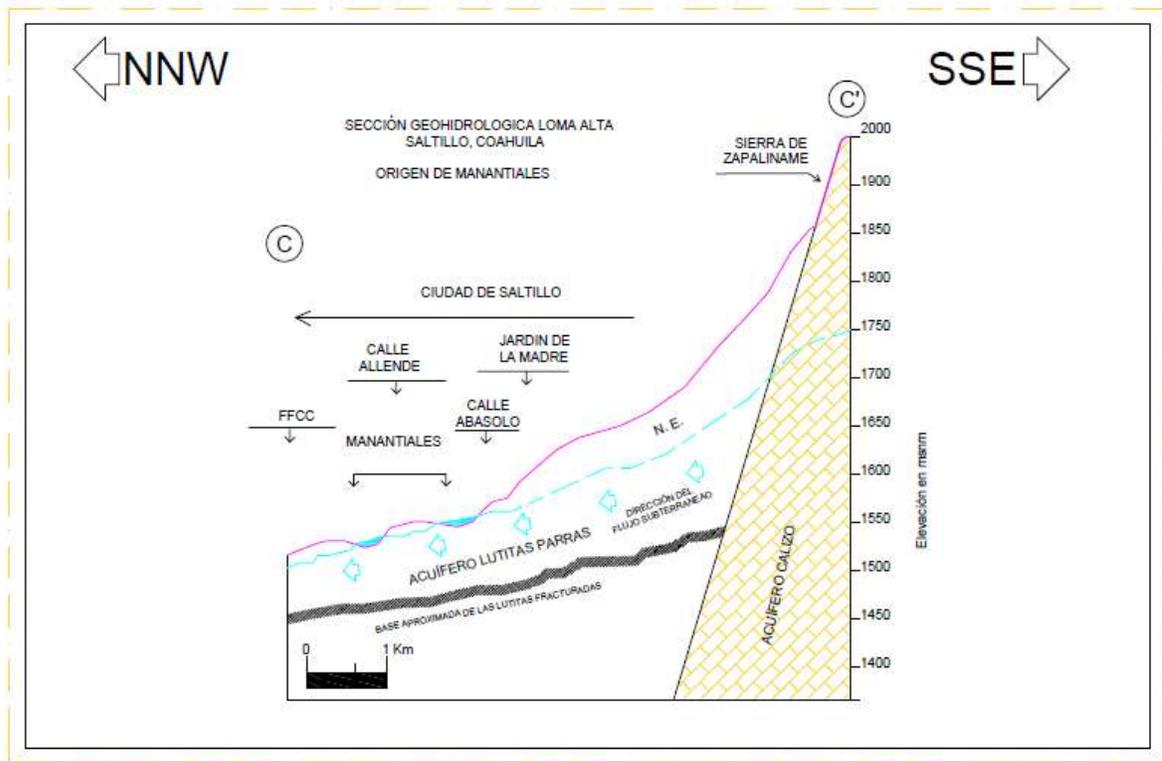


Figura 22. Composición estructural y dirección de flujo del agua, en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, sección Zapaliname

Tipos de acuíferos presentes

La profundidad al agua subterránea, medida desde la superficie del terreno, varía desde 10 metros en la Ciudad de Saltillo y en la población de Ramos Arizpe, hasta 80 metros hacia el oriente, sur y sureste del valle y hacia las sierras localizadas al poniente del valle. La variación de la profundidad al agua subterránea guarda relación con la topografía del terreno, es decir que los niveles más profundos se presentan en áreas topográficamente más altas que representan zonas de recarga, y los más someros en áreas topográficamente más bajas. La cota de elevación del nivel del agua subterránea varía entre 1,700 metros sobre el nivel del mar en la zona de Buenavista, a 1,300 metros sobre el nivel del mar al noreste de Ramos Arizpe; por lo que se infiere que el agua subterránea fluye de suroeste al noreste del valle, coincidiendo con la dirección principal del escurrimiento superficial.

La recarga natural se origina en las sierras localizadas al poniente del valle, y existen entradas subterráneas desde el oriente, sur y suroeste y salida por flujo subterráneo hacia el noreste de Ramos Arizpe. Los abatimientos menores se observan en la Ciudad de Saltillo debido a la reducida extracción o a la infiltración provocada por fugas en la red de distribución de agua potable en la ciudad; y los mayores abatimientos se presentan en el área de Los Valdés y Los González, como consecuencia de la gran concentración de pozos de extracción en esta zona.

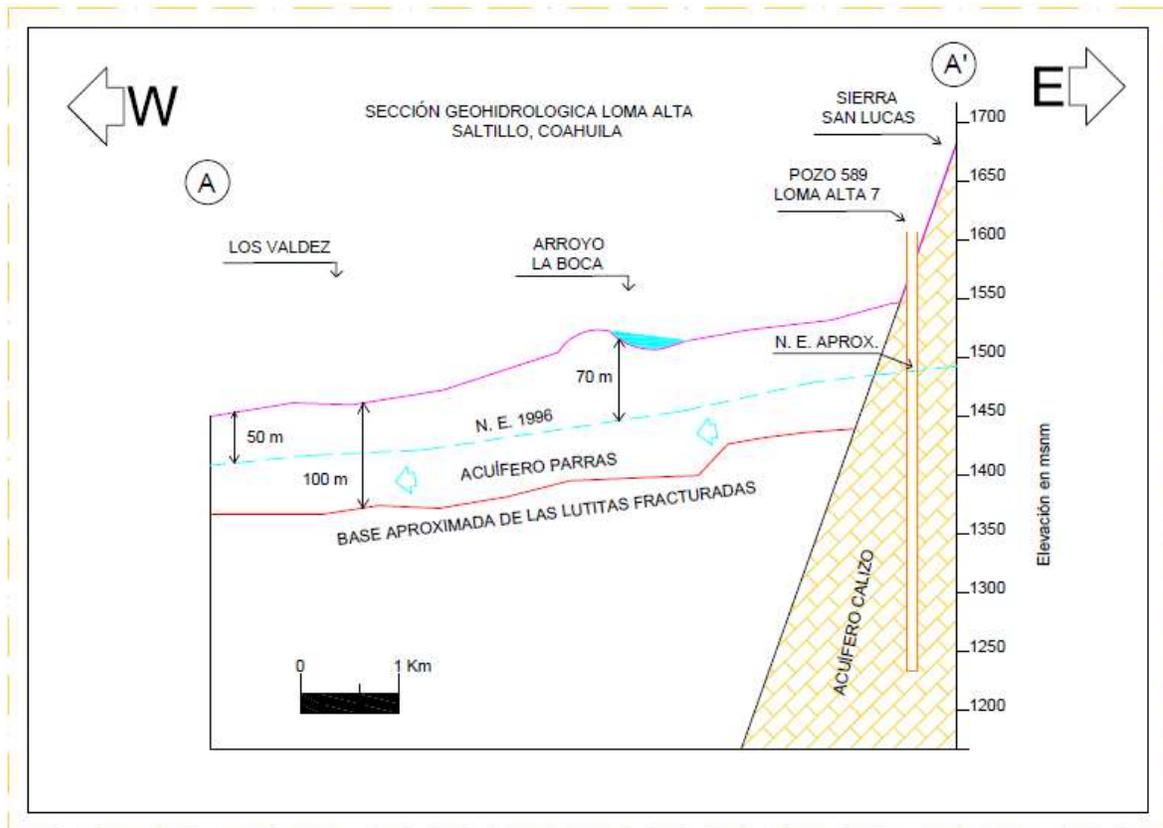


Figura 23. Composición estructural y descripción del acuífero presente en el valle de Saltillo-Ramos Arizpe.

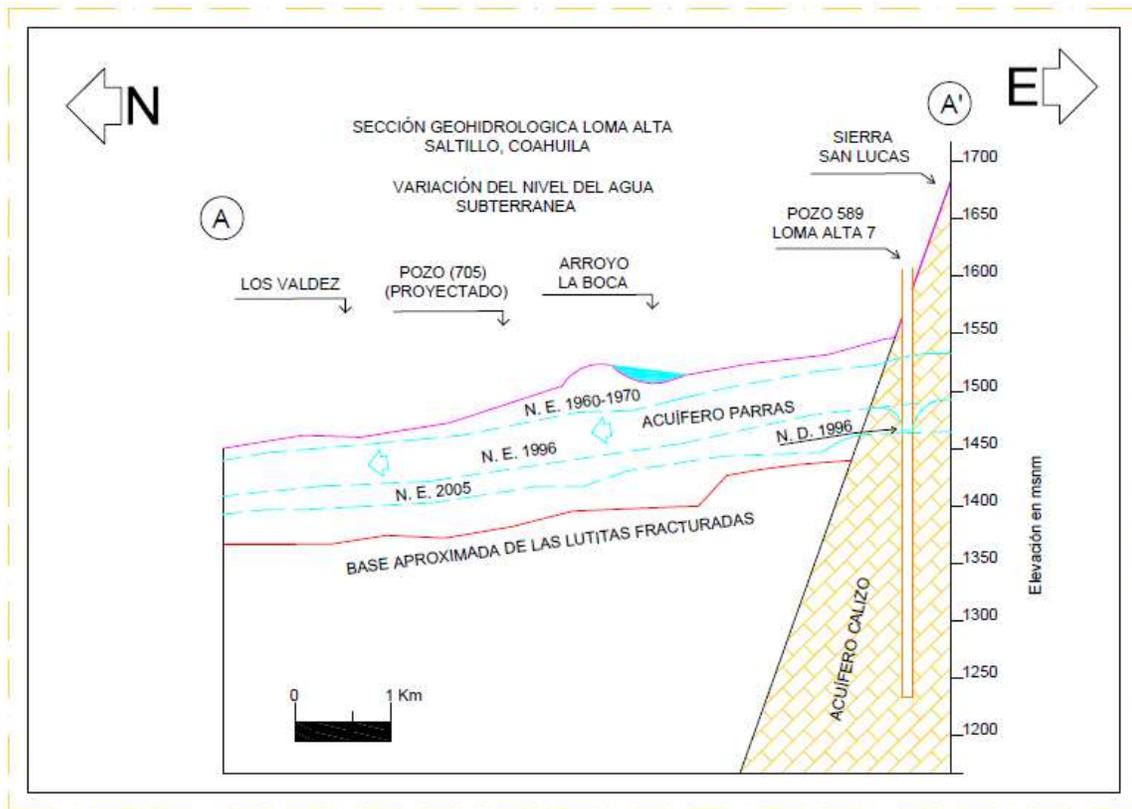


Figura 24. Variación del nivel estático en las diferentes formaciones y acuíferos el acuífero 0510 Saltillo- Ramos Arizpe

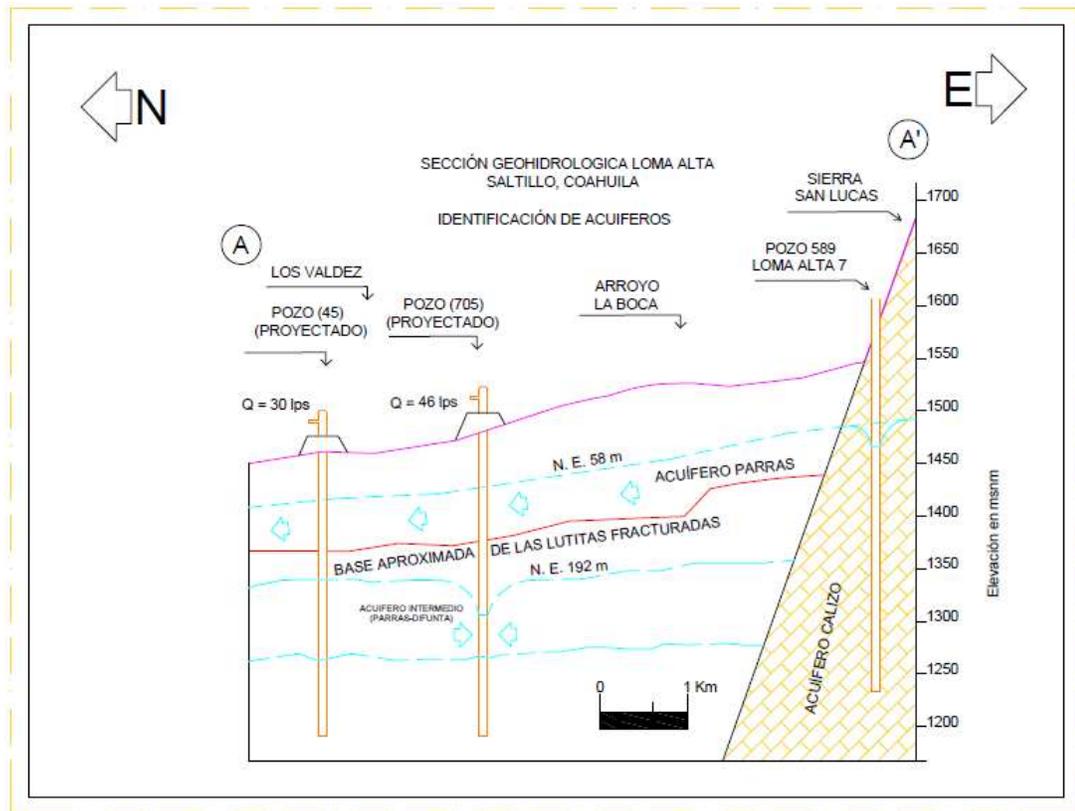


Figura 25. Cambio del nivel estático en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe debido a la presencia de nuevos pozos y proyectados a futuro

LA CIUDAD DE SALTILLO, COAHUILA, EN TÉRMINOS HÍDRICOS.

Fundación

El poblado de la Nueva Tlaxcala fundado en 1577 por Alberto del Canto fue como consecuencia de buscar un lugar donde se pudieran concentrar los productos mineros que provenían de un poblado conocido como gruñidora zacatecas y fue en este lugar donde se encontró un afloramiento cartesiano (brote de un ojito) y se generó el primer asentamiento con miras de actividades de comercio y tráfico. Con el tiempo la población se incrementó y se agudizó el problema de abastecimiento de agua iniciándose para principios de 1600 las primeras construcciones de norias ademadas. Ahora en la actualidad la población se ha generado en el Valle del Saltillo, incluyendo las áreas urbanas de Ramos Arizpe y Arteaga.

La Gestión del Agua en Saltillo.

En la Ciudad de Saltillo, ha sido concesionada a una empresa privada (Aguas de Barcelona) que requirió de la inversión de una fuerte cantidad de capital para poder reparar las líneas de suministro de agua urbana, así como los estudios de exploración, equipamiento, conducción del vital líquido.

Se optimizó el suministro, más sin embargo poco interés muestra en preservar el acuífero ya que la política de esta empresa es el cobro del servicio y no el del recurso. Sus expectativas como cualquier empresa es el de traer agua de otro ecosistema a futuro y seguir cobrando el servicio.

La empresa paramunicipal Aguas de Saltillo, tiene a su cargo los servicios de agua potable y alcantarillado en el municipio de Saltillo desde el 1° de octubre de 2001.

A lo largo de estos años se han denunciado varias irregularidades en la gestión de la empresa, a las que no se le ha dado seguimiento por parte de las autoridades municipales.

En el 2003, el Congreso del Estado de Coahuila ordenó a la Contaduría Mayor de Hacienda, llevar a cabo una auditoría a esta empresa, para el periodo octubre de 2001 a diciembre de 2002. A pesar de que esta auditoría no comprendió todos los aspectos de la gestión de Aguas de Saltillo, se encontraron varias irregularidades en la gestión de la empresa, cuya solventación fue aceptada por el municipio de Saltillo, a pesar de que no se dio plena satisfacción a todas las irregularidades detectadas.

En el transcurso de los 5 ½ años que han transcurrido desde el periodo revisado en la auditoría mencionada, se han acumulado nuevas irregularidades, para asegurar que la empresa esté cumpliendo con la normatividad federal, estatal y municipal vigente, y con los contratos de Asociación y de Asistencia Técnica que se firmaron con el socio privado.

Historial de la explotación del agua del subsuelo en Saltillo con respecto a su desarrollo económico y productivo.

Agsal presenta información contradictoria en sus Memorias Anuales (MA) 2004 y 2005 (último año en que reporte estos datos) sobre los volúmenes de extracción. Mientras que en la página 8 de la MA 2004 se indica que el caudal extraído en servicio continuo en el 2004 fue de 1647 litros por segundo (que equivalen a 52.1 millones de metros cúbicos al año), en la página 7 de la MA 2005, el dato que se reporta como volumen extraído en el

2004 es de 39.2 millones de metros cúbicos. La diferencia entre estos dos valores es de 12.9 millones de metros cúbicos.

En las Memorias Anuales 2006 y 2007 no se presentaron datos de volúmenes de extracción; pero en el Informe de Responsabilidad Corporativa de Agsal 2007, se indica que la extracción en ese año fue de 43.2 millones de metros cúbicos.

Según la información entregada por Agsal al cuestionario de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), en el 2004 se extrajeron 53.2 millones de metros cúbicos (m³) del subsuelo. Este dato es similar al publicado en la memoria anual 2004 (52.1 M de m³), y en los boletines Info-Aqua para el mismo periodo.

Los pagos que ha hecho Agsal a la Comisión Nacional del Agua (CNA) en el periodo 2002–2004, corresponden a los publicados en la MA 2005 de la empresa.

Además de la discrepancia señalada entre los datos de Agsal, los volúmenes reportados en la memoria anual 2005 son muy bajos para una ciudad del tamaño de Saltillo, como se puede apreciar mediante su comparación con los volúmenes de agua extraídos en otras cuatro ciudades del Estado de Coahuila en el 2004.

Aspectos de la Problemática del Agua en la Ciudad de Saltillo.

a). Disminución de recursos hídricos de buena calidad disponibles.

En la región SRRA, el agua de buena calidad disponible es un recurso escaso que se ha ido agotando paulatinamente. Esta situación puede agravarse en el futuro por el crecimiento de la población, la sobre-explotación y sobre-concesión de los recursos hídricos disponibles y la posibilidad de que se presenten sequías relativamente prolongadas, entre otras razones. Si esto ocurre, la escasez aumentaría severamente, trayendo como consecuencias el encarecimiento del agua y la competencia entre los usuarios urbanos, agropecuarios e industriales.

Los principales acuíferos que abastecen a la región son: Saltillo-Ramos Arizpe, Cañón del Derramadero, Saltillo Sur, General Cepeda-Sauceda y Región Manzanera-Zapalinamé, los cuales alimentan varios miles de pozos, de donde se extrae el agua para satisfacer las necesidades de la región.

Por otro lado, la distribución del agua extraída de los mismos se realiza de esta forma: 56% para el sector agropecuario, 35% para el sector urbano, 4% para la industria y el 5% restante para otros usuarios.

b). La calidad del agua de la Ciudad de Saltillo.

Adicionalmente, la calidad del agua extraída de los diferentes pozos se ha visto mermada en los últimos años. Es evidente que, de 2000 a 2009, la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) ha aumentado, acercándose al límite máximo permitido (1000 mg/L) por la norma NOM-127-SSA1-1994 en algunos pozos y sobrepasándolo en otros (hasta de 1,900 mg/L en la zona urbana). Gráfica 6. Concentración de sólidos disueltos totales en los 45 pozos localizados fuera de la zona urbana que abastecen a la ciudad de Saltillo, en 2000 y 2009.

Es importante mencionar que más del 30% de los pozos de la zona urbana sobrepasa el límite de SDT permitidos por la norma NOM-127. Por otro lado, una cantidad importante de pozos localizados al norte de Saltillo y en Ramos Arizpe, excede los límites para otros parámetros, como dureza total (hasta 694 mg/L), sulfatos (hasta 590 mg/L) y nitratos (hasta 58 mg/L), entre otros.

Estudios previos sobre la Situación Hídrica en Saltillo.

Como respuesta al problema, diversos sectores de la sociedad han llevado a cabo acciones aisladas, que han dado lugar a mejoras parciales. A continuación, se mencionan las más representativas de los últimos quince años:

- Un “Plan de Abastecimiento de Agua a Largo Plazo para la Ciudad de Saltillo”, realizado por las empresas consultoras Freese Nichols / Woodward Clyde, a solicitud de FIDAGUA en 1996.
- La apertura de un nuevo campo de pozos para abasto de la Ciudad de Saltillo, en el área de Carneros (del acuífero Saltillo Sur), en 1997-1998.
- Estudios de los acuíferos regionales, realizados -a solicitud de Conagua- por varias empresas especialistas en geohidrología, en 2002; y una actualización del estudio del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, entregada en 2007.
- Programas de cultura del agua, realizados por SIMAS-Saltillo antes de 2001 y por CEAS Coahuila.

- Construcción de tres plantas tratadoras para las aguas residuales municipales de Saltillo y Ramos Arizpe. Del agua tratada, actualmente se utilizan aproximadamente 10 Lps., para riego de áreas verdes municipales en Saltillo. El remanente es descargado a un arroyo, del cual se abastecen usuarios agrícolas para riego de sus parcelas.
- Programas de “Conservación y ahorro de agua”, instalación de sistemas de tratamiento de agua de abasto, de tratamiento y reusó de aguas residuales, y de evaporación de salmueras de procesos de desalación, realizadas por industrias locales. Algunos de estos proyectos involucraron el desarrollo de pruebas piloto para seleccionar las alternativas más adecuadas para cada corriente a tratar.
- Proyectos de investigación desarrollados en universidades y centros de investigación locales.

Sin embargo, estas acciones aisladas no se han reflejado en un impacto social masivo, debido entre otras razones, a la falta de conciencia sobre la problemática del agua, y de continuidad de parte de las administraciones municipales, estatales y federales relacionadas con el tema; la baja concientización de la sociedad; y/o la falta de mecanismos adecuados para la integración de los resultados obtenidos a partir de la investigación científica y su implementación en condiciones reales.

Aspectos hidrogeológicos³

Transmisividad

Para el caso de saltillo cuenta con una transmisibilidad que va de $0.020 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$ a $2.250 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$

Coefficiente de almacenamiento

Para el caso de saltillo cuenta con una transmisibilidad que va de 0.015

³ Datos obtenidos de Lesser y asociados S. A de C. V. Estudio Hidrogeológico del valle de Saltillo-Ramos Arizpe

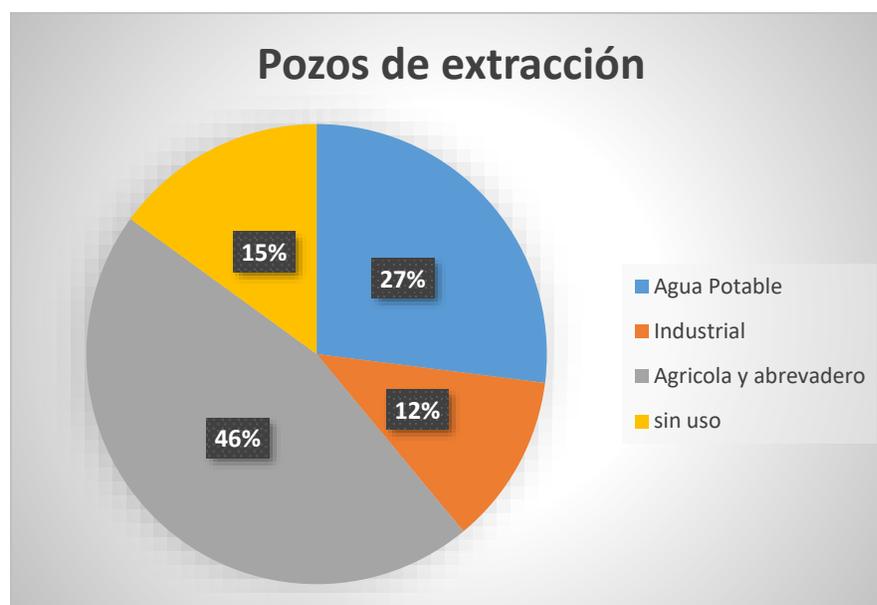
Extracciones en millones de m³/año la cantidad de agua extraída se muestra Tabla 2

Tabla 2. Extracciones en el valle de saltillo

Uso	Extracción en: millones de m ³ /año		
	Pozos	En el valle	En la zona de balance
Agua Potable	197	45.1	9.5
Industrial	87	10.1	6.4
Agrícola y abrevadero	329	12.2	8.2
sin uso 112	112	0	0
Total	725	67.4	24.1

Tabla 3. Historial de extracción de agua en el Valle de Saltillo

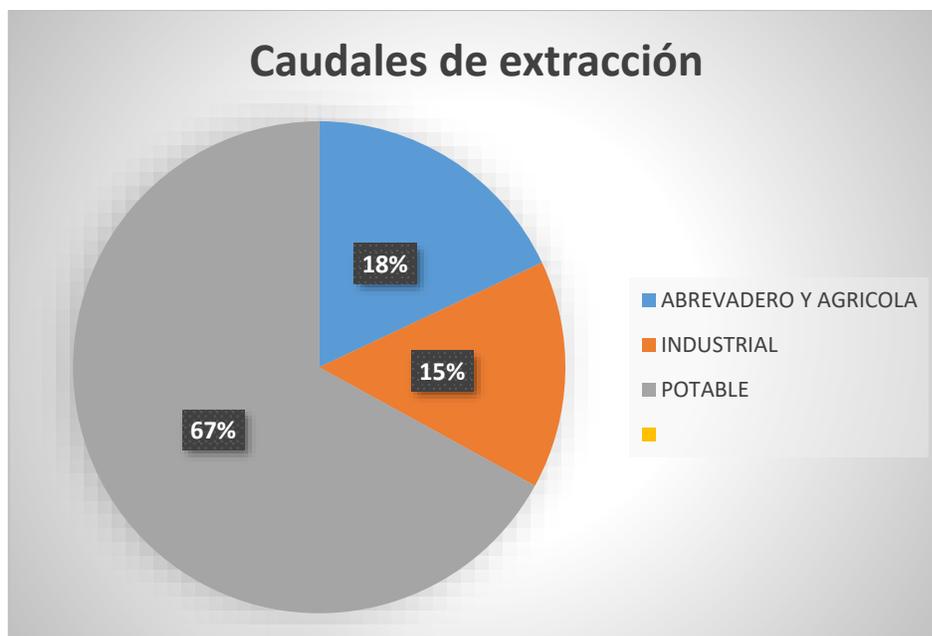
Año	Extracción	
	reportada	pagada a CNA
	millio de m ³ /año ⁴	millio de m ³ /año ⁵
2002	47.5	41.5
2003	50.9	40.5
2004	52.1	39.2



Grafica 1. Porcentaje de extracción de pozos

⁴ De Memoria Anual 2004 (Caudal en servicio continuo en lps * 86,400 segundos/día *

⁵ De Pagos a CNA (información obtenida por medio de una solicitud de información y de 365 o 366 días por año * 1 m³/1000 litros



Grafica 2. Porcentaje de caudales de extracción

Balance de agua subterránea

De la ecuación

$$E = S \pm A_s$$

$$E_s + Inf = S_s + Ext - A_s$$

Sustituyendo valores en millones de m³ anuales

$$14.63 + inf = 2.3 + 24.29 - 5.97$$

$$Inf = 5.99 \text{ millones de m}^3 \text{ anuales}$$

Balance (millones de m³ anuales)

$$E_s = 14.63$$

$$S_s = 2.30$$

$$Ext = 24.29$$

$$A_s = -5.97$$

$$Inf = 5.99$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El presente trabajo se realizó en el centro dentro del área urbana de Saltillo misma que se encuentra dentro del acuífero de estudio el acuífero 0510 Saltillo Ramos-Arizpe que se encuentra entre la coordenada UTM, 298320.20 m E, 2813308.95 m N y una altimetría de 1592 metros sobre el nivel del mar, con un Clima semiárido (Clasificación climática de Köppen: BSh), y un área de 683.700 hectárea 6.837,00 km².

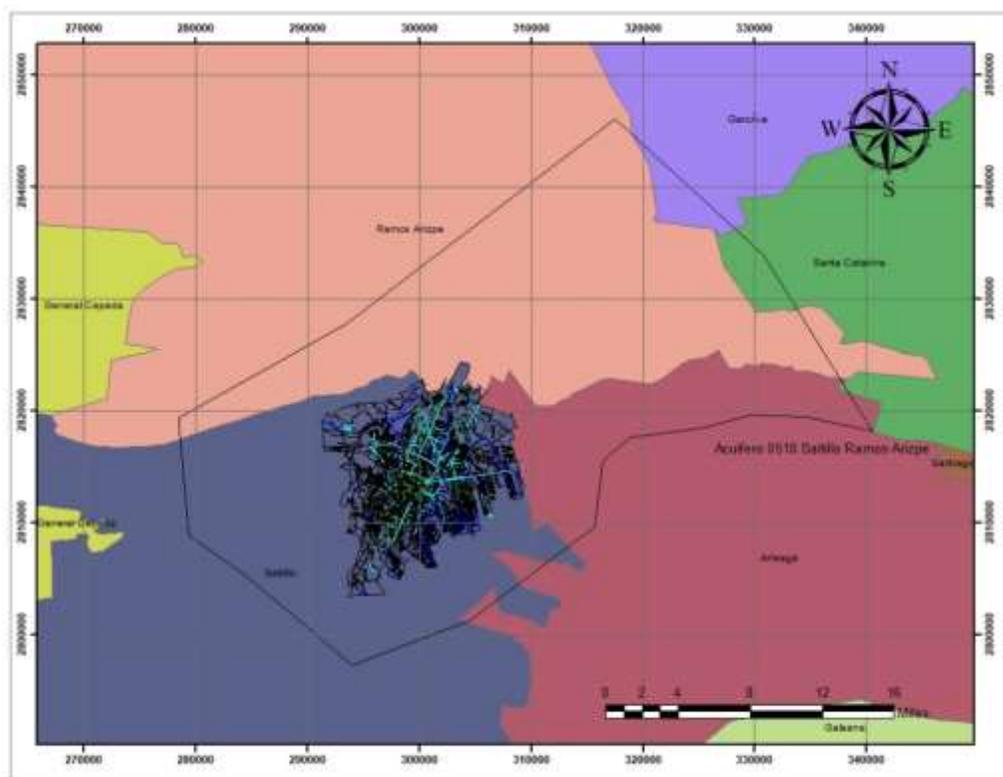


Figura 26. Ciudad de Saltillo dentro del acuífero 0510 Saltillo-Ramos Arizpe
Fuente: elaboración propia

Método

La ubicación de los pozos fue al azar considerando una mayor representación del centro de la ciudad y el método es una evaluación directa, el monitoreo del nivel de los mismos son medidos con sonda de diferencial eléctrico y con respecto a una georreferencia para construir unas curvas de isoniveles tanto estático como dinámico.



Figura 28. *Medición del nivel estático y dinámico con la sonda diferencial*

Con este método se pretende evaluar el comportamiento piezométrico que ha tenido el acuífero dentro de un periodo de tiempo, comparando los resultados obtenidos con este método con los resultados obtenidos en años pasados dentro de la misma área de estudio y con el mismo método.

Dicha metodología involucra medir los gastos de cada pozo, el nivel estático y dinámico del pozo para poder construir los isoniveles.

La medición del nivel tanto estático como dinámico es través de una sonda en el cual, la sonda mide la altura con respecto al nivel del suelo donde se encuentra el espejo del agua, después de cierto tiempo de bombeo se mide el nivel dinámico.

Lo más importante a destacar de este método es que no utiliza métodos estadísticos por lo que los resultados obtenidos son confiables por ser medidos directamente.

Los datos se concentran en una base de datos, con diferentes variables entre ellos se mencionan el de aforo de caudales en (lps), el nivel estático y dinámico (metros sobre el nivel del mar) en donde el testigo son las mismas variables medidas hace seis años y en años posteriores hasta la medición del año de estudio, el año 2018

Las ventajas y desventajas residen en los siguientes puntos:

Ventajas:

- Las mediciones son directas
- Los resultados son 100 % fiables
- No son costosas frente a otros métodos como el método del piezómetros y pozos de observación
- No involucra modelos matemáticos ni estadísticos por lo que los resultados son más rápidos de procesar

Desventajas:

- Al momento de realizar las mediciones con la sonda hay obstrucciones debido a las condiciones de los pozos
- Se puede realizar una medición errónea debido a que el sensor, detecta las más mínimas concentraciones de humedad dentro del pozo
- En casos extremos el cable se llega a reventar

Descripción de la metodología

1.- Se selecciona del padrón total de pozos un conjunto de los más representativos de acuerdo al tipo de acuífero que se quiera estudiar.

2.- Se define que el tipo de acuífero a estudiar, es el acuífero libre por lo que se descarta a los municipios de Arteaga y una parte de ramos Arizpe debido a que, en el conjunto de pozos del padrón total solo 29 representan este tipo de acuífero el otro porcentaje representa un acuífero semiconfinado y confinado para el caso de Arteaga por lo que se omiten y solo se estudian estos 29 pozos

4.- Se estudia la formación geológica y estructura de los 29 pozos.

5.- Se define que el rango de estudio, tendrá una influencia del 60 % de acuerdo al comportamiento del acuífero basado en las cartas geológico mineras del servicio geológico mexicano

5.- Se aforan los pozos y con este se tiene el registro del año 2018, se toma la ubicación de los 29 pozos con un GPS y se mide el nivel estático y dinámico correspondientes al año 2018 con una sonda diferencial de 300 metros de largo.

6.- Los puntos tomados con el GPS y los aforos se procesan con el programa computacional **ArcGIS** para sacar curvas e isoniveles que se comparan entre sí, por un periodo de dos años.

7.- Con los resultados obtenidos, se construye una ruta de explotación y comportamiento basado en los **aforos y la medición del nivel estático y dinámico de los 29 pozos en años anteriores**, distribuidos estratégicamente en el área del acuífero. El Testigo es el comportamiento de estas variables, de hace 6 años y en años posteriores hasta el año 2018.

8.- Se concluye de acuerdo a los datos si la hipótesis es válida o no de acuerdo al procesamiento de datos en el Programa ArcGIS y las curvas obtenidas A partir de la medición del nivel estático y dinámico y de los aforos.

Materiales

Los materiales a utilizar son:

- Sonda eléctrica con 300 mts de cable
- Manómetro digital
- Medidor volumétrico
- GPS
- Cámara Fotográfica
- Voltiamperímetro de gancho.
- Programa asistido por computadora AutoCAD, ARC GIS, paquete Surfer

Descripción de cada uno de los materiales

Sonda eléctrica con 300 mts

Cuenta con un cable de 300 metros de largo y un enrollador metálico con manivela para hacer más fácil el uso en campo con dos terminales en punta, a una separación de 10 cm y en la parte frontal del lado derecho dos puntas al descubierto para la conexión del multiamperímetro.



Figura 29. Sonda ocupada durante el estudio

Manómetro

Consiste en un manómetro que tiene en su interior glicerina para un mejor funcionamiento del equipo 0-100 psi de ¼ "NPT

Medidor volumétrico

Consiste en un medidor de caudal que va acoplada en la descarga de la bomba su funcionamiento es básico dentro de este contiene una veleta tipo molinete que es accionada y girada cuando el agua es descargada, y este a su vez activa un sensor de movimiento que registra el número de vueltas que da y así registra el volumen total descargado por el pozo en lps.

GPS

Es un aparato que mide la localización geográfica y posición satelital en un lugar específico, este recibe la señal de muchos satélites para asegurar una mayor precisión, mide la altitud con respecto al nivel del mar y las coordenadas son medidas en el sistema UTM (Universal Transversa Mercator), NAD 27 o ITRF 92.

Cámara Fotográfica

Básicamente una cámara cualquiera ya sea el que integran los celulares o las individuales su principio básico es captar imagen en alta resolución para su impresión en una malla de pixeles.

Voltiamperimetro de gancho

Consiste en un medidor de corriente alterna A/C y de corriente directa D/C, medidor de amperaje y funciona también para guiar una corriente por un material conductor, para saber si hay continuidad, este principio es el que maneja el diferencial eléctrico.

Programa asistido por computadora ARC GIS Surfer

Paquete de software que se utiliza para la creación de mallas en 2D y 3D sobre perfiles en los que utilizan las coordenadas (x, y, z)

Desarrollo del proyecto

A.- Se hace un recorrido por la zona de estudio buscando la ubicación de los pozos ayudados por una carta topográfica 1:50000 INEGI 2010 y otra de la ubicación de pozos del SARA Saltillo, y con un GPS tomamos los puntos de cada pozo.

B- Apoyados por la carta geológica minera (SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO) 1:50000 se estudia las formaciones rocosas en el acuífero de estudio.

C.- Tomados los puntos se hace una medición con sonda introduciendo el cable a través del tubo de medición, antes del bombeo para medir el nivel estático, empieza el bombeo y después de unas cuantas horas del bombeo se mide otra vez para saber el nivel dinámico.

D.- Se medirán los aforos de los pozos en un cierto periodo de tiempo para saber si no hay variación de caudales.

E.- Se construirán a partir de los datos, las curvas e isoniveles en el programa ArcGIS para compararlas, con los resultados de los años anteriores y el testigo, estrecho a eso también se hará el polígono del acuífero para poder georreferenciar también los puntos tomados con el GPS.

F.- Emitir una conclusión final, sobre el método de evaluación directa, en la aplicación y resolución de este tipo de estudios en geohidrología.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente trabajo logro realizar en el área urbana de saltillo misma que se encuentra dentro del acuífero de estudio, el acuífero 0510 Saltillo Ramos-Arizpe que se encuentra entre la coordenada UTM, 298320.20 m E, 2813308.95 m N y una altimetría de 1592 metros sobre el nivel del mar, con un Clima semiárido (Clasificación climática de Köppen: BSh), y una superficie de 683.700 hectárea 6.837,00 km².

Conjunto de pozos SAARA

Del total de pozos que se encuentran en el acuífero esta es su ubicación de cada pozo mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 4. Conjunto de pozos que conforman el acuífero 0510 Saltillo Ramos Arizpe

Clave	Enumeración	Coordenadas UTM		Altimetría
		m E	m N	msnm
SRA-001	1	311713	2818598	1592
SRA-002	2	311944	281814	1592
SRA-003	3	312470	2818376	1603
SRA-004	4	311894	2820395	1592
SRA-005	5	311914	2820548	1592
SRA-006	6	312019	2820697	1600
SRA-008	7	311896	2820276	1594
SRA-009	8	311786	2820027	1610
SRA-010	9	313285	2819350	1334
SRA-011	10	313170	2819394	1636
SRA-013	11	305559	2808207	1866
SRA-015	12	306620	2809038	1801
SRA-016	13	306611	2808689	1809
SRA-017	14	307097	2809584	1798
SRA-018	15	307527	2809679	1799
SRA-019	16	307761	2809625	1828
SRA-020	17	304936	2813644	1822
SRA-021	18	305061	2814670	1831
SRA-022	19	311462	2811317	1820
SRA-023	20	295650	2803503	1841
SRA-024	21	300061	2803635	1914
SRA-025	22	296219	2800210	2028
SRA-026	23	296133	2800417	2045
SRA-027	24	294917	2806212	1733

SRA-028	25	294996	2806302	1733
SRA-031	26	295831	2805225	1797
SRA-033	27	295621	2804712	1811
SRA-034	28	295331	2804273	1826
SRA-036	29	296511	2807926	1732
SRA-039	30	296537	2806801	1775
SRA-042	31	300687	2813384	1582
SRA-044	32	302208	2819377	1484
SRA-046	33	303215	2819399	1478
SRA-047	34	304373	2816884	1501
SRA-048	35	308236	2813071	1633
SRA-049	36	304932	2814001	1574
SRA-050	37	301822	2814246	1568
SRA-051	38	301461	2815532	1516
SRA-052	39	300371	2815067	1541
SRA-056	40	297225	2817767	1525
SRA-057	41	297539	2813000	1591
SRA-058	42	297574	2813037	1592
SRA-060	43	301247	2813109	1586
SRA-061	44	301607	2807113	1879
SRA-062	45	301391	2807436	1845
SRA-066	46	300218	2811472	1650
SRA-067	47	300517	2812340	1621
SRA-068	48	300586	2812626	777
SRA-069	49	300955	2812123	1614
SRA-071	50	300249	2812950	5261
SRA-072	51	299258	2811890	1644
SRA-074	52	298823	2816074	1547
SRA-075	53	298717	2844291	1572
SRA-076	54	302800	2811439	1647
SRA-079	55	313214	2831025	1433
SRA-080	56	313352	2833833	1264
SRA-081	57	313717	2834155	1253
SRA-082	58	314325	2833960	1255
SRA-084	59	312098	2834236	1279
SRA-085	60	311099	2833054	1292
SRA-086	61	312550	2829451	1384
SRA-087	62	312623	2829306	1400
SRA-088	63	305923	2828172	1408
SRA-090	64	306045	2827938	1403
SRA-091	65	306106	2814292	1614

SRA-092	66	306100	2814306	1612
SRA-095	67	301223	2813942	1572
SRA-097	68	300683	2813545	1583
SRA-098	69	302243	2813327	1588
SRA-099	70	302210	2813292	1595
SRA-154	71	305903	2834838	1335
SRA-195	72	316235	2835107	1237
SRA-208	73	300710	2813083	1587
SRA-209	74	299577	2814145	1589
SRA-212	75	297665	2813300	1578
SRA-215	76	297870	2813201	1598
SRA-219	77	298236	2812030	1672
SRA-220	78	304936	2813644	1583
SRA-221	79	305081	2814670	1563
SRA-225	80	305995	2814171	1589
SRA-226	81	306013	2814156	1581
SRA-230	82	298875	2809330	1732
SRA-233	83	299267	2809562	1728
SRA-234	84	293020	2809597	1727
SRA-235	85	299065	2809097	1745
SRA-236	86	298782	2809481	1717
SRA-237	87	297786	2807894	1766
SRA-248	88	303266	2824205	1416
SRA-252	89	296913	2808104	1725
SRA-253	90	295806	2807477	1725
SRA-258	91	302757	2820767	1465
SRA-259	92	300018	2816147	1534
SRA-260	93	300031	2816137	1535
SRA-262	94	300673	2815971	1536
SRA-267	95	304966	2828748	1353
SRA-273	96	302336	2821987	1449
SRA-274	97	301943	2820304	1472
SRA-275	98	302888	2822403	1437
SRA-276	99	301773	2819831	1482
SRA-278	100	299553	2814533	1556
SRA-280	101	299626	2815410	1545
SRA-282	102	300203	2816094	1541
SRA-283	103	302658	2819927	1472
SRA-284	104	302307	2820177	1476
SRA-285	105	302718	2822843	1450
SRA-291	106	298903	2815183	1552

SRA-300	108	297973	2816442	1545
SRA-323	109	296531	2807069	1737
SRA-326	110	301151	2823033	1450
SRA-329	111	300129	2816195	1523
SRA-334	112	303511	2826985	1375
SRA-341	113	305467	2827812	1393
SRA-342	114	305678	2827566	1397
SRA-352	115	311791	2824609	1443
SRA-360	116	310332	2823536	1479
SRA-373	117	313681	2824821	1463
SRA-378	118	312553	2822245	1534
SRA-384	119	304395	2824780	1427
SRA-402	120	298427	2815205	1580
SRA-407	121	299788	2816613	1510
SRA-408	122	299737	2818335	1505
SRA-409	123	298544	2814650	1571
SRA-410	124	298585	2814893	1548
SRA-414	125	300225	2816920	1534
SRA-426	127	299503	2816333	1573
SRA-434	128	302806	2823665	1427
SRA-445	129	286130	2817109	1659
SRA-453	130	285916	2817973	1625
SRA-457	131	302511	2823329	1424
SRA-465	132	311426	28144378	1639
SRA-549	133	305248	2819842	1491
SRA-553	134	311192	2816632	1601
SRA-603	135	300459	2813946	1572
SRA-609	136	301223	2812827	1598

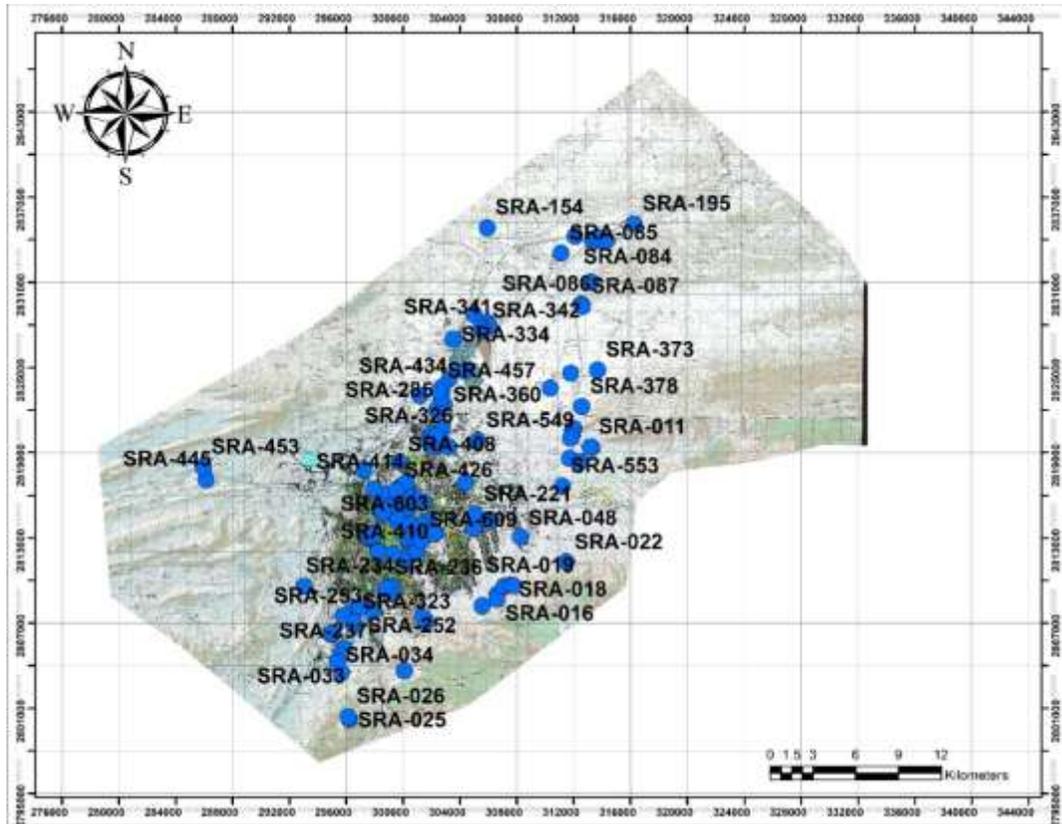


Figura 30. Conjunto de pozos SAARA
Fuente: elaboración propia

Conjunto de pozos seleccionados para el estudio

Del conjunto total de pozos solo 29 son los más representativos y un afloramiento, la prueba de ello son los datos tomados como testigo de hace seis años estos datos incluyen el nivel estático y nivel dinámico de cada pozo, y el aforo de los mismos, aunque los datos faltantes son la ubicación de los pozos, por lo que en el recorrido de campo se realizaron también estas mediciones y los 29 pozos seleccionados se enumeran a continuación en la tabla 5 y se ilustran en la figura 31.

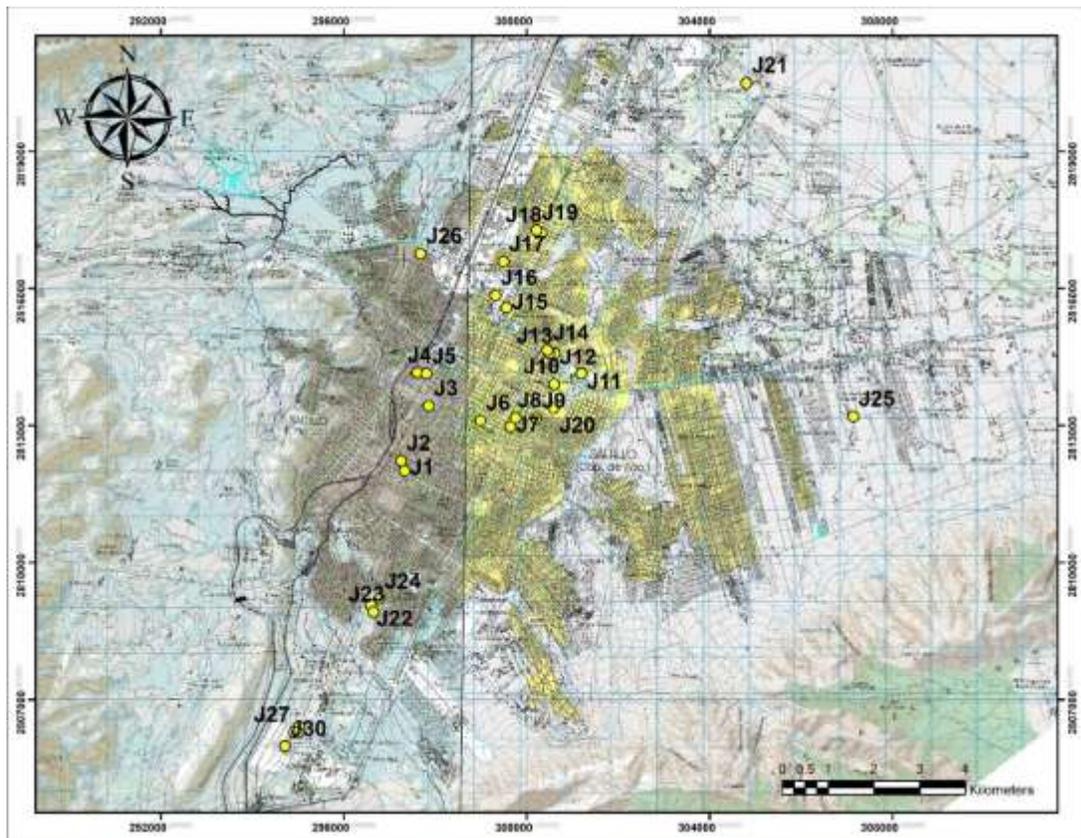


Figura 31. Conjunto de pozos seleccionados
Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Pozos seleccionados y levantamiento de la ubicación con GPS

Punto	Coordenadas UTM		Altimetría msnm
	m E	m N	
J1	297328.49	2812002.54	1642
J2	297253.79	2812224.37	1625
J3	297851.76	2813423.12	1591
J4	297612.35	2814152.96	1585
J5	297807.44	2814131.56	1582
J6	298988.84	2813107.3	1599
J7	299644.67	2812973.45	1596
J8	299756.65	2813163.36	1593
J9	300213.54	2813150.77	1594
J10	300599.42	2813902.69	1577
J11	301196.93	2814131.9	1561
J12	300609.3	2814577.12	1555
J13	300499.11	2814576.03	1557
J14	300452.91	2814643.15	1558
J15	299555.95	2815580	1544
J16	299318.18	2815846.32	1545
J17	299495.13	2816583.37	1542
J18	300320.66	2817217.87	1524
J19	300217.59	2817269.91	1527
J20	2813382	300589	1590
J21	2820490	304804	1469
J22	2809072	296594	1715
J23	2808916	296647	1716
J24	2809199	296775	1716
J25	2827241	307189	1413
J26	2816757	297678	1548
J27	2806281.37	294914.72	1733
J28	2806402.75	295028.43	1731
J29	2806280.09	294998.6	1735
J30	2805976.63	294714.3	1740

Aforos de pozos seleccionados

Los datos medidos en los aforos y la medición del nivel estático y dinámico de cada pozo corresponden al año 2018, los otros datos fueron obtenidos a partir de las mediciones de los años 2014 y 2016 respectivamente con las mismas variables de estudio.

Tabla 6. Aforos obtenidos durante las mediciones y los testigos correspondientes

Punto	Gasto (lps)		
	2014	2016	2018
J1	1.5	1.5	1.5
J2	0.67	0.67	0.67
J3	4	4	4
J4	3	3	3
J5	4.5	4	4
J6	1	1	1
J7	1	1	1
J8	0.67	0.67	0.67
J9	4.3	4.3	4.3
J10	2	2	2
J11	1.67	1.67	1.67
J12	0.5	0.67	0.5
J13	0.5	0.5	0.5
J14	1	1	1
J15	2	2	2
J16	4	4	4
J17	4	4	4
J18	2	3	2
J19	1	1	1
J20	1.2	1.7	1.4
J21	2.5	2.4	2.9
J22	4	4.5	4.8
J23	3.3	3.2	2.98
J24	7	7.65	7.4
J25	3.93	3.5	3.7
J26	1.3	1.31	1.28
J27	11	10.5	9.8
J28	6.37	6.5	5.9
J29	7.5	7.6	6.9
J30	8	7.8	7.6

Nivele estático y dinámico de cada pozo con respecto al tiempo

Tabla 7. Nivel estático y dinámico de cada pozo en los respectivos años de estudio

POZO	2014		2016		2018	
	NE	ND	NE	ND	NE	ND
	m	m	m	m	m	m
J1	0	0	0	0	0	0
J2	6.4	9.15	5.8	9.15	4.67	9.15
J3	12.4	28.4	14.12	32.15	13.44	33.23
J4	15	22	15	22	15	22
J5	13	27	14	13	13	22
J6	14	17.6	17	18.15	14	17
J7	8.15	12.4	9.62	13.6	9.3	15.4
J8	9.15	15.4	8.75	16	10.12	12.4
J9	32	42.15	35	37	35	32
J10	8.7	15.4	9.35	12.4	9.6	10.32
J11	25	28	23	25	23	22
J12	8.15	12	8.76	11.4	9.12	10.15
J13	9.64	11.4	10.12	11.6	10.12	10.14
J14	4.15	4.87	4.12	5.14	4.67	5.03
J15	5	6.15	5.4	8.3	4.72	4.6
J16	8.6	9.32	8.6	10.15	8.6	10.12
J17	18.6	21.3	19.15	23.4	19.12	19.32
J18	15.4	21.42	16.15	22.5	15.23	17.5
J19	9.15	12.6	9.3	15.4	9.32	16.12
J20	6.16	8.51	6.53	9	7.23	9.2
J21	54.53	89	52.3	89.6	58.9	85.9
J22	27.65	90	28.3	90	28.4	90
J23	37.05	80	37.6	80	36.5	80
J24	36	87.05	34.5	87.05	36.5	8.54
J25	18.25	94.7	18.2	94.7	18.9	94.7
J26	55.19	96.37	54.5	96.37	55	96.37
J27	35.6	50.91	34.9	52	34.5	51.2
J28	30.15	120	30.5	121.2	31	121.3
J29	59.41	67.1	58.2	60.2	58	60.3
J30	59.7	62	58.4	62	58.9	61.5

Curvas de nivel estático y dinámico correspondientes de cada año

Las curvas se obtuvieron a partir de los datos presentados en la tabla 7 del nivel estático y dinámico de cada pozo, y en el programa ArcGIS 10.1 se realizó las interpolaciones correspondientes de los años 2014, 2016 y 2018. La creación de curvas se realizó a una separación de 15 metros, lo que describe perfectamente el comportamiento del acuífero en los años de estudio. A continuación, se presentan los mapas obtenidos por año del nivel tanto estático como dinámico de cada pozo.

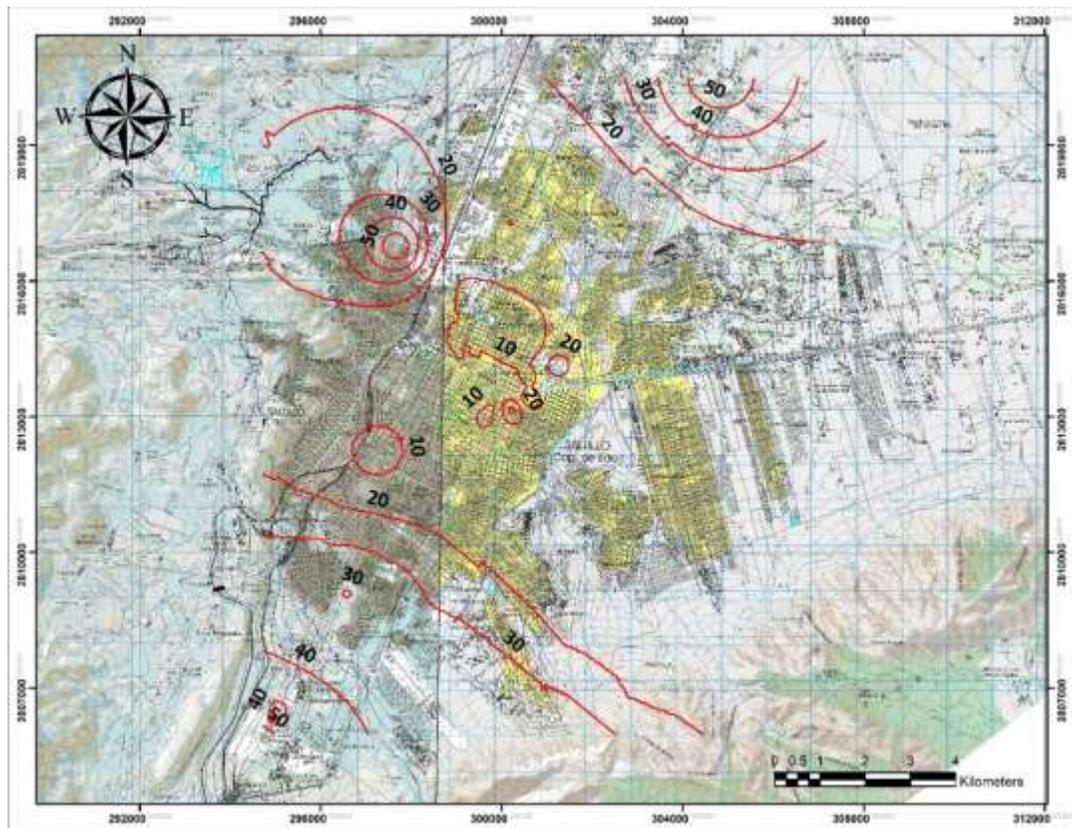


Figura 32. Nivel estático 2014
Fuente: elaboración propia

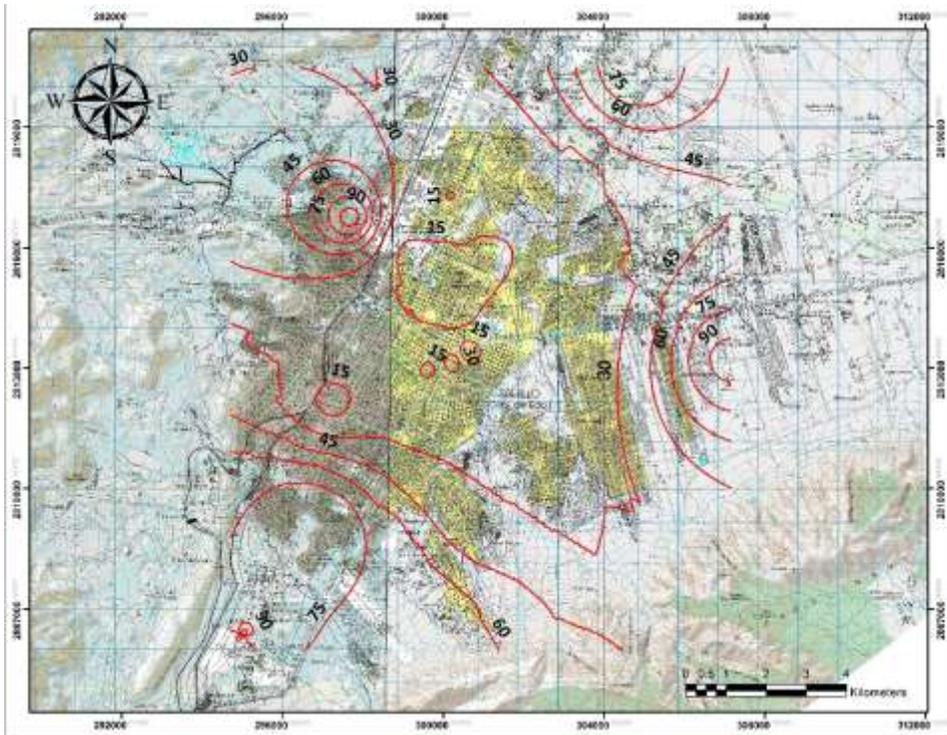


Figura 33. Nivel dinámico 2014

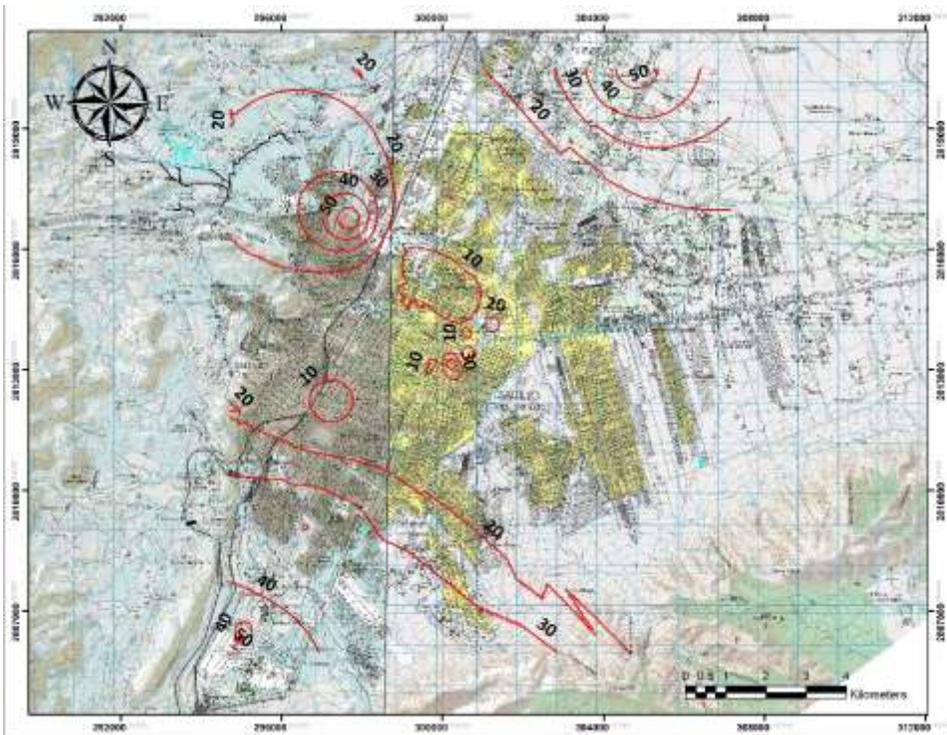


Figura 34. Nivel estático 2016

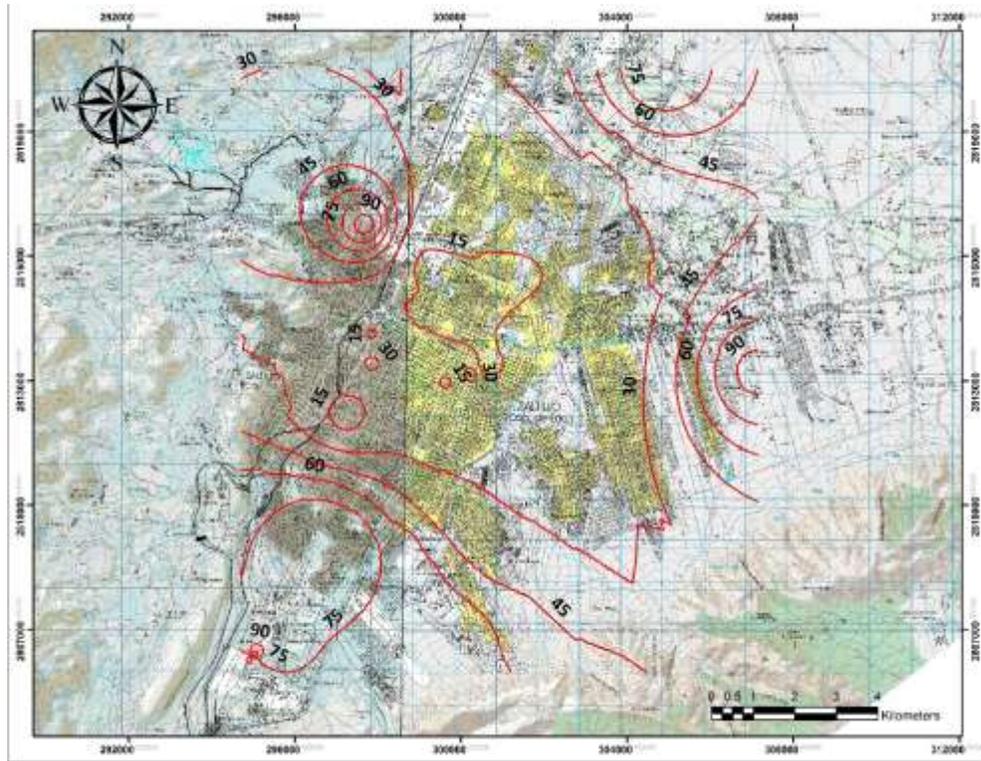


Figura 35. Nivel dinámico 2016

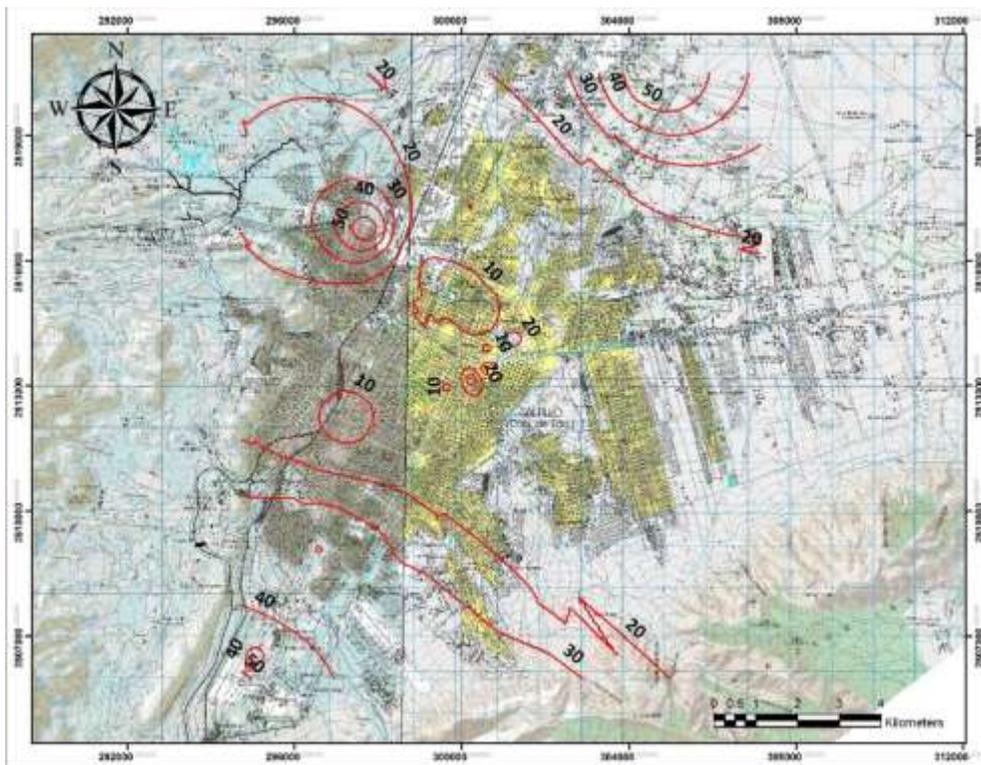


Figura 36. Nivel estático 2018

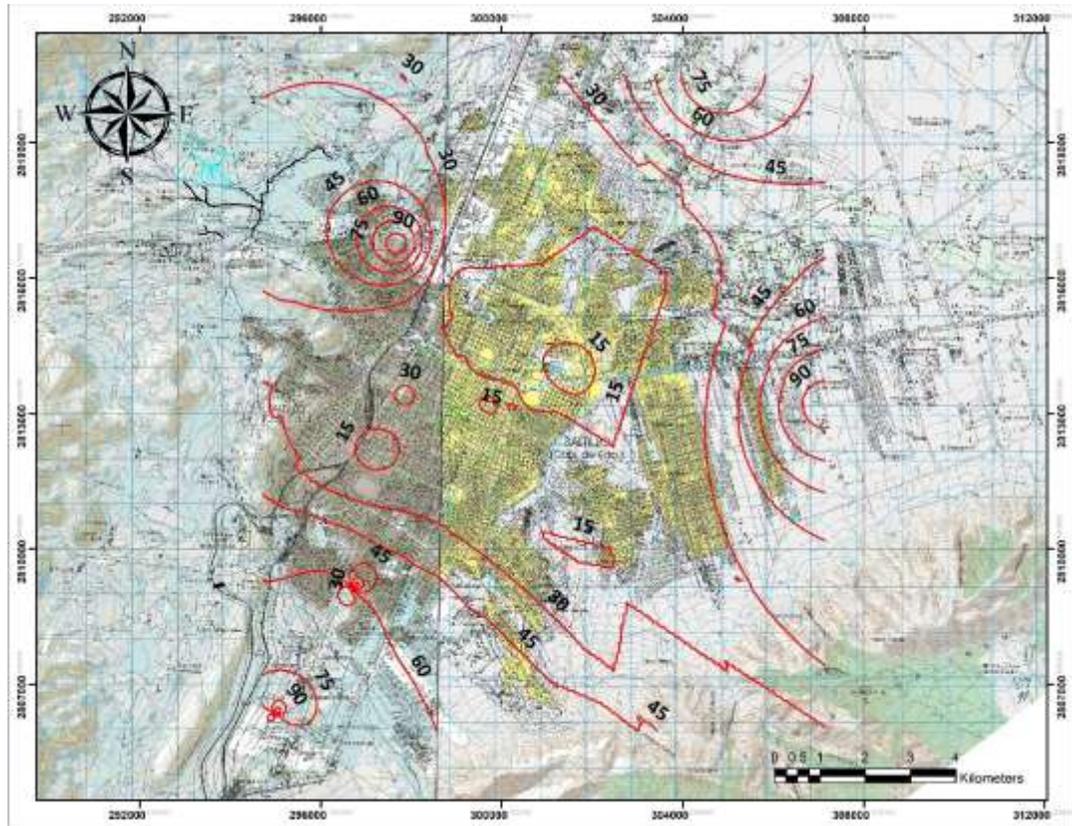


Figura 37. Nivel dinámico 2018

Línea piezométrica 2014-2018

La línea piezométrica se obtuvo a partir de los datos presentados en la tabla 7, la profundidad a la que se encuentra el agua en el pozo se le resta a la altimetría tomada en campo del mismo. Con esto se obtuvo lo que en geohidrología se llama altura piezométrica que es, para en el caso de acuíferos libres la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar, y la altura que alcanzaría el agua sobre un punto del acuífero en el cual está se encuentra o un pozo tabla 8. Después de realizar este procedimiento se obtuvo en el programa ArcGIS 10.1 los isoniveles para el caso del nivel estático y dinámico y se ilustraron en una serie de mapas y una construcción de 3D en el programa Surfer lo que nos ayuda a interpretar el movimiento del agua que ha tenido en el periodo de estudio.

Los datos obtenidos se presentan a continuación en la tabla 8

Tabla 8. Nivel estático y dinámico de cada pozo conforme a la altura sobre el nivel del mar de los pozos

Pozo	Altimetría	2014		2016		2018	
		NE	ND	NE	ND	NE	ND
		msnm	msnm	msnm	msnm	msnm	msnm
J1	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642
J2	1625	1618.6	1615.85	1619.2	1615.85	1620.33	1615.85
J3	1591	1578.6	1562.6	1576.87	1558.85	1577.56	1557.77
J4	1585	1570	1563	1570	1563	1570	1563
J5	1582	1569	1555	1568	1569	1569	1560
J6	1599	1585	1581.4	1582	1580.85	1585	1582
J7	1596	1587.85	1583.6	1586.38	1582.4	1586.7	1580.6
J8	1593	1583.85	1577.6	1584.25	1577	1582.88	1580.6
J9	1594	1562	1551.85	1559	1557	1559	1562
J10	1577	1568.3	1561.6	1567.65	1564.6	1567.4	1566.68
J11	1561	1536	1533	1538	1536	1538	1539
J12	1555	1546.85	1543	1546.24	1543.6	1545.88	1544.85
J13	1557	1547.36	1545.6	1546.88	1545.4	1546.88	1546.86
J14	1558	1553.85	1553.13	1553.88	1552.86	1553.33	1552.97
J15	1544	1539	1537.85	1538.6	1535.7	1539.28	1539.4
J16	1545	1536.4	1535.68	1536.4	1534.85	1536.4	1534.88
J17	1542	1523.4	1520.7	1522.85	1518.6	1522.88	1522.68
J18	1524	1508.6	1502.58	1507.85	1501.5	1508.77	1506.5
J19	1527	1517.85	1514.4	1517.7	1511.6	1517.68	1510.88
J20	1590	1583.84	1581.49	1583.47	1581	1582.77	1580.8
J21	1469	1414.47	1380	1416.7	1379.4	1410.1	1383.1
J22	1715	1687.35	1625	1686.7	1625	1686.6	1625
J23	1716	1678.95	1636	1678.4	1636	1679.5	1636
J24	1716	1680	1628.95	1681.5	1628.95	1679.5	1707.46
J25	1577.54	1559.29	1539.79	1559.6	1539.79	1560	1539.79
J26	1548	1492.81	1451.63	1493.5	1451.63	1493	1451.63
J27	1733	1697.4	1682.09	1698.1	1681	1698.5	1681.8
J28	1731	1700.85	1611	1700.5	1609.8	1700	1609.7
J29	1735	1675.59	1667.9	1676.8	1674.8	1677	1674.7
J30	1740	1680.3	1678	1681.6	1678	1681.1	1678.5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

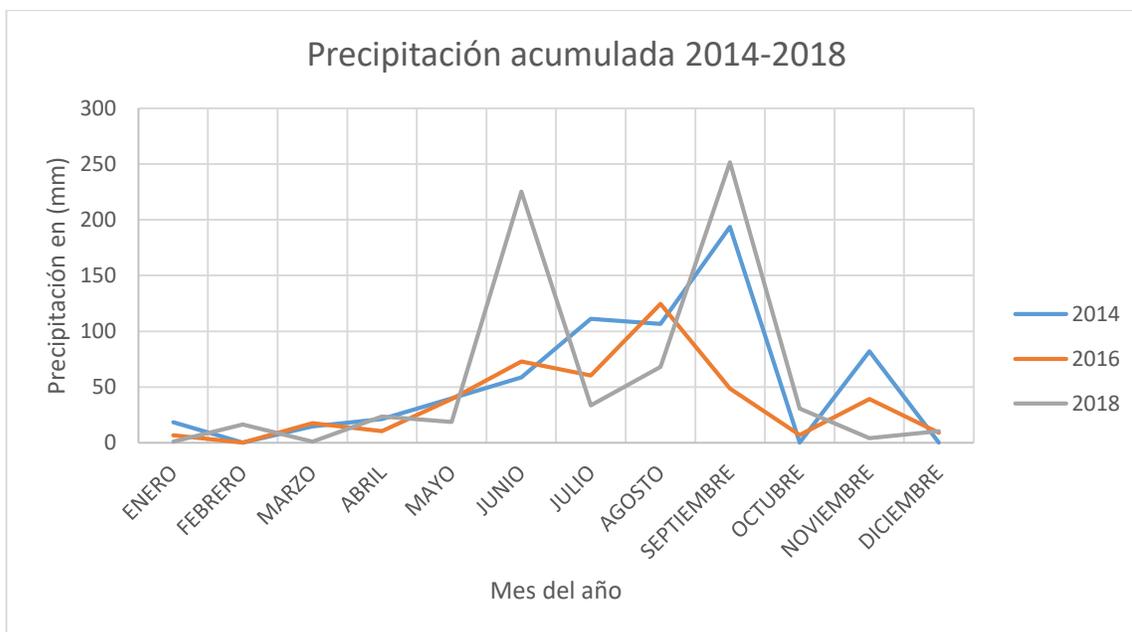
La precipitación en los últimos años

La precipitación es un factor importante, debido a que las recargas de agua dependen significativamente de ellas. Por lo tanto, podemos decir que la recarga de un acuífero depende significativamente de la estructura del suelo, el tipo de acuífero y las precipitaciones que son las más importantes, a lo que le siguen otros factores como la población, tiempo de bombeo de los pozos presentes y los pozos recientemente creados sin registro lo que ocasiona un abatimiento más rápido del mismo acuífero.

Como hemos visto en años anteriores el clima de Saltillo ha cambiado significativamente en las sequías se han prolongado más, por lo que las precipitaciones son menores llegando incluso a dejar sin agua a algunas partes de la ciudad.

Pero si analizamos esto en años anteriores al 2014 hubo lluvias que sobrepasaron las estadísticas de precipitaciones establecidas por lo que la recarga de agua, se ha mantenido constante debido a estas precipitaciones, sin embargo, la tendencia sigue presentándose en algunos meses del año para esta región previo al 2014 como lo podemos ver en la gráfica 3.

Como vemos en la gráfica 3 los meses con mayor precipitación son los de junio y septiembre llegando a una acumulación total de casi 250 mm de lluvia precipitada en el año 2018 pero con una diferencia a los años anteriores como lo son el año 2014 y 2016.



Grafica 3. Precipitación acumulada anual de cada año en el intervalo de estudio elaboración a partir de datos de la estación meteorológica: **763900 (MMIO) Saltillo Coahuila.**⁶

Tabla 9. Precipitación acumulada de cada año en el periodo de estudio 2014-2018⁷

Precipitación acumulada (mm)			
	2014	2016	2018
ENERO	18.54	6.6	1.01
FEBRERO	0	0	16.5
MARZO	14.73	17.53	1.01
ABRIL	21.34	10.41	23.62
MAYO	39.88	39.11	18.8
JUNIO	58.67	72.89	225.3
JULIO	111.25	60.44	33.59
AGOSTO	106.67	124.7	68.07
SEPTIEMBRE	193.54	48.76	251.71
OCTUBRE	0.25	6.85	30.73
NOVIEMBRE	82.04	39.37	4.06
DICIEMBRE	0	8.9	10.41

⁶ Datos reportados por la estación meteorológica: 763900 (MMIO). Saltillo, Coah. Latitud: 25.36 | Longitud: -100.98 | Altitud: 1790.

⁷ Los datos obtenidos en esta tabla están disponibles en la página web:

<https://www.tutiempo.net/clima/2007/ws-763900.html>.

En la precipitación total un valor 0 (cero) puede indicar que no se ha realizado esa medición y/o la estación meteorológica no la difundió.

La precipitación es acumulada y no una media mensual.

El aumento de la población

En las últimas cuatro décadas, la región constituida por las Ciudades de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga, en Coahuila, ha tenido un crecimiento acelerado, debido principalmente al desarrollo industrial, reflejado en el asentamiento de un gran número de empresas. Como consecuencia, la población se ha cuadruplicado, observándose un aumento en la demanda de servicios y notables efectos negativos en los recursos naturales. El caso de la disponibilidad de agua es especialmente importante, debido a que la región está localizada en una zona semidesértica con baja precipitación pluvial (300-500 mm/año) (Tablas 10 y 11). Según la Comisión Nacional del Agua (Conagua), todos los acuíferos regionales en los cuales se han realizado estudios de disponibilidad, se encuentran sobre-explotados.

Esta problemática, que debe atenderse de inmediato para evitar consecuencias serias en el suministro público, agrícola e industrial, las cuales comprende seis aspectos:

- Disminución de los recursos hídricos de buena calidad disponibles en la región. En muchos casos, el agua suministrada actualmente por los organismos operadores sobrepasa los límites máximos permitidos para agua potable. Altas pérdidas de agua por fugas en las redes municipales y programas deficientes de conservación y ahorro de agua de uso urbano.
- Acciones limitadas y falta de planes de largo alcance para aumentar la disponibilidad de agua.
- Falta de optimización de uso del agua en los sectores agrícola e industrial.
- Falta de planes para promover el reúso total de las aguas residuales municipales tratadas.
- Información insuficiente sobre volúmenes y calidad del agua de abasto y residual.

Tabla 10. Evolución de las poblaciones de los municipios de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga en el periodo 1900-2006 ⁸

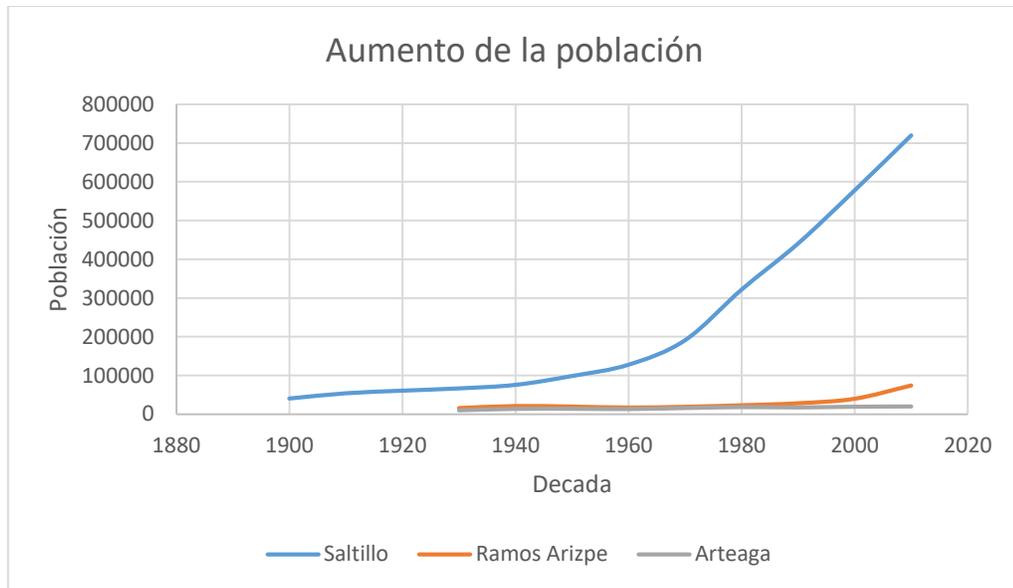
Año	Saltillo	Ramos Arizpe	Arteaga	Total
1900	40442			40442
1910	53980			53980
1920	60705			60705
1930	66609	15941	9836	92386
1940	75721	21161	13621	110503
1950	98603	19727	13845	132175
1960	127772	17212	13205	158189
1970	190994	19266	15763	226023
1980	321758	23092	18345	363195
1990	440920	28246	17414	486580
2000	578046	39853	19374	637273
2010 ⁹	720000	74000	20000	814000

Tabla 11. Crecimiento de la población de las tres ciudades en cada década

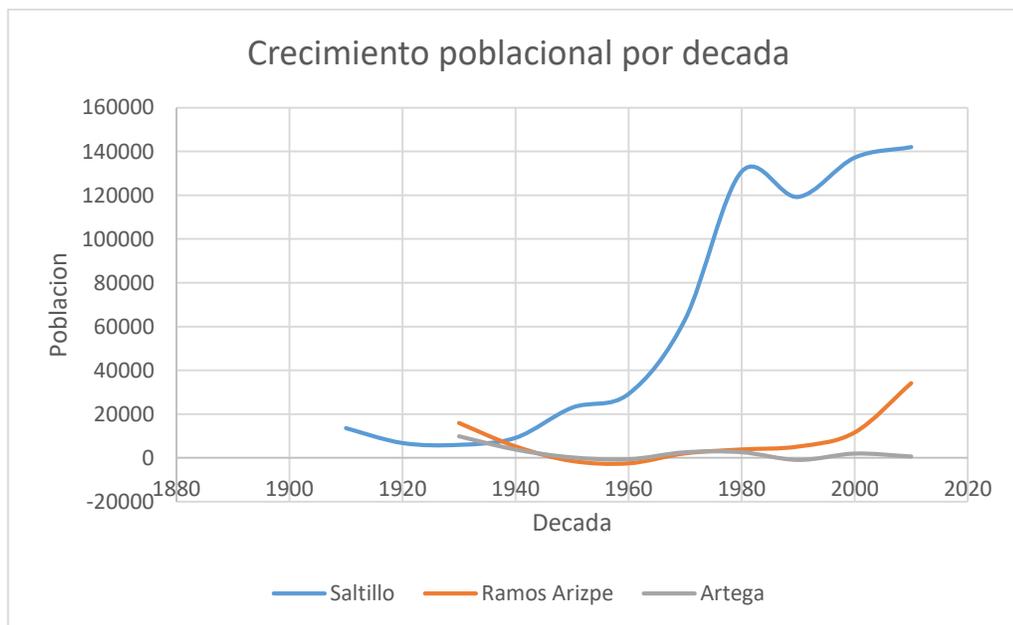
Año	Saltillo	R. Arizpe	Arteaga
1900			
1910	13538		
1920	6725		
1930	5904	15941	9836
1940	9112	5220	3785
1950	22882	-1434	224
1960	29169	-2515	-640
1970	63222	2054	2558
1980	130764	3826	2582
1990	119162	5154	-931
2000	137126	11607	1960
2010	141954	34147	626

⁸ Datos de los censos de Población y Vivienda de México - INEGI, con excepción de los datos de 2005 y 2010.

⁹ El dato del 2010 fue calculado en base a proyecciones de años anteriores.



Grafica 4. Aumento de la población por década en el área de Saltillo y Ramos Arizpe



Grafica 5. Crecimiento poblacional por década

Comparación de curvas e isoniveles por periodo de tiempo

NE 2014 - 2016

Tanto en si la población y las últimas precipitaciones afectaran el comportamiento del acuífero libre en la ciudad de saltillo, tengamos en cuenta que según las curvas de nivel estático obtenidas del periodo de 2014 a 2016 no han variado mucho, esto se puede observar en la figura 38, donde las isoyetas correspondientes al año 2016 (color amarillo) se han desplazado solo por una mínima diferencia de las del año de testigo el año 2014 (color rojo).

Este pequeño movimiento se observa en la figura 38, donde el movimiento de las curvas correspondiente al año 2016 se desplazan hacia la cota 1600 del año 2014, por lo que deduzco que este pequeño movimiento afecta el nivel estático en esa zona por una posible sobreexplotación de los pozos más cercanos a esa zona.

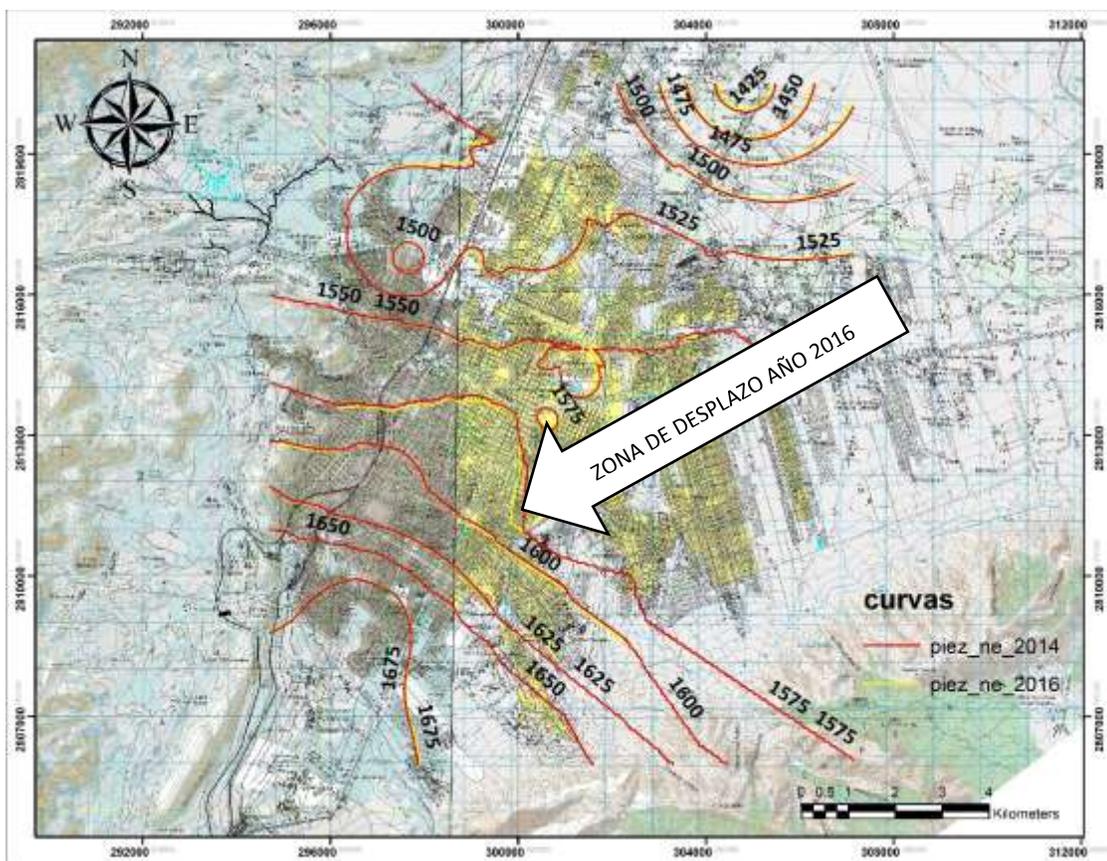


Figura 38. Nivel estático 2014-2016

Fuente: elaboración propia

NE 2014 – 2018

Si comparamos las curvas correspondientes al año 2014 y las del 2018 la tendencia es la misma, debido a que el nivel estático de cada pozo para el año 2018, no han cambiado. Por otra parte, las zonas de desplazamiento siguen en el mismo punto, por lo que no hay desplazamiento significativo en las curvas del año 2018, provocado también por una sobreexplotación.

La recarga del acuífero también depende de las distintas formaciones geológicas presentes en el área de estudio, lo que ayuda a que estas recargas sean constantes por lo que este desplazamiento se deba a una recarga lenta, por parte de una formación presente que no deja que el agua fluye verticalmente.

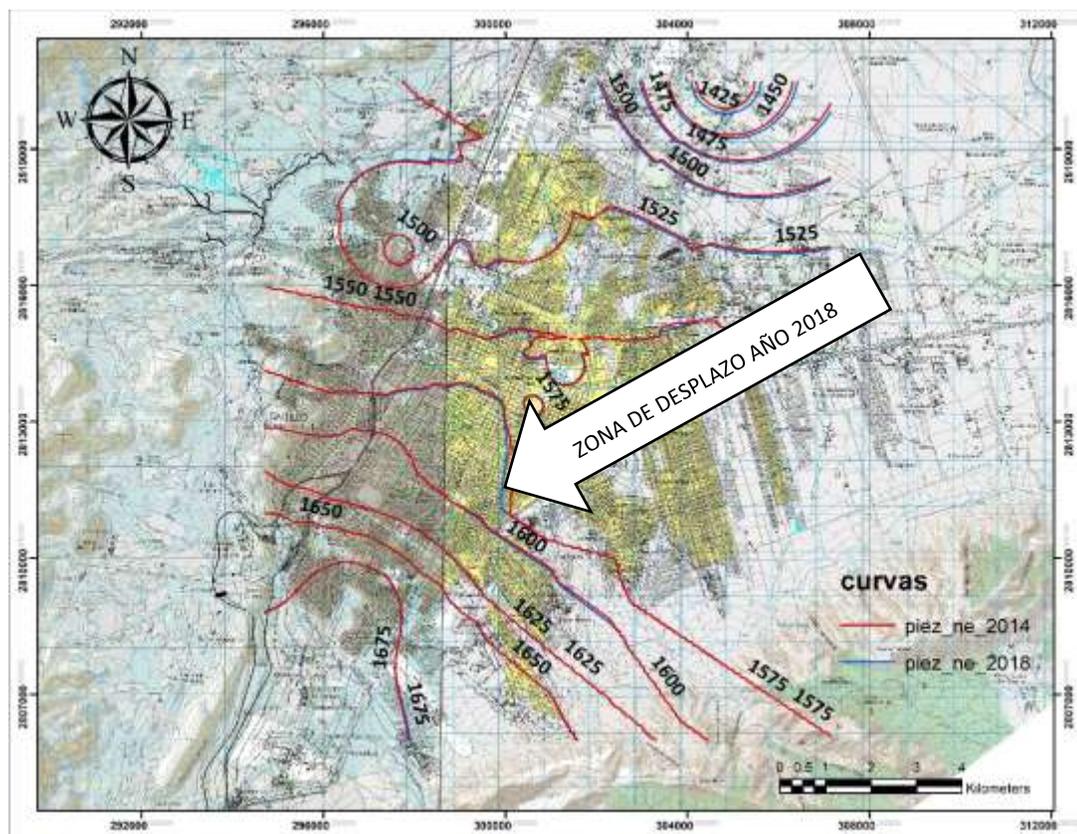


Figura 39. Nivel estático 2014-2018

ND 2014 – 2016

Los resultados obtenidos de las curvas de nivel dinámico en el periodo de 2014 – 2016 presentan una variación no tan significativa. Esta pequeña variación demuestra que el acuífero no ha sufrido un cambio, tan importante en cuestión a bombeo y sobreexplotación.

Ahora para este año la población ha tenido un incremento mayor al año 2014, si consideramos esta variable como un factor importante, para una mayor demanda de agua y lo que conlleva a más horas de bombeo, deduzco que no ha tenido una mayor influencia sobre el comportamiento del acuífero, esto se refleja en la comparación de las curvas la cual muestran que para el periodo del año 2014 a 2016 la variación es muy pequeña.

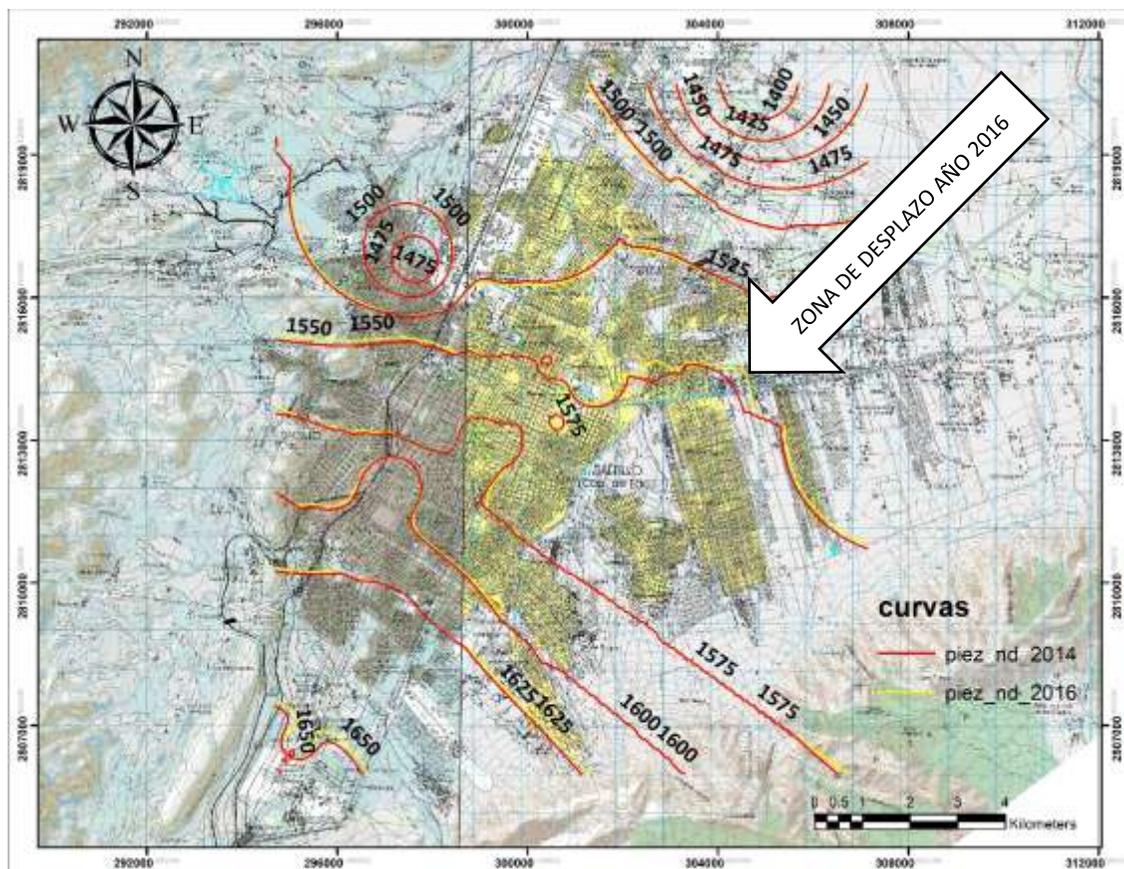


Figura 40. Nivel dinámico 2014-2016

ND 2014 – 2018

En los resultados obtenidos de las curvas de isoniveles del año 2014 – 2018 podemos observar un cambio significativo en el desplazamiento de las cotas, concluimos que esto se debe a que el área de estudio fue posiblemente el año con más horas de bombeo en comparación con los años anteriores, pero cabe mencionar, que aunque el nivel dinámico ha sido diferente a los demás años, el comportamiento del nivel estático en año 2018 no ha cambiado, este desplazamiento se debe a diferentes variables una de ellas ya se mencionó el bombeo excesivo, pero también al mal uso del agua, la condición de los pozos, algunos de estos datan de más de 60 años de antigüedad y algunos pozos nuevos que se han realizado bajo el clandestinaje, por lo que no se sabe con certeza cuánta agua se está extrayendo.

Las zonas de desplazamiento se muestran en la figura 41 indicadas con flechas.

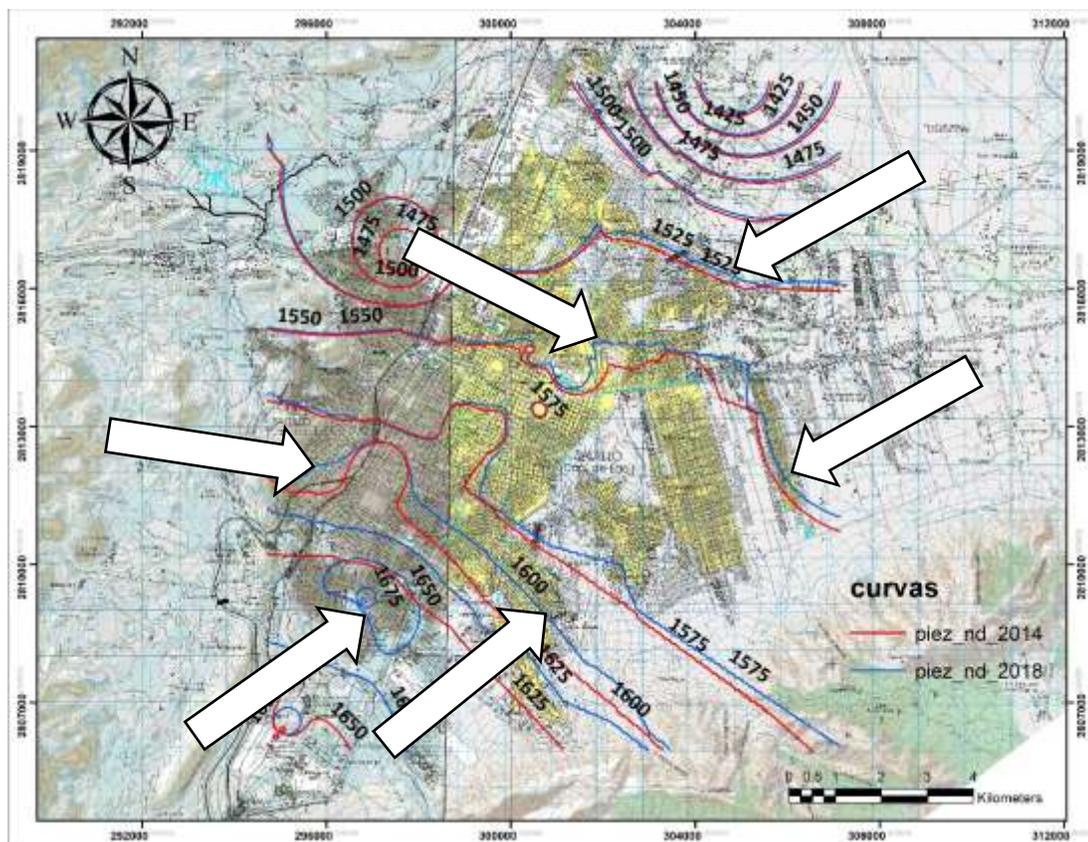


Figura 41. Nivel dinámico 2014-2018

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la comparación de las isoniveles, el nivel estático no ha sufrido, un cambio significativo en los últimos 6 años, a pesar de haber factores como el crecimiento de la población, las precipitaciones presentes y un cambio en la demanda del agua, al realizarse un bombeo excesivo y a la realización de nuevos pozos.

En la cuestión del nivel dinámico se muestra, que ha sufrido una variación significativa en el año 2018 esto se debe, a la realización de una mayor extracción del agua en los pozos en comparación al año 2016, donde la variación en los isoniveles no es significativa, no obstante esto no ha afecta en lo absoluto el nivel de recuperación de los pozos debido a que como menciono antes el nivel estático no ha cedido al abatimiento. Por otra parte, esta desviación no solo se le puede atribuir al crecimiento urbano, las escasas precipitaciones y del bombeo excesivo, también depende también de las condiciones de los pozos, algunos presentan y azolves en el interior del ADEME, lo que hace que deje de entrar agua y por consiguiente decir que se ha abatido lo que ocasiona que los propietarios hagan otros pozos cuando la solución es desazolvarlos.

Deduzco, de acuerdo a los resultados y a la discusión de estos mismos, que el acuífero superficial y libre no se encuentra en una situación de sobreexplotación debido a que presenta una similitud en la variable de nivel estático y dinámico contra el testigo y aunque hay variaciones en el nivel dinámico no implica que se ha abatido el acuífero libre, por lo que también tiene capacidad para seguir proporcionando dicho recurso del agua al área de Saltillo en los siguientes años hasta que haya un descenso del nivel estático.

Como se puede observar en la malla de comportamiento grafico en el paquete Surfer la variación del nivel estático y dinámico no ha tenido un cambio, tan significativo en los últimos años con esto se concluye la hipótesis propuesta se acepta, debido a que se presentaron los estudios correspondientes que demuestran su validez (Figura 42, 43, 44, 45).

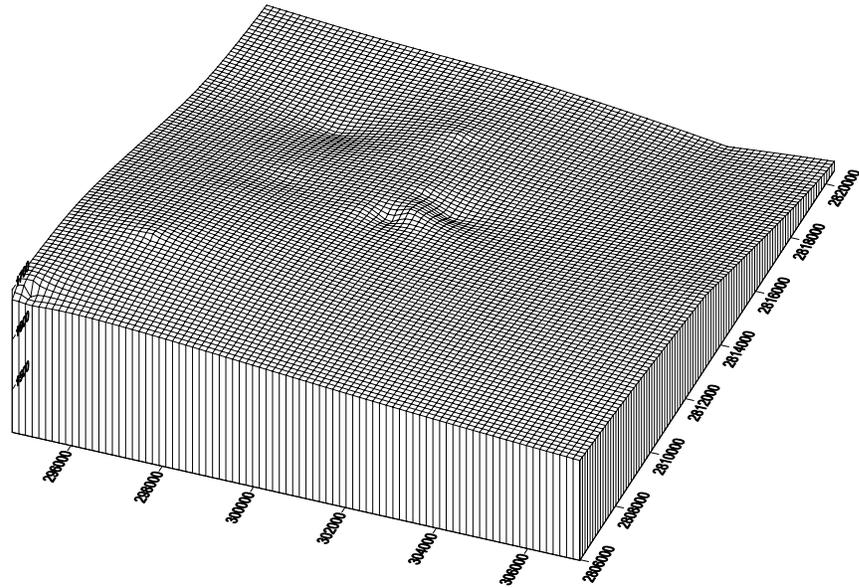


Figura 42. Comportamiento del nivel estático 2014
Fuente: Elaboración propia

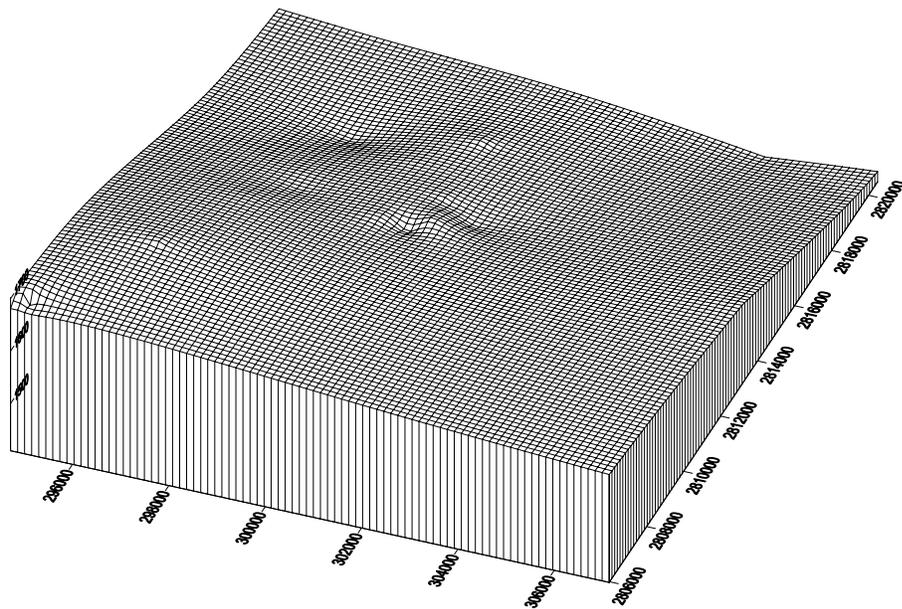


Figura 43. Comportamiento del nivel estático 2018

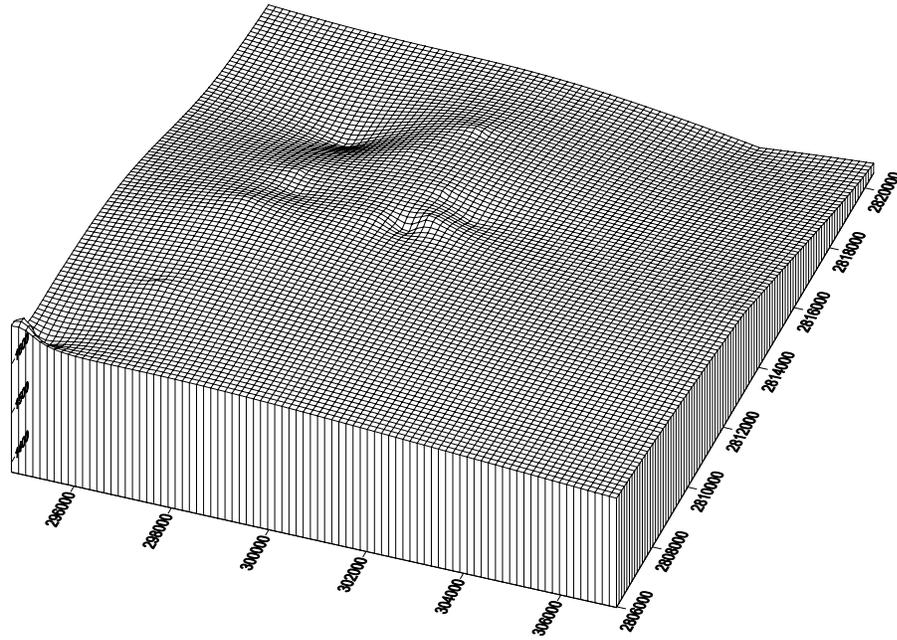


Figura 44. Comportamiento del nivel dinámico 2014

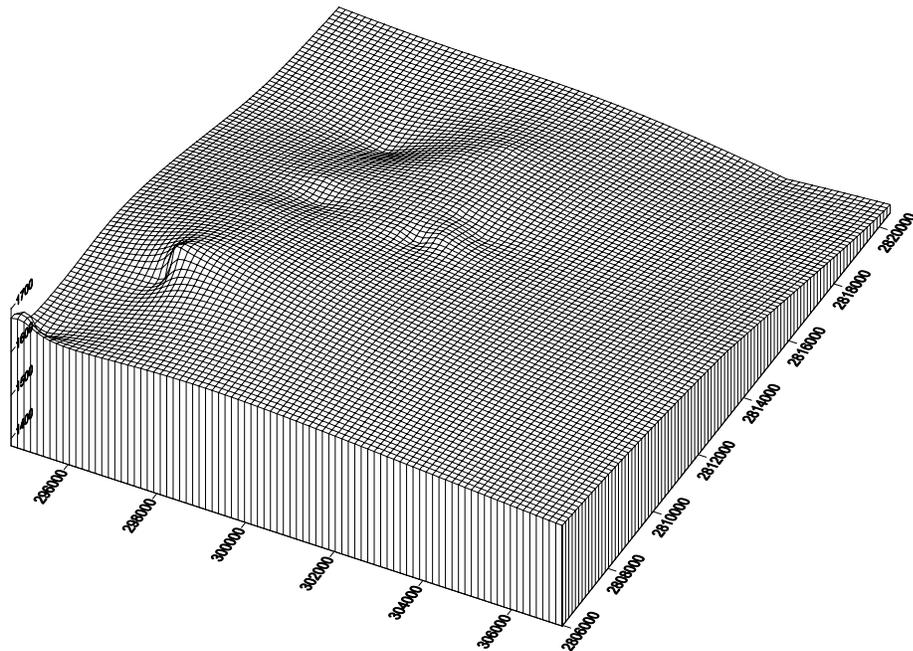


Figura 45. Comportamiento del nivel dinámico 2018

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agua, C. N. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Coyoacán: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Archivo Municipal de Saltillo. Historia de la disponibilidad de agua en Saltillo

Becerra Pérez, M., Sáinz Santamaría, J., & Muñoz Piña, C. (2006). Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. Gestión y política pública, 15(1), 111-143, p112.

Bosch, A. P. (2001). Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. Una problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas. Instituto de Estudios Almerienses. (pp. 115-132)

Chereque, M. OW, V., (1989). Hidrología para estudiantes de ingeniería civil Pontificia Universidad Católica del Perú, obra auspiciada por CONCYTEC. Lima, Perú, p 223.

Custodio G., E., (1998). Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero, 109 (4): pp329- 346.

Diario Oficial De La Federación, siguientes ediciones:

- jueves 7 de abril de 1979.
- martes 11 de octubre de 2011

Eliot, J. (2015). Estudio hidrogeológico del acuífero saltillo-ramos, estado de Coahuila (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, D. F, México., pp50-220.

Freeze, R.A. y J.A. Cherry (1979). Groundwater. Prentice Hall. 604 pp. 7

Hernández, J. A., (2017). Diseño y construcción de un pozo somero con fines de reposición y recuperación de agua potable (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila., pp24-28.

Herrera J. Castillo J. (2012). utilización de técnicas de sondeo en captaciones de agua (Memoria técnica). Universidad Politécnica, Madrid, España., pp 35-40.

Hugo, P., (2010). Resultados del balance hidrogeológico, Acuífero de Cuernavaca, Cuenca de agua dulce. CONAGUA, México DF, p3.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Carta Topográfica G14C33 Saltillo, G14C34 Arteaga, esc. 1:50000 (INEGI)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censo poblacional 2010

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México) INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de Coahuila de Zaragoza 2017 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI, c2017. 547 p. p29

Mendoza, M. A. (2005). Determinación de los coeficientes de permeabilidad para un flujo de pozo en un simulador hidrológico (tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, D. F., México., p164.

Melville, R. (1997). El concepto de cuencas hidrográficas y la planificación del desarrollo regional. Nueve estudios sobre el espacio: representación y formas de apropiación, 77-90. p 78.

Morales, J. I., (2012). Evaluación del descenso del nivel freático en la parte norte del acuífero metropolitano en el valle de Guatemala (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, p 9.

Ordoñez, J. J. (2011). ¿qué es una cuenca hidrográfica? (Cartilla Técnica). Lima, Perú: IBEGRAF., p8.

Ponce, V. M. (2006). Groundwater utilization and sustainability. Online article.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2010. Carta geológica-minera. Ramos Arizpe G14C24, esc. 1:50000, SGM.

Sánchez, J. (2019). Conceptos Fundamentales de Hidrogeología (Apuntes de hidrología subterránea). Universidad de Salamanca, Salamanca, España., pp 1-7.

Samper, F.J., (1998). Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. Boletín Geológico y Minero, 109 (4): pp347- 370.

Simmers, I., (1997). Groundwater recharge principles, problems and developments. In: Recharge of phreatic aquifers in (Semi) arid areas. IAH, A.A. Balkema / Rotterdam/ Brookfield, (19): pp1-18.

Trevizan Rispoli, J. F. (2011). Mirando sobre y bajo el agua. Idesia (Arica), 29(2), 169-174.p 174.

Villarreal, F. A., (2013). Evaluación del potencial hídrico y su impacto en el desarrollo de Saltillo, Coahuila (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León., pp50-136.

Werner, J. (1996). Introducción a la hidrogeología. Linares, Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Ley Federal de Aguas Nacionales. Artículo 29 sobre los derechos de explotación de las aguas subterráneas, CONAGUA 2010.

Observaciones generales sobre la estructura de la Sierra Madre Oriental, por M. Taroy, et. al, 1975. Revista del Instituto de Geología, UNAM.

Bibliografía complementaria no citada

Acciones locales para un reto global. Foro Mundial del Agua México 2006. CONAGUA Informe Final.

Agua, Medio Ambiente y Sociedad, hacia la gestión Integral de los Recursos Hídricos en México. Julia Carabias y Rosalva Landa, UNAM, el Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte.

Aguilar, Luis F. (2006). Gobernanza y Gestión Pública, México, FCE.

American Water Works Association. Journal August 2007, volumen 99 número 8.

Anderson, M. and W., Woessner. (1992). Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press, Inc. San Diego. U.S.A. 381 p.

Arrojo Agudo, Pedro (2006). "Desafíos hacia un desarrollo sustentable, agua y construcción de una institucionalidad democrática" Fundación Heinrich Böll, México, pp. 172-190.

Andreu, J. and A. Sahuquillo. (1987). Efficient aquifer simulation in complex systems. Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE. 113 (1): 110 - 129.

Bear, J. and A. Verruijt. (1987). Modeling groundwater flow and pollution. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht. The Netherlands. 414 p.

Boulton, N. S. (1963). Analysis of data from nonequilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. Proc. Institution of Civil Engineers, vol. 26, London.

Bredehoeft, J. and P. Hall. (1995). Ground-Water models. Journal Ground-Water. Ground Water Publishing Company. 3 (4): 530-531.

Chávez, A. S., Flores, N., Moyabed, E., García, J., Ríos, M., Hernandez. (1990). Construcción de un modelo digital de simulación de flujo del acuífero de Villa de Reyes, S. L. P. 11º Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo II. Tema 6. El agua subterránea y manejo de cuencas. p. 79-85.