



Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y
ESTRATEGIAS DE GESTIÓN HÍDRICA DEL ACUÍFERO
ADMINISTRATIVO DE SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSÍ**

TESIS

que para obtener el grado de
Maestra en Tecnología y Gestión del agua

Presenta:

NOEMÍ TERESITA LEÓN GONZÁLEZ

Asesor de Tesis:

Dr. Hermann Rocha Escalante

Co-Asesor:

Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre 2020



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UASLP



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y
ESTRATEGIAS DE GESTIÓN HÍDRICA DEL ACUÍFERO
ADMINISTRATIVO DE SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSÍ**

TESIS

que para obtener el grado de

Maestra en Tecnología y Gestión del agua

Presenta:

NOEMÍ TERESITA LEÓN GONZÁLEZ

Asesor:

Dr. Hermann Rocha Escalante

Co-Asesor:

Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia

Comité Tutorial:

Dr. Antonio Cardona Benavides

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre 2020



**FACULTAD DE
INGENIERÍA
UASLP**



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

20 de junio de 2019

**ING. NOEMÍ TERESITA LEÓN GONZÁLEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Hermann Rocha Escalante y Guillermo Javier Castro Larragoitia** *Asesor y Co-asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Modelo numérico de flujo de agua subterránea y estrategias de gestión hídrica del Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí”

Introducción.

1. Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P.
2. Balances hídricos históricos superficiales y subterráneos.
3. Implementación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas.
4. Análisis e interpretación de resultados de los escenarios futuros.
5. Propuesta de estrategias de gestión hídrica para el manejo del acuífero.

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.**



Copia. Archivo.
*etn

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

“2019, aniversario 160 de la fundación del Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí”

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecerle a Dios por permitirme terminar mis estudios de manera satisfactoria, a mi mamá por todo su amor, por ser la persona que más cree en mí, por apoyarme siempre en cada decisión, en cada paso que doy y llenarme de confianza y sobre todo estar conmigo animándome a salir siempre adelante, este logro es tuyo también.

Al Dr. Hermann Rocha Escalante, por haberme permitido trabajar nuevamente con él, por su tiempo y por confiar en mí, por su apoyo en todo momento, por aclarar mis dudas una y otra vez y guiarme en este proceso. Gracias también por toda su disposición en cada una de las salidas a campo y por enseñarme cada día un poco más del mundo de la modelación y de la geohidrología y, enseñarme también que un buen trabajo requiere de esfuerzo y dedicación, pero sobretodo gracias porque además de ayudarme con mi formación académica lo hizo con mi crecimiento personal.

Al Dr. Javier Castro Larragoitia, al Dr. Antonio Cardona Benavides y al Dr. Rodolfo Cisneros Almazán por su asesoría y respaldo durante este proceso, por su apoyo y aportaciones realizadas al estudio y por toda su disposición para que se realizara de mejor manera este trabajo.

Al Dr. Jorge Aceves por todo su apoyo y ayuda que me brindó en problemas técnicos que surgieron durante la realización de este trabajo. Gracias

Al Ing. Fernando Ruíz de CONAGUA (SLP) por brindarme su apoyo en la proporción de información oficial sobre los aspectos técnicos del acuífero de Salinas de Hidalgo.

A la Dra. María Elena García Arreola y al Laboratorio de análisis de agua y suelo de Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería por las facilidades y el apoyo con el equipo para el análisis de agua y por su disposición para que se realizara correctamente los estudios de las muestras de agua.

A Sócrates Alonso Torres por su apoyo y disposición en campo en el muestreo de agua y por enseñarme como se realiza correctamente.

A mis compañeros de laboratorio, Luis Molina, Nicole García, Gaby Narváez y Julio Espinoza por su ayuda y su apoyo en la realización de los análisis de muestreo, gracias por hacer más amenos mis días en el laboratorio.

A Sofía Cadenas, por su apoyo con el análisis de muestreo de agua y por trabajar en conjunto para poder obtener mejores resultados en los trabajos de ambas. Muchas gracias Sofi.

A Misael Gutiérrez por todo su apoyo, su disposición y su apoyo en campo y su asesoría para la elaboración de mapas. Misa mil gracias por ser tan paciente conmigo y resolver todas mis dudas por más simples que fueran siempre estabas disponible para ayudar.

A Pepe Solís, por su paciencia, su disposición y todo su apoyo con las pruebas de bombeo, por explicarme una y otra vez y resolver cada una de las dudas que surgían en la interpretación. Mil gracias Pepe.

A Rogelio Hurtado por el apoyo y por el gran aporte de información de geofísica que se realizó en este estudio, por su disposición en campo y por su trabajo en equipo para poder terminar nuestros estudios. Gracias Roger sin tu compañía y tu esfuerzo no hubiera sido lo mismo.

A Juan Arvizu, Gustavo Villegas, Ricardo Llanas, David Rojo, Edgar Cruz, Andrea Mancilla, Blanca García, Diana Ramírez, Sandra y Montse Ruiz por su apoyo y disponibilidad para salir a campo. Gracias chicos por levantarse temprano e ir siempre de tan buen humor en cada salida, sin ustedes no habría sido tan divertido.

A mi familia, mi tío Luis y mi tío Arturo por estar siempre al pendiente de mi dándome su apoyo y su cariño. A mi tía Delia y mi primo Oliver, por su apoyo incondicional, por siempre llenarme de ánimos y por creer en mí y disfrutar mis triunfos como suyos también. Los quiero mucho.

A Yuli, mi prima y hermana, gracias por todo tu apoyo, por desvelarte conmigo, por ayudarme a estudiar, por acompañarme en mis aventuras y no dejarme sola y sobre todo por disfrutar mis logros y celebrarlos siempre conmigo.

A Gemma y Marisol, amigas y colegas, por su apoyo en este proceso y por estar al pendiente de cada paso que estaba dando, por su ayuda en todo momento que las necesitaba y por ayudarme a aclarar algunas dudas en términos geológicos. Gracias.

A mis mejores amigos, Chema, Diego, Joaquín, Isaac y Sofy, por entender que a veces tenía que sacrificar momentos con ustedes por horas de estudio, por su apoyo y por estar conmigo en todo momento. Gracias.

A Fer Preciado, por todos esos cafés con los que me acompañabas, por todos los días motivarme a terminar, por hacerme reír cuando sentía que ya no podía, y escucharme, aunque fueran las mismas quejas todos los días, pero sobre todo por ser la amiga que siempre quise tener en la universidad, llegaste unos años después, pero fue en el momento exacto. Gracias Ferchis.

A Dani, mi mejor amiga, mi incondicional y mi cómplice, gracias por todo tu apoyo, por ayudarme a creer en mí, por siempre animarme cuando quería rendirme, y por entender que a veces tenía que sacrificar momentos juntas por terminar este trabajo. Gracias por estar conmigo en cada tropiezo, pero también en cada triunfo.

A Dios.

A mi mamá, por estar conmigo y ser mi apoyo en cada paso que doy, compartir mis triunfos y alegrías y nunca dejarme caer.

A mi Papá y mis abuelos (Rafael y Alejandra) que sé que desde donde estén, me acompañan en cada momento y siempre están orgullosos de mí.

Financiamiento:

Esta tesis fue realizada con el financiamiento de:

- Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), en la convocatoria de Apoyo de fomento a la generación y aplicación innovadora del conocimiento del año 2018. Proyecto ““Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica del Acuífero Administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí”. Número de Oficio de la Carta de liberación: 511-6/18-8708
- Convocatoria CONACYT del Programa Apoyos Complementarios para el Establecimiento y Consolidación de Laboratorios Nacionales (número de registro 299073): En el proyecto Consolidación de Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA)

Contenido

Introducción.....	8
Aspectos relevantes del agua subterránea en México	9
1. Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P.....	18
1.1 Localización	19
1.2 Clima	19
1.3 Hidrología Superficial.....	21
1.3.1 Hidrografía.....	21
1.4 Justificación.....	22
1.5 Objetivo general.....	22
1.5.1 Objetivos específicos.....	22
1.6 Metodología.....	23
1.7 Población y actividad económica	24
1.8 Geomorfología.....	24
1.9 Fisiografía.....	25
1.11 Estratigrafía.....	29
1.11.1 Formación Nazas (Tr z).....	29
1.11.2 Formación Zuloaga (Jz).....	31
1.11.3 Formación La Caja (Jc).....	32
1.11.4 Formación Taraises (Kit).....	33
1.11.5 Formación Cupido (Kic)	35
1.11.6 Formación La Peña (Kip).....	36
1.11.7 Formación Cuesta del Cura (Kcc).....	37
1.11.8 Formación Indidura (Ksi)	39
1.11.9 Formación Caracol (Ksc).....	41
1.11.10 Conglomerado Zaragoza.....	42
1.11.11 Riolita Panalillo (Trp)	43
1.11.13 Granito Peñón Blanco (Tgr)	44
1.11.14 Sedimentos Continentales Terciarios	45
1.11.15 Formación Las Joyas.....	46
1.11.16 Aluvión (Q).....	47
1.12 Aspectos Particulares del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.....	50
1.13 Área del suelo y vegetación	51

1.14 Calidad del agua	55
2. Balances hídricos históricos superficiales y subterráneos.....	62
2.1 Precipitación media anual.....	63
2.2 Temperatura media anual.....	66
2.3 Coeficiente de escurrimiento	66
2.4 Evapotranspiración real anual	70
2.5 Infiltración.....	73
2.6 Pozos de observación	73
2.7 Censo de aprovechamientos.....	74
2.8 Retorno agrícola	75
2.9 Elevaciones del nivel estático.....	76
2.10 Balances hídricos superficiales y subterráneos.....	79
3. Implementación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas	83
3.1 Geometría del sistema.....	86
3.2 Definición de las direcciones de flujo subterráneo.....	88
3.3 Pruebas de bombeo	97
3.3.1 Metodología de ejecución	98
3.3.2 Elección del sitio para la prueba de bombeo	98
3.3.3 Características del pozo de bombeo.....	99
3.3.4 Realización de pruebas	100
3.3.5 Duración de la prueba.....	103
3.3.6 Interpretación de los datos.....	104
3.3.7 Pruebas de bombeo realizadas en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo	105
3.3.8 Parámetros de los modelos de dos capas	111
3.4 Diseño.....	120
3.5 Discretización espacial	125
3.6 Discretización temporal	126
3.7 Conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento	128
3.8 Régimen de bombeo	130
3.9 Pozos de observación	131
3.10 Entradas de flujo subterráneo	138
3.11 Evapotranspiración.....	140
3.12 Cargas iniciales	140

3.13 Calibración	142
3.14 Calibración del modelo	142
3.14.1 Estado transitorio	142
3.13.2 Análisis de sensibilidad	149
4. Análisis e interpretación de resultados de los escenarios futuros	151
4.1 Simulación de escenarios futuros	152
4.2 Escenario 1: condiciones actuales	153
4.3 Escenario 2: incremento gradual de extracción por bombeo	153
4.4 Escenario 3: decremento de entrada de flujo de agua subterránea	154
4.5 Resultados de escenarios futuros	155
4.5.1 Escenario 1: condiciones actuales (2019)	155
4.5.2 Escenario 2: incremento gradual de extracción por bombeo	157
4.5.3 Escenario 3: decremento de entrada de flujo de agua subterránea.....	159
5. Propuesta de estrategias de gestión hídrica para el manejo del acuífero	169
5.1 Propuestas de estrategias para la generación de información de calidad	170
5.2 Estrategias para el aprovechamiento sustentable del agua con base en los resultados de los escenarios futuros	172
Conclusiones	175
Referencias	181

Introducción

Introducción

Importancia del agua subterránea a nivel mundial

El agua subterránea es un recurso natural muy valioso que es un componente esencial del Ciclo Hidrológico. La contribución de agua de los acuíferos al flujo de los ríos es responsable de que los ríos sigan teniendo caudal cuando no hay precipitaciones. (Sahuaquillo-Herraíz, 2009).

Toda el agua que se encuentra en forma natural por debajo de la superficie terrestre se llama agua subsuperficial, independientemente de que esté en la zona saturada o en la no saturada. El agua en la zona saturada, es decir, la que se encuentra debajo del nivel freático, se llama agua subterránea (Reyes-Martínez, A., et al, 2009).

De manera asombrosa y aun siendo un recurso abundantemente utilizado, el origen y los procesos de las aguas subterráneas son apenas conocidos y vulnerables a bastantes malentendidos, lo cual radica en la posición física de la misma (debajo de la superficie del terreno), por lo cual no puede ser vista (Moore, *et al*, 2005).

Se estima que la cantidad total de agua sobre la Tierra es un poco más de 1,400 millones de km^3 . De este volumen, aproximadamente $1,370 \text{ Mkm}^3$, es decir cerca del 95%, es agua de mar, el agua restante, el agua que no es de mar y que no está congelada, es agua subterránea. Es difícil hacer una estimación exacta del volumen de agua subterránea de la Tierra. (CONAGUA, 2011). Las últimas estimaciones acerca del volumen varían de 7 Mkm^3 a unos 60 Mkm^3 . No toda esta agua puede utilizarse: una parte está contenida en espacios porosos que son muy pequeños a grandes profundidades (difícil acceso) y otra parte de esta agua existe en un suelo permanentemente congelado o es salada, aunado a la irregular distribución en los continentes (Ordoñez, 2011).

Desde el punto de vista de abastecimiento, el agua subterránea puede extraerse a menudo donde y cuando se necesite, por medio de pozos que se perforan o construyen en los lugares deseados; debido a la profundidad a la que se encuentra, es menos vulnerable a la contaminación (Price, 2003).

Aspectos relevantes del agua subterránea en México

En México, se presenta un promedio anual de 780 mm de precipitación pluvial, que corresponde a un volumen de 1,532 Mm³/año. En la zona norte y en el altiplano (a los cuales les corresponde el 52 % del territorio), la media anual es inferior a los 500 mm, y en sólo una porción del sureste (7% del territorio), la precipitación alcanza valores superiores a los 2,000 mm anuales (CONAGUA, 2006).

México está dividido en 654 acuíferos administrativos, de los cuales 97 están en condiciones de sobreexplotación (la extracción calculada es mayor a la recarga estimada). Estos acuíferos suministran aproximadamente el 50% de la extracción nacional para todos los usos. Del total de acuíferos catalogados como sobreexplotados a nivel nacional, 17 de ellos presentan problemas de intrusión salina, éstos se encuentran localizados en las costas de los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz (CONAGUA, 2006).

La medición del agua subterránea, generalmente se realiza en el sitio que se proyecta su extracción, a través de estudios geológicos y geofísicos. Parte del agua que se registra en estaciones hidrométricas o pluviométricas son provenientes del agua subterránea que alimentan a las corrientes fluviales y éstas, junto con el agua que corre por la superficie y después por los cauces de las corrientes, constituyen el agua, que, por el ciclo hidrológico a través de la fase de escurrimiento, la cuenca descarga naturalmente, es decir, el agua disponible (Reyes-Martínez *et al.*, 2009).

La modelación numérica es una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad para el estudio del comportamiento del flujo de las aguas subterráneas. Una de las

principales ventajas de los modelos de simulación hidrogeológica, radica en que es posible la evaluación de múltiples escenarios de predicción, sometiendo el sistema a diferentes condiciones (recarga, infiltración, extracciones, etc.), pudiéndose optimizar el uso y manejo del recurso aprovechado en áreas de sustentabilidad (Durán, 2012).

Además de constituir una herramienta de simulación, los modelos numéricos en hidrogeología ofrecen un camino para avanzar en el entendimiento de sistemas acuíferos. Los modelos numéricos pueden tener carácter exploratorio y así, pueden acompañar la tarea de construcción de un modelo conceptual desde el momento en que se inicia la recolección de información, en el curso de su interpretación, y cada vez que se obtienen nuevos datos o se aplican nuevos análisis para la validación de un sistema hidrogeológico (Betancur *et al.*, 2009).

Los modelos numéricos son representaciones matemáticas que simplifican la complejidad de la hidrología e hidrogeología de un acuífero, a partir del uso de ecuaciones diferenciales (ecuación general de flujo, Ley de Darcy, etc.), resueltas por métodos numéricos aproximados para cada elemento del dominio. Las soluciones obtenidas corresponden a la distribución de velocidades, niveles de agua, entre otras, permitiendo determinar la magnitud y la dirección del escurrimiento de flujo subterráneo (Durán, 2012).

Con el continuo desarrollo de la sociedad y los avances en la ciencia, el hombre utiliza cada vez más los recursos hídricos, propiciando efectos negativos como el agotamiento y la contaminación; mismo que motiva el interés y preocupación de los gobiernos, instituciones sociales e individuos por la conservación y protección del agua (Batista, 2001).

Estudios previos sobre Modelación de aguas subterráneas

De la necesidad de predecir el comportamiento de los niveles del agua subterránea de un caso en particular, con base en parámetros de extracción, surge la intervención de los modelos de agua subterránea. Dichos modelos permiten estimar impactos por acciones ejercidas en los diferentes puntos del sistema. Estas representaciones simplificadas de fenómenos de suma complejidad, incorporan las influencias más importantes de acuerdo con el objetivo de estudio, a las cuales se da solución por medio de ecuaciones que describen el fenómeno en particular (Obregón *et al.*, 2006).

En general, los modelos de aguas subterráneas son de reciente concepción y hablar de su historia es apenas posible. Los primeros modelos de simulación fueron analógicos y aparecieron durante el primer cuarto del siglo XX; estaban constituidos principalmente de arena y fluido viscoso cuya finalidad era meramente de estudios de laboratorio, continuando con esa misma tendencia hacia la primera mitad de ese siglo. A partir de la década de 1950, pero especialmente en la década de los 60's, comienza un apresurado desarrollo, basado principalmente en las capas de capacidades y resistencias (con la utilización de componentes y aparatos electrónicos) y el uso de computadoras con mayor potencia y técnicas de cálculo eficaces. En la actualidad la evolución es muy rápida y se hace difícil predecir los logros futuros, pues la modelación de aguas subterráneas está situada en una fase juvenil, en donde el avance tiene mayor velocidad en las técnicas de modelación que en las técnicas hidrológicas para obtener información y concepciones sobre sistemas de acuíferos (Custodio y Llamas, 1996).

Los distintos tipos de modelos (analíticos, matemáticos y analógicos) se diferencian por la forma en que describen el problema, así como el método para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento del flujo del agua subterránea. Los modelos analíticos dan solución exacta a las ecuaciones diferenciales; sin embargo, solo ha sido aplicada para casos particulares y relativamente simples. Por su parte, los modelos matemáticos emplean métodos

numéricos para la solución de las ecuaciones diferenciales, siendo el más común el método de diferencias finitas. (Ministerio de Obras Públicas 1972).

A continuación, se presentan algunos estudios que se han realizado alrededor del mundo y de México, en los cuales se han utilizado las herramientas de modelación para proponer soluciones a distintos problemas relacionados con las aguas subterráneas.

Guvanasen y Wade (2000), desarrollaron la simulación de modelos computacionales del sistema de flujo de agua subterránea regional e intrusión de agua salina en Hernando Country, Florida, para determinar los impactos de los escenarios en el manejo del recurso. Para ello realizaron una descripción del sitio, el desarrollo del modelo y su calibración, así como la inclusión de los factores que limitan el desarrollo de los recursos de agua subterránea en el área.

Ramírez (2000) construyó y calibró un modelo numérico en la cuenca de Naivash, Kenya, para realizar los cálculos de balance hidráulico. Las dimensiones de la malla fueron establecidas con dimensiones de 1 km x 1 km, resultando 42 renglones y 39 columnas con un total de 1368 celdas. Finalmente, concluyó que existe una gran variabilidad de algunas características hidráulicas en toda la cuenca y que es necesario un mejor conocimiento de los parámetros hidrogeológicos de la misma.

La Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (2001) comenzó en el año de 1998 una serie de estudios de los acuíferos de ese Estado, cuyo objetivo fue actualizar y generar información que contribuya a una mejor planeación de la gestión del agua subterránea.

Dichos estudios contemplaron la modelación de flujo de aguas subterráneas utilizando el sistema de cómputo Visual MODFLOW. En cada uno de los proyectos realizaron actividades como son la generación de bases de datos, diseño de los modelos (mallas, condiciones iniciales y de frontera, parámetros hidráulicos) así como la respectiva calibración y predicción de escenarios (aunque los estudios no

iban más allá de una predicción a 10 años) en los que únicamente definían los niveles de abatimiento para el periodo establecido.

Los acuíferos para los cuales realizaron los trabajos antes mencionados corresponden a los siguientes: Valle de Acambaro, Valle de Apaseos, Valle de Celaya, Valle de Ciénega Prieta - Moroleón, Valle de Cuitzeo, Valle de Irapuato - Valle de Santiago - Huanimaro, Valle de Jaral de Berrios, Valle de La Cueva, Valle de Laguna Seca, Valle de León, Pénjamo - Abasolo, Río Laja - San Felipe, Valle del Río Turbio, Valle de Salvatierra y Valle de Silao - Romita.

En 2002, Kirshen analizó un acuífero libre altamente permeable ubicado en el noreste de E.U.A.; realizó un modelo numérico de agua subterránea con base en una aproximación de diferencias finitas, el cual calibró, verificó y usó para los impactos significantes y secos de escenarios de cambio climático. Mediante los resultados ante dichos escenarios, resultó que la disminución en la recarga y una evaluación anual del agua subterránea eran prácticamente perceptibles.

Tokgos *et al.*, (2002), utilizaron en conjunto optimización de técnicas y modelado de flujo de agua subterránea para determinar el diseño óptimo de un sistema de desecación para una excavación tipo fosa (con 3,000 m de longitud) para ser abierto bajo los niveles de agua subterránea en el Distrito Industrial Organizado Aksaray en Aksaray, Turquía. Para ello simulaban cuatro sistemas distintos mediante diferencias finitas escogiendo el que cumpliera con características como finalización del tiempo de construcción, número de pozos de bombeo, cantidad de bombeo, así como eficiencia y aplicabilidad del sistema a la práctica.

En Estonia, Vallner (2003) realizó un modelo hidrogeológico utilizando el programa Visual MODFLOW que cubre toda el área del país mencionado, los bordos de la zona costera, el Lago Peipsi y los límites distritales con la Federación Rusa y Latvia, sumando un total de 88 032 km². el modelo cuenta con 13 capas que incluye los acuíferos principales, acuitardos, aguas superficiales, así como las partes impermeables más bajas del basamento cristalino. En dicho modelo pueden simularse la distribución tridimensional de las cargas de agua, direcciones de flujo, velocidades, cantidades, además de características de transporte. El autor pretende

que su modelo sea considerado como una poderosa y factible herramienta para avanzadas investigaciones hidrogeológicas.

Jaworska-Szulc (2004), realizó una investigación cuyo objetivo principal fue evaluar el efecto de la alteración de la complejidad del modelo en la representación del sistema de flujo de agua subterránea del acuífero Gdansk en Polonia, utilizando el programa MODFLOW. El autor menciona que la modelación es un problema bastante complejo y difícil, el cual progresa dependiendo de la colección de información misma que debe estar perfectamente subordinada por los requerimientos matemáticos del modelo.

McPhee y Yeh (2004) adaptaron un modelo desarrollado Goode y Maddock (2002) para la cuenca del Río San Pedro, en el sureste de Arizona, E.U.A. Dicho modelo esta aplicado en MODFLOW el cual es utilizado para simular escenarios de extracción bajo regímenes de flujo estacionario y transitorio. El sistema cuenta con una estructura de 4 capas con 171 renglones y 90 columnas representando al sistema real. El modelo fue calibrado en estado estacionario con información anterior al año 1960; y en estado transitorio utilizando un periodo de información de 1940 a 1997. En un estudio realizado en 1997 por Goode y Maddock se identificaron 3,470 pozos con un rango de bombeo individual que oscilaba de 0 a 2,761 m³/día. El objetivo de los autores del estudio es contar con una herramienta que contribuya al manejo sustentable del sistema hidrogeológico.

Vásquez (2005), realizó una evaluación del potencial hidrogeológico del acuífero La Bomba en la cuenca del Río Banano, Limón, Costa Rica. Para ello, utilizó el programa Visual MODFLOW 4.0. Dicho acuífero constituye la principal fuente de agua subterránea de agua potable para la ciudad de Limón, la cual cuenta con una población cercana a los 65,000 habitantes, y del cual se extraen 200 l/s (en promedio) a través de 8 pozos. Luego de evaluar el potencial, el autor llegó a la conclusión que actualmente solo se utiliza el 15% de la capacidad del acuífero ya que se podrían extraer hasta 1,200 l/s, y según la simulación la mejor zona para nuevas captaciones es en la zona este a donde se ubica la zona de pozos actuales.

La compañía Schlumberger Water Services (2006) desarrolló y aplicó un modelo de flujo de aguas subterráneas en los sistemas de flujo a los alrededores de una cantera localizada en Acton, Notario al noroeste del área metropolitana de Toronto, Canadá para la evaluación de escenarios de extracción de agregados y el impacto potencial que dicha actividad podría provocar. Para ello, la compañía desarrolló y calibró un modelo de flujo de aguas subterráneas que refleja las condiciones hidrogeológicas del sitio en el sistema de cómputo Visual MODFLOW. Finalmente, pudieron predecir con los escenarios, abatimientos menores de 0.5 m dentro de 1 km alrededor de la cantera y con ello obtener una herramienta (modelo) que permita la evaluación del flujo de aguas subterráneas cerca de la cantera.

Abderrahman *et al.* (2007) desarrollaron un modelo de flujo en Visual MODFLOW para predecir la respuesta los acuíferos Dammam y Umm Er Raghuma en Arabia Saudita en términos de declinación de los niveles de agua bajo diferentes esquemas de bombeo de los dos acuíferos durante los siguientes 30 años. Para ello, asignaron condiciones de frontera, propiedades hidráulicas y realizaron la calibración tanto en flujo constante (utilizando información de 1967) como transitorio (con un periodo de simulación de 13,870 días: 38 años entre 1967 y 2006). El modelo constó de 65 renglones y 44 columnas, con dimensiones de 2 km x 2 km fuera de la mayor zona de bombeo y de 1 km x 1 km dentro de la mayor zona de bombeo. Con dicho modelo, han podido implementar distintas políticas para el manejo y conservación del agua de la región.

En 2007, Gadeon *et al.* realizaron un modelo regional de agua subterránea en el noreste de Bélgica. Para estudiar la posibilidad para disponer de desperdicios radioactivos de alto nivel en la formación Boom Clay en Mol, Bélgica. Para ello, realizaron un modelo utilizando el código de MODFLOW 2000 para realizar una actualización de los estudios previos y obtener mejoras en el entendimiento del flujo regional, mejorar las calibraciones de los parámetros hidráulicos de la formación Boom Clay y los acuíferos adyacentes con la finalidad de aplicar la nueva información del sitio y simular el comportamiento transitorio de los acuíferos.

Rocha (2009), implementó un modelo numérico en el programa de computo MODFLOW 2009.1 en el acuífero administrativo de Rioverde, San Luis Potosí; el modelo quedó discretizado por 24 columnas y 44 renglones con dimensiones de 2,500 m x 2,500 m. El propósito del modelo fue establecer propuestas de manejo para el desarrollo y aprovechamiento sustentable del agua de los sistemas de flujo en el acuífero de Rioverde, S.L.P. ya que, se presentan características de aprovechamiento intensivo.

Durán (2012), realizó un modelo numérico a través de MODFLOW, para un el sector SW del salar Atacama, en Chile, en el cual, su objetivo principal fue caracterizar el funcionamiento hidrológico e hidrogeoquímico de dicho sector. El dominio modelado tiene una longitud de 17 km y un ancho de 15 km, conformando una malla de 25,500 celdas. Realizando 2 escenarios a futuro, el ultimo con un aumento en el caudal de extracción. Finalmente realizó un modelo de soluto común en la región llamado "ion A". Estos modelos constituyen importantes herramientas para avanzar en el estudio del comportamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico del acuífero, en beneficio de una explotación óptima de las reservas del yacimiento.

Rocha, H, 2016, realizó a través de un modelo numérico en FEFLOW 6.2, un estudio en la región de Mérida-Progreso, en el estado de Yucatán. El modelo fue discretizado en una malla triangular de 5000 nodos y 4 capas y fue realizado para medios kársticos, para determinar las implicaciones en los ecosistemas de la zona costera, a causa de la contaminación del agua subterránea por aguas residuales de la zona urbana de Mérida. El autor calibró y validó el modelo de flujo y transporte de contaminantes, y realizó 3 escenarios futuros con transporte de Nitratos, ya que este soluto puede ser un beneficio o un problema para las zonas de manglar, debido a que sus efectos podrían funcionar como nutrientes o causar efectos de eutrofización y desencadenar una disminución del área de manglares, los cuales son importantes para el desarrollo de fenómenos esenciales para la vida de muchos organismos, por

lo que se concluyó, con base en los resultados, que la actividad fundamental en el futuro sería realizar un tratamiento de las aguas residuales antes de ser vertidas al acuífero.

Las aplicaciones de los modelos de aguas subterráneas han sido representar y simular su comportamiento ante diferentes alternativas de aprovechamiento, con base en lo cual se pueda elegir la opción más conveniente. La utilización de modelos para la simulación de acuíferos ha venido en aumento y se aplican a temáticas como estudios de drenajes agrícolas, redes de filtración en presas, movimiento de contaminantes, entre otros; por eso, es importante la realización de este estudio, ya que, la información del acuífero de Salinas de Hidalgo es escasa, esto quiere decir, que no se han realizado estudios como éste en dicha región y los resultados podrán ser de gran utilidad para el aprovechamiento del agua subterránea en la zona.

1. Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P.

1.1 Localización

El acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, se localiza dentro del municipio del mismo nombre y en una pequeña parte del municipio de Moctezuma y Villa de Ramos en el estado de San Luis Potosí; al sur con el estado de Zacatecas en los municipios de Villa González Ortega, Pinos, Loreto y Noria de Ángeles (Figura 1); dicho acuífero está designado con la clave 2403 del Sistema de la Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2006). Específicamente se encuentra ubicado en la parte poniente del estado de San Luis Potosí, entre los paralelos 22° 30' y 22° 51' de latitud norte y entre los meridianos 101° 29' y 101° 53' de longitud oeste. Cubre una superficie aproximada de 1,006 Km². Colinda con los acuíferos administrativos de Santo Domingo y El Barril al norte, Espíritu Santo al este, en el estado de San Luis Potosí, y Villa Hidalgo al sur, y La Blanca al Oeste, en el estado de Zacatecas (CONAGUA, 2006).

1.2 Clima

Según los criterios de Wilhem Köppen modificados por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima en el área se clasifica en su mayoría dentro del tipo BS0 climas secos, subtipo BS0kw secos templados, y en menor proporción se clasifica del tipo BS1 semisecos, subtipo BS1kw semiseco templado; ambos con lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10. En esta zona el tipo de climas presenta condición de canícula (CONAGUA, 2015).

El promedio anual de la temperatura de la zona está comprendido entre 16°C y 17°C. La precipitación media anual está comprendida entre 350 mm/año y 425 mm/año, con un promedio general en la zona del valle de 375 mm/año, y en las zonas topográficamente altas de 415 mm/año. La evaporación potencial media del área es del orden de 1577.7 mm/año (CONAGUA, 2015).



ACUÍFERO ADMINISTRATIVO SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE
INGENIERÍA

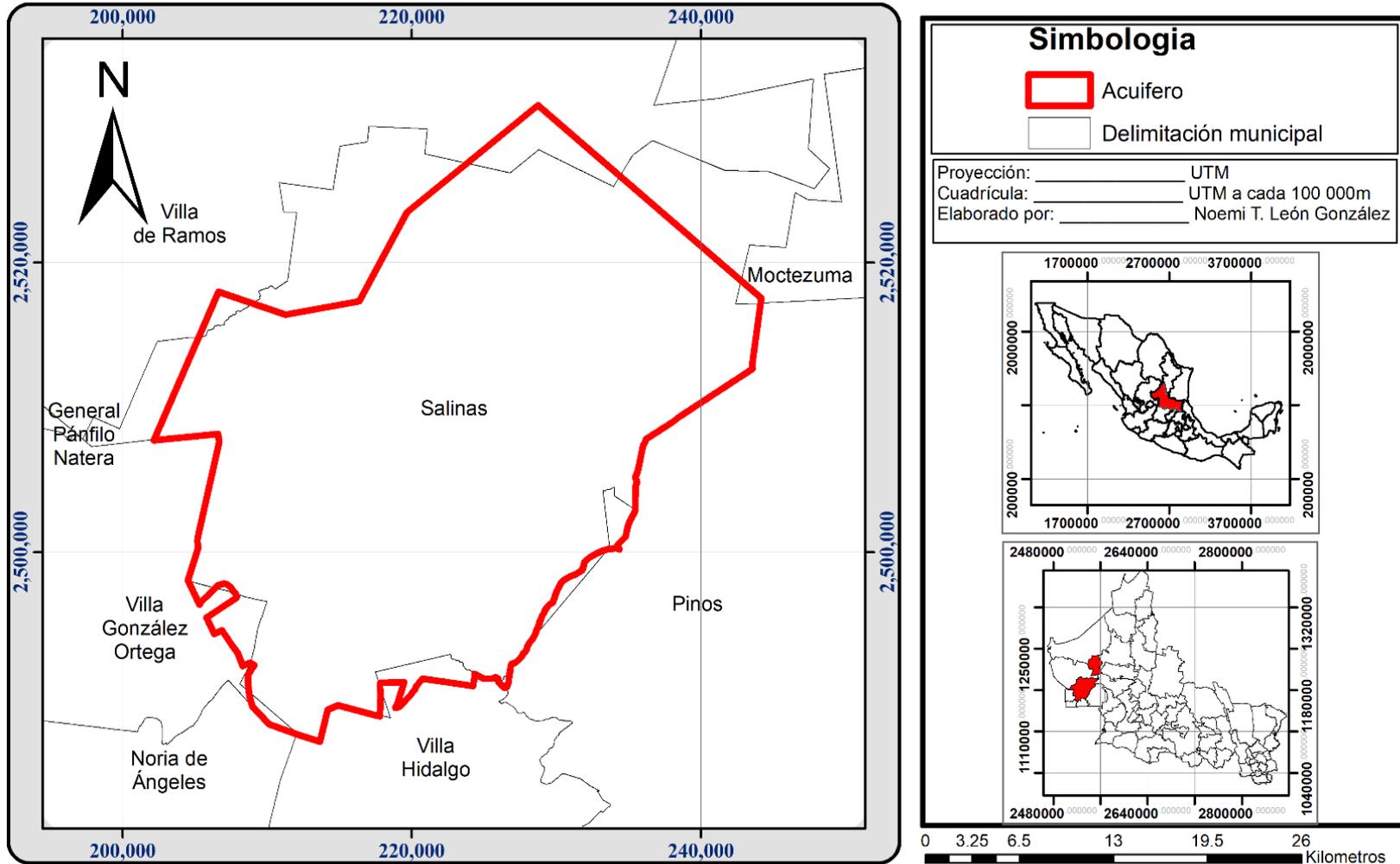


Figura 1. Ubicación del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí (CONAGUA, 2015; INEGI, 2019)

1.3 Hidrología Superficial

1.3.1 Hidrografía

El acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo pertenece a la Región Hidrológica Administrativa No. 37 “El Salado”, Cuenca del río San Pablo. La zona se encuentra en la porción sureste de la cuenca endorreica denominada “El Salado”, que comprende la mayor parte del estado de San Luis Potosí, y parte de los estados de Aguascalientes, Zacatecas, Coahuila y Tamaulipas. En esta cuenca no se observan cauces importantes, debido a que los arroyos que bajan de las sierras desaparecen en las llanuras. Sin embargo, en el área se pueden citar a los arroyos Santa Rosa, El Coyote, Los Encinitos, entre otros (CONAGUA, 2015).

La zona se caracteriza por la presencia de lagunas intermitentes, entre las que sobresalen las de Salinas, Azogueros, la Mesilla y Cornejo, que se caracterizan por su gran cantidad de sales y por encontrarse secas la mayor parte del año, ya que el agua de lluvia se infiltra rápidamente en el acuífero libre que tiene un nivel freático muy superficial (menor de 10 metros de profundidad). El drenaje en esta región es de tipo dendrítico, de flujo intermitente, con pendientes fuertes, las que descienden de las partes altas y con alto grado de erosión; la mayoría de estos arroyos desaparecen al llegar a los valles aluviales, llevando agua únicamente en épocas de lluvias, las que generalmente son torrenciales (CONAGUA, 2015).

Existen varias lagunas distribuidas en toda el área, como la laguna La Mesilla, laguna Santa Rosa y laguna Salinas; además de algunas lagunas, existen pequeños almacenamientos como la Presa Atarjea Mecha y la Presa Piedras Negras, las cuales sirven como fuentes adicionales de riego y abrevadero, sobre todo en época de estiaje (CONAGUA,2015).

1.4 Justificación

Durante los últimos años, el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo presenta características de aprovechamiento intensivo, esto es, la extracción calculada supera la recarga estimada, por lo que el acuífero, presenta un balance negativo de acuerdo con el reporte de actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero administrativo de Salinas Hidalgo (2403), estado de San Luis Potosí, presentado por la COANGUA en el año 2015, captando la atención en los sectores social y político. Por lo tanto, es importante la realización de este estudio que pretende comprender el comportamiento de las variables que rigen los sistemas de flujo, para generar estrategias de manejo adecuado que permitan realizar el aprovechamiento sustentable del agua subterránea. Con base en las problemáticas ocurridas en los últimos años, respecto a los incidentes de bajo rendimiento y abatimiento que inciden directamente en la cantidad de agua aprovechable para la población, se abre un espacio a la investigación para el estudio del funcionamiento de los sistemas de flujo de manera espacial y temporal, para mejorar su comprensión y subsecuentemente implementar estrategias de uso adecuado para implementarlas a programas gubernamentales.

1.5 Objetivo general

El objetivo general de este estudio fue formular una propuesta de estrategias de gestión hídrica mediante un modelo numérico de agua subterránea en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.

1.5.1 Objetivos específicos

Para el logro del objetivo general se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Elaborar una base de datos georreferenciada con información geológica, hidrológica e hidrogeológica del sitio de estudio para elaborar un modelo conceptual del sistema de flujo del acuífero.

- 2.- Definir el modelo conceptual hidrodinámico del acuífero administrativo.
- 3.- Desarrollar escenarios futuros en el acuífero de Salinas de Hidalgo con base en diversos esquemas de aprovechamiento y/o condiciones meteorológicas.
- 4.- Formular propuestas de manejo hídrico para el desarrollo sustentable del acuífero administrativo.

1.6 Metodología

La metodología a que se desarrolló para el logro de los objetivos específicos y por lo tanto para el logro de los objetivos específicos y por lo tanto del objetivo general fue:

- 1- Recopilar y analizar estudios relevantes previos de investigaciones hidrológicas e hidrogeológicas similares en la zona de estudio de “Salinas de Hidalgo, SLP”.
- 2- Realizar balances hídricos históricos con base en el análisis del ciclo hidrológico en la región, considerando las variables de: precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimientos, infiltración y flujo subterráneo.
- 3- Realizar mediciones para el monitoreo del nivel freático para identificar las direcciones de flujo subterráneo.
- 4- Elaborar el modelo conceptual mediante la definición de las unidades hidroestratigráficas a través de la implementación de sondeos geofísicos y el flujo de aguas subterráneas.
- 5- Generar una base de datos georreferenciada para la implementación del modelo numérico de aguas subterráneas, la cual comprendió la siguiente información: características geológicas e hidrológicas del acuífero, posición geográfica de los pozos, elevaciones de niveles freáticos, caudales de extracción y los balances hídricos superficial y subterráneo.

- 6- Implementar el modelo numérico en 3 dimensiones correspondiente al acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo a través del programa de computo Visual Modflow.
- 7 – Calibrar y validar el modelo numérico en un periodo de 7 años (2012-2019).
- 8.- Realizar la simulación de tres escenarios futuros mediante diferentes propuestas de esquemas de extracción del agua subterránea y eventos hidrometeorológicos representados a través de la recarga por flujo subterráneo.
- 9.- Con base en los resultados de la calibración y los escenarios futuros establecer propuestas de manejo del acuífero para el aprovechamiento sustentable del agua subterránea.

1.7 Población y actividad económica

El Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2010) presenta que el municipio de Salinas de Hidalgo cuenta con 30,184 habitantes, de los cuales 14,551 son hombres y 15,633 son mujeres; de acuerdo con las condiciones físicas de la zona y a los recorridos de campo se estima que un 70% de la población se concentra en el área del acuífero administrativo con un aproximado de 21,129 habitantes.

En cuanto a la actividad económica, la agricultura es una de las principales actividades con cultivos como: maíz, frijol, chile, alfalfa y cebolla. La comercialización de los productos se destina al autoconsumo y cuando se tienen excedentes se comercializa a nivel local o hacia la misma región (CONAGUA, 2011).

1.8 Geomorfología

Geomorfológicamente, el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo está constituido principalmente por sierras alargadas sobresaliendo de los extensos valles; el cerro del Peñón es la unidad que cuenta con mayor altura, la cual es del orden de 2,680 msnm; dicho cerro es un intrusivo ígneo félsico, definido como pórfido granítico, encajonado por sedimentos mesozoicos (CONAGUA, 2015).

El valle de la zona se puede clasificar como una unidad geomorfológica conformada principalmente por depósitos aluviales del Cuaternario, constituidos por material granular como son gravas, arenas, limos y arcillas, presentando altitudes de entre 2100 a 2200 msnm. Las sierras por su parte están constituidas principalmente por calizas del Cretácico, (CONAGUA, 2015).

1.9 Fisiografía

El acuífero administrativo Salinas de Hidalgo se encuentra situado dentro de la provincia fisiográfica denominada Mesa Central, dentro de la subprovincia denominada Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecano, caracterizada por una llanura extensa constituida por depósitos aluviales del Cuaternario interrumpida por sierras, mayormente volcánicas del Terciario, cubriendo casi en su totalidad el municipio de Salinas de Hidalgo, con extensos terrenos áridos con lomeríos en el noreste y sierras bajas al sureste (CONAGUA, 2015).

En el extremo sureste de la subprovincia, al noreste de la ciudad de San Luis Potosí, se levanta un conjunto de sierras de rocas sedimentarias marinas y continentales asociadas en mayor proporción con mesetas lávicas, clasificadas desde el punto de vista fisiográfico como pequeña sierra abrupta con mesetas. Colindando al sur con dicha provincia, se encuentra la Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, la cual ocupa la región central de la provincia Mesa Central. Se caracteriza por sus extensas llanuras con piso de caliche y muy somera cubierta aluvial, a altitudes de 2,000 msnm y al suroeste de la cabecera municipal de Salinas de Hidalgo, se encuentra una llanura desértica de piso rocoso o cementado (INEGI, 2002).

En la región, la altitud es variada; en la parte sur, la elevación en las porciones más bajas es de 1,710 msnm y 2,050 msnm en las más altas. Se caracteriza por presentar planicies a semi-planicies y una serie de lomeríos que hacen muy característica la zona, conformando una extensa llanura aluvial que se localiza entre los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, a unos 2,000 m de altitud, incluyendo sierras alargadas sobresaliendo de los extensos valles; mostrando los rasgos topográficos de etapas avanzadas en el ciclo de erosión (Sánchez-Olivares, 2013; CONAGUA, 2015).

1.10 Geología regional

Dentro del área perteneciente al acuífero de Salinas de Hidalgo afloran rocas ígneas intrusivas y extrusivas, así como vulcanosedimentarias y sedimentarias continentales marinas. El acuífero se localiza en el límite entre dos terrenos tectonoestratigráficos: el del occidente conocido como Terreno Guerrero y el del oriente llamado Sierra Madre (Tristán-González, 2008).

El terreno localizado en la porción oriental corresponde al Terreno Sierra Madre el cual descansa sobre un basamento Precámbrico cubierto por una secuencia de rocas sedimentarias del Cámbrico al Pérmico, capas rojas del Mesozoico temprano y rocas marinas del Mesozoico tardío que muestran estructuras de cabalgaduras al N y E, y el terreno de la porción occidental denominado Terreno Guerrero, está compuesto por rocas volcánicas andesíticas submarinas y sedimentos marinos del Mesozoico intrusionados por plutones graníticos mesozoicos y cenozoicos. El Terreno Guerrero muestra una historia diferente al Terreno Sierra Madre durante el Jurásico tardío-Cretácico medio (Tristán-González, 2008).

El medio ambiente de depósito de los sedimentos de la Unidad Vulcano-Sedimentaria del Terreno Guerrero durante el Cretácico temprano fue en aguas de relativamente poca profundidad, lo que sugiere que estos se depositaron en un ambiente intra-arco o "back-arc" (Yta, 1992). La presencia de magmatismo del arco Jurásico-Cretácico, sugiere que el Terreno Guerrero no se construyó sobre corteza continental (Centeno-García y Silva-Romo, 1997). Sobre los sedimentos triásicos de la Formación Zacatecas, se depositó la Formación Nazas, que es una secuencia pre-oxfordiana de rocas volcánicas (andesitas, riolitas y dacitas) en forma de flujos piroclásticos y lavas, con asociación de lechos rojos. Estas rocas volcánicas fueron derivadas del arco volcánico del Triásico-Jurásico de la margen poniente de Norteamérica (Grajales-Nishimura *et al.*, 1992; Jones *et al.*, 1995; Barboza-Gudiño *et al.*, 1998).

La porción oriental y central de la Mesa Central está dentro del Terreno Sierra Madre (Campa y Coney, 1983), donde afloran rocas que se depositaron en la Cuenca Mesozoica del Centro de México.

La Cuenca Mesozoica del Centro de México comenzó su sedimentación marina con la Formación La Joya en el Jurásico tardío, formada por depósitos fluviales y aluviales, y desarrollo calcáreo secundario que representan los depósitos basales de la transgresión marina del Calloviano-Oxfordiano. Su depósito continuó en el Jurásico tardío con secuencias calcáreas y terrígenas de las formaciones Zuloaga y La Caja. La subsidencia continúa en el Cretácico temprano con la acumulación de los sedimentos calcáreo-arcillosos de las formaciones Taraises y con el depósito de las calizas pelágicas con pedernal pre-cenomanianas correspondientes a las formaciones Cupido, La Peña y Cuesta del Cura. Su culminación empezó en el Turoniano, con depósitos terrígenos de la Formación Indidura y finalizó en el Maastrichtiano con la aparición del “*flysch*” de la Formación Caracol (Tristán-González, 2008).

El paquete volcánico que forma el Campo Volcánico de Salinas–Villa de Reyes (CVSVR), se localiza sobre una secuencia marina mesozoica perteneciente al Cretácico temprano y tardío, formado por las formaciones La Peña (Tamaulipas Superior), Cuesta del Cura, Indidura y Caracol. En el Terciario, durante el Paleoceno–Eoceno, se depositaron clásticos continentales representados por el conglomerado Zaragoza, y a partir del Eoceno medio se inició la erupción de la secuencia volcánica cuya actividad principal se desarrolló durante el Oligoceno. Finalmente, sobre este campo, hubo un vulcanismo Cuaternario representado por basanitas con nódulos de la base de la corteza (Rodríguez-León, 2012)(Figura 2).



Geología del Acuífero de Salinas de Hidalgo

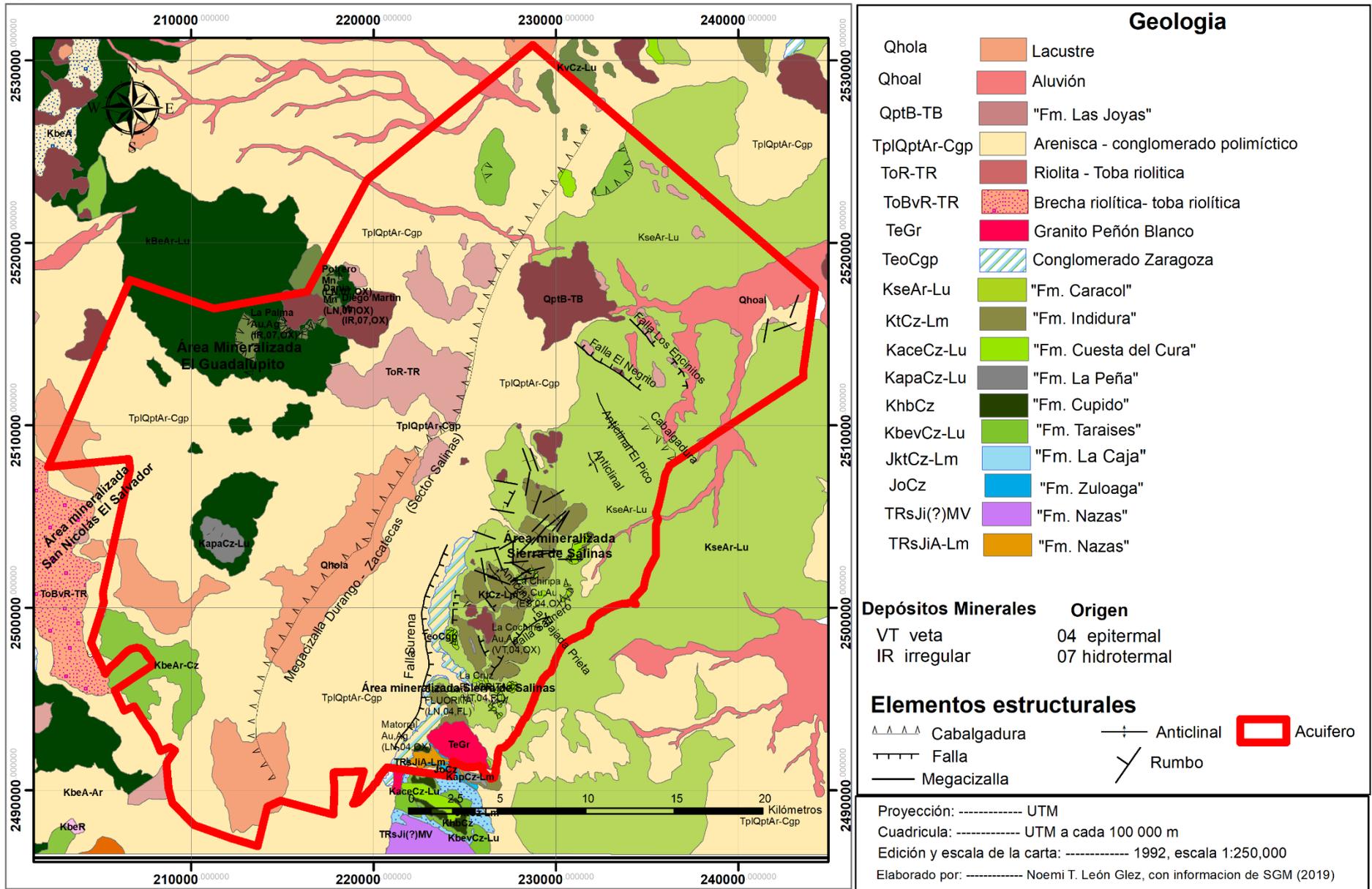


Figura 2. Mapa geológico del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo

1.11 Estratigrafía

1.11.1 Formación Nazas (Tr z)

Triásico Superior – Jurásico Inferior

Pantoja-Alor (1963 y 1972), definió a la Formación Nazas como una secuencia de sedimentos continentales que alternan con rocas volcánicas que afloran en los alrededores de Cinco de Mayo y al sur del Cerro Redondo, en el Estado de Durango. Consideró como “localidad tipo” el levantamiento de Villa Juárez sobre el Río Nazas. La secuencia consiste en lavas interestratificadas con tobas, lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo. La Formación Nazas en su localidad tipo infrayace a las unidades marinas del Jurásico Tardío (Silva-Romo, 1993).

La formación Nazas aflora en dos pequeñas zonas en la parte central de La Sierra de Salinas, la primera se localiza aproximadamente a 1 km al noroeste del poblado La Ballena. Estas rocas se distribuyen en una franja irregular que corre de este a oeste en la parte central de la sierra. El segundo afloramiento aparece aproximadamente a 1 km al suroeste del Cerro Peñón Blanco (Barajas-Nigoche, 2008).

La formación Nazas está constituida esencialmente por rocas volcánicas y volcanoclásticas, algunas capas de sedimentos epiclásticos y raros depósitos calcáreos. Predominan rocas de coloraciones oscuras en tonalidades rojizas y pardas rojizas en superficie fresca las cuales son principalmente derrames andesíticos-basálticos muy alterados. En superficie intemperizada presentan coloraciones violáceas y rojizas oscuras a verdosas claras y oscuras. Algunos horizontes son de coloraciones violáceas en superficie intemperizada (Barajas-Nigoche, 2008). Zavala-Monsiváis (2000) midió una sección al norte del Cerro Grande en donde describe a la formación Nazas como una secuencia que consiste en tobas de grano fino, rocas piroclásticas riolíticas, brechas volcánicas, lavas andesíticas y escasos lentes calcáreos. Los horizontes volcanoclásticos son rocas

principalmente brechosas y aglomeradas con fragmentos que varían desde 0.5 cm de diámetro hasta 30 cm o más. Otras capas de posible origen volcanosedimentario son algunas rocas de grano muy fino posiblemente depósitos de ceniza de coloraciones rojizas en superficie intemperizada y verde claro en superficie fresca. Estos horizontes miden en promedio 2 m de espesor en general son masivos con tamaños de grano que varía de la arenisca fina a limolita. Otros horizontes muy comunes en esta área son algunos depósitos de roca de composición calcárea, que en ocasiones presentan interestratificación con calcilutitas que contienen fragmentos de hasta 30 cm de diámetro de rocas probablemente volcánicas. Estos fragmentos se observan comúnmente hacia la base de horizontes (Barajas-Nigoche, 2008).

En el área de Villa Juárez, Durango, presenta dos miembros con capas depositadas en ambiente continental. En el miembro inferior predominan derrames volcánicos con cuerpos hipoabísales intercalados entre limolitas, mientras que el miembro superior se compone de areniscas y limolitas que descansan en discordancia angular sobre el miembro inferior. La cima de la Formación Nazas subyace en discordancia angular a la Formación La Joya, y ésta pasa a su vez en transición hacia la Formación La Gloria (Oxfordiano) (Eguíluz-de Antuñano *et al.*, 2014).

La Formación Nazas subyace discordantemente a la Formación Zuloaga como lo indican las relaciones estructurales entre ambas formaciones (Silva-Romo, 1993). La base de esta secuencia está en contacto discordante por erosión y por fallamiento con la Formación Zacatecas. La cima de la Formación Nazas está en contacto discordante con la Formación La Joya (Barajas-Nigoche, 2008).

Bartolini (1998), con base en la posición estratigráfica le asignó una edad del Triásico Tardío al Jurásico Medio. Barboza-Gudiño *et al.* (1999) fecharon por roca total, una muestra de andesita por el método K-Ar del cual obtuvieron una edad anómala de 81.9 ± 4.1 Ma, probablemente como producto de reactivación térmica

relacionada con la Orogenia Laramide. Debido a la columna estratigráfica que representa el área del acuífero de Salinas de Hidalgo, se le asigna la edad de Triásico Superior a Jurásico Inferior.

1.11.2 Formación Zuloaga (Jz)

Jurásico Oxfordiano Tardío- Kimmeridgiano Temprano

La Formación Zuloaga fue definida por Imlay (1938) en la Sierra de Sombreretillo al norte del poblado de Melchor Ocampo, en el Estado de Zacatecas. Describió la secuencia como depósitos calcáreos constituidos por calizas, calizas dolomíticas de color gris acero, en estratos que varían 1 a 3.5 m de espesor. Estas calizas fueron descritas anteriormente por Burckhardt (1930) como "calizas con nerineas" en las cercanías de Mazapil y en la Sierra de Symon, Zacatecas (Barajas-Nigoche, 2008). (Tristán-González, et al, 1994) describió que se trata de una secuencia calcárea que, en su base, presenta un contenido arcilloso muy alto, por lo que son auténticas margas con abundancia de fragmentos fósiles, siendo algunos horizontes un verdadero *boundstone*, además hay capas delgadas de brecha sedimentaria, implicando acción erosiva eventual del piso marino. La parte media se presenta como una alternancia de marga y caliza, con espesor de 20 a 60 cm, un contenido alto de fósiles con nódulos de hierro eventuales. La parte superior de la secuencia se considera a partir de donde empieza el predominio de calizas las margas son aisladas, luego continúan horizontes de lutita y caliza arcillosa, además de caliza de estratificación media con nódulos de pedernal negro.

La Formación Zuloaga sobreyace concordantemente de forma transicional a la Formación La Joya, cambiando gradualmente de depósitos conglomeráticos a margosos y calcáreos en un intervalo de aproximadamente 3 m (Barajas-Nigoche, 2008). Se considera una transición normal entre las facies terrígenas de la Formación la Joya y las calizas de la Formación Zuloaga. Respecto a la facies de relativa mayor profundidad interpretada por Bacon (1978) para las primeras capas de caliza en la base de la Formación Zuloaga, se observa a nivel regional que el

tope de la Formación La Joya aparece bien estratificado y laminado, y con marcas de oleaje, indicando un ambiente marino somero. Se interpreta también la ocurrencia de algunas capas margosas hacia la base de la secuencia calcárea como una transición entre la Formación La Joya y la Formación Zuloaga (Barboza-Gudiño et al., 2004).

Barboza-Gudiño *et al.* (1999), le asignan una edad del Oxfordiano-Kimmeridgiano en base a la presencia de pelecípodos del género *Nerinea sp.*

1.11.3 Formación La Caja (Jc)

Jurásico Tardío Kimmeridgiano-Tithoniano

Imlay (1938) propuso formalmente el nombre de Formación La Caja para describir una secuencia de 83 m de espesor de calizas limolíticas de color ocre y blanquecino, estratos de pedernal, limolitas calcáreas, limolitas calcáreas con pedernal, calizas arcillosas fosfatadas, pedernal calcáreo fosfatado, calizas gris rojizas y limolitas con concreciones fosilíferas de caliza. La localidad tipo se encuentra en la Vereda del Quemado, situada en el flanco meridional de la Sierra de La Caja, al norte de Mazapil, Zac. (Silva-Romo, 1993).

Rogers y colaboradores (1961) dividieron la formación en 4 unidades:

Unidad “A” constituida por capas delgadas de limolitas, sobrepuestas por limolitas con pedernal y una capa de caliza algo cristalina. Hacia la cima, está formada por limolitas calcáreas, debidamente consolidadas, de color parduzco a pardo grisáceo, con capas de espesor delgado a mediano, y que presentan concreciones de caliza y tiene un espesor de 10 a 45 cm. Unidad “B”: compuesta por calizas arcillosas fétidas, de color grisáceo, en capas de espesor mediano a grueso, con intercalaciones de limolitas y lutitas calcáreas, en muchos lugares incluye lentes de caliza, compuesta por calcita microcristalina de matriz arcillosa y lentes de caliza en cristalización gruesa, fétida, hacia la cima contiene capas de pedernal pardo oscuro a negro con limolitas calcáreas, lutitas y calizas fosfatadas y fosforita. Unidad “C”: compuesta por una caliza con alto contenido de fosforita, pedernal fosfatado y

pedernal calcáreo fosfatado de color gris a gris oscuro, con lentes de caliza fosfatada, microcristalina de color gris rojizo. Siendo todas las rocas de la unidad muy fétidas. Presenta espesores variables y el contenido de fosforita es inversamente proporcional al espesor de la unidad; Unidad “D” presenta una litología muy característica que consiste de limolitas calcáreas de color pardusco a gris parduzco con numerosos lentes y capas pequeñas de pedernal negro, la limolita intemperiza en gris muy característico (Tristán-González y Aguillón-Robles, 1982).

La Formación La Caja tiene un espesor total de 160 m de acuerdo a la medición reportada por Arellano-Gil (1988).

Esta formación sobryace en forma concordante y nítida a la Formación Zuloaga. El contacto está definido por un cambio abrupto en el espesor de los estratos y en la desaparición de las calizas de plataforma y en la repentina aparición de estratos limo-calcáreos delgados. Morfológicamente se aprecia una ruptura pronunciada en la pendiente. La Formación La Caja subyace a la Formación Taraises en forma concordante y transicional (Silva-Romo, 1993).

Dentro del área de estudio, Silva-Romo (1993) identificó algunos ejemplares de pelecípodos, espinas de equinodermos y amonoideos clasificados como *Aspidoceras*, *Ourangites*, *Kossmatia*, *Subdichotoceras sp.*, *Substeueroceras sp.*, *Virgatoxioceras sp.* y *Paradontoceras sp.*, indicando una edad por asociación faunística del Kimmeridgiano tardío-Tithoniano tardío. Consideró asignarle una edad Kimmeridgiano-Tithoniano para esta secuencia calcáreo-arcillosa perteneciente a la Formación La Caja, con base en su posición estratigráfica.

1.11.4 Formación Taraises (Kit)

Cretácico Neocomiano Berriasiano-Hauateriviano

Descrita originalmente por Imlay (1936), quién designó como localidad tipo al Cañón de Taraises, localizado en la porción occidental de la Sierra de Parras, Coahuila. Imlay divide a la formación en dos miembros con un espesor conjunto de 148 m.

Miembro Inferior: consiste de calizas de capas gruesas y delgadas que intemperizan en un color gris y gris claro. Miembro superior: contiene calizas y margas de color gris a gris oscuro en capas de espesor mediano a grueso (Tristán-González y Aguillón-Robles, 1982).

Silva-Romo, 1993; describió la unidad como secuencia calcáreoarcillosa en las partes basal y cimera, y calcárea en la porción media; con pedernal en forma de lentes en la base y de nódulos en la cima base. Los espesores de los estratos son menores de 50 cm. En la Sierra de Salinas, en el municipio de Salinas, San Luis Potosí, Labarthe Hernández *et al.*, (1982) dividieron dicha Formación en cuatro miembros:

Miembro "A": constituido por limolitas calcáreas en capas delgadas, de color violáceo, gris claro y gris oscuro; presenta pequeños budines de caliza arcillosa de color gris claro y algunas capas esporádicas de pedernal negro, con un espesor variable de 15 hasta 20 m.

Miembro "B": limita con las limolitas y comienza una secuencia de calizas microcristalinas macizas, en estratos medianos de 30 a 80 cm, de color gris crema que intemperiza en color castaño. Se encontraron de manera esporádica lenticillos de pedernal castaño y concreciones de hematita. Hacia la cima de este miembro, comienzan a aparecer delgadas capas de limolitas que, conforme se acerca a la cima, se hacen más gruesas, mientras que las calizas disminuyen su tamaño. Con un espesor variable de 46 a 117 m.

Miembro "C": se compone por calizas lajosas, algo arcillosas en capas delgadas de 3 a 10 cm, de color gris oscuro, intercaladas con bandas y lentes delgados de pedernal negro y capas de limolitas de 2 a 5 cm, fisiles de color gris oscuro.

Miembro "D": formado principalmente por calizas de estratificación delgada a mediana de 20 a 40 cm, de color gris claro a oscuro, algo carbonosas, arcillosas y

lajas, con budinaje en algunos lugares; interestratificadas con bancos de limolitas físilas de 30 a 50 cm, de color gris claro a café claro, con presencia de lentes y nódulos de pedernal de color negro y castaño. Hacia la parte superior de este miembro, las capas de limolita empiezan a hacerse más delgadas, hasta transformarse en laminaciones mientras que la caliza se hace más maciza y microcristalina de color crema, empieza a tener un aumento faunístico de amonites.

La Formación Taraises suprayace de manera concordante transicional a la secuencia calcárea de la Formación La Caja y subyace concordantemente y de forma transicional a depósitos calcáreos de la Formación Tamaulipas Inferior (Barajas-Nigoche, 2008).

Silva-Romo (1993) recolectó en esta misma localidad un ejemplar de *Inoceramus* sp. proponiendo una edad del Berriasiano-Valanginiano para la Formación Taraises.

1.11.5 Formación Cupido (Kic)

Cretácico Inferior Huateriviano-Barremiano

Formación descrita por Imlay (1937) en la parte meridional de la Sierra de Parras, en el Estado de Coahuila. La localidad tipo se localiza en el Cañón del Mimbres, donde dicho autor describió la litología y estableció las relaciones cronológicas utilizando amonites (Tristán-González, Torres-Hernández, 1994).

En general, la Formación Cupido está constituida por caliza de color gris oscuro, en estratos medianos a gruesos, que al intemperizarse adquieren un color gris rosáceo claro; contienen además abundantes concreciones de pirita y nódulos de pedernal gris. Se encuentra cubriendo sobre todo las partes altas de los cerros, en la zona meridional de la Sierra de Salinas (Tristán-González y Aguilón-Robles, 1982).

La Formación Cupido está formada en su base como una secuencia de caliza microcristalina de color gris claro, en capas de 10 a 20 y hasta 40 cm de espesor,

intercaladas con lentes esporádicos y bandas de pedernal negro, y capas aisladas de limolita de color violáceo, contienen nódulos de hematita, algunos belemnites y amonites. Los estratos aumentan progresivamente de espesor, de tal manera que en la parte media llegan a mediar hasta 2 m, con abundantes líneas estilolíticas. El pedernal se presenta como masas irregulares, de color pardo y algunas bandas de color negro de 5-10 cm de espesor. Hacia la parte superior de la Formación Cupido, las capas de caliza son más puras, disminuyen de espesor (10-30 cm) y son de textura microcristalina. Su color es gris claro y esporádicamente están intercaladas con capas delgadas de limolita de color violáceo (Tristán-González y Torres-Hernández, 1994).

Subyace a la formación La Peña, con un contacto concordante y transicional. Yace a la formación Taraises, poniéndose el contacto, donde las capas de limolitas desaparecen y donde las calizas se hacen compactas, microcristalinas con nódulos y lentes de pedernal; siendo por lo tanto su contacto concordante y transicional (Tristán-González, Aguillón-Robles, 1982).

Rogers *et, al.* (1961) encontraron fauna correspondiente al Hauteriviano superior y Barremiano.

1.11.6 Formación La Peña (Kip)

Cretácico Temprano Aptiano

La Formación La Peña fue originalmente descrita por Imlay (1936), quien le dio este nombre, recibiendo el flanco occidental de la Sierra de Parras, cerca de la Hacienda La Peña, la nominación de la localidad tipo, en donde la dividió en dos miembros; el miembro inferior consiste aproximadamente 427 m de caliza gris oscura a gris claro, en estratos medianos a gruesos, contiene zonas de caliza finamente estratificadas y cantidades variables de lutitas; las superficies intemperizadas son de gris a gris amarillento y puede contener concreciones de pirita, así como nódulos de pedernal; el miembro superior consiste de calizas de capas delgadas y lutitas estratificadas; el espesor va de 15 a 24 m (Tristán-González y Aguillón-Robles, 1982).

La Formación La Peña, aflora en los flancos del Cerro La Peña aproximadamente a 4.5 km al norte del poblado La Ballena (Barajas-Nigoche, 2008).

La litología de la Formación La Peña consta principalmente de calizas margosas de coloraciones gris claro a gris amarillento en superficie intemperizada; los estratos llegan a medir hasta 25 cm de espesor. Estas capas de caliza están interestratificadas con capas y láminas lutíticas y algunas capas de pedernal negro. Las capas arcillosas varían de unos cuantos centímetros hasta 15 cm de espesor, de coloraciones verdosas y amarillentas en superficie fresca e intemperizan a coloraciones rosáceas, blanquecinas y amarillo verdoso. El espesor de esta unidad con base en observaciones de campo se estima en aproximadamente 80 m (Barajas-Nigoche, 2008).

Según Tristán-González y Torres-Hernández (1994), la Formación La Peña yace sobre la Formación Cupido y su contacto es transicional, pasando de caliza microcristalina a caliza de estratificación delgada intercalada con limolita, en su contacto superior con la Formación Cuesta del Cura es concordante, transicional y se situó donde desaparecen los sedimentos terrígenos y aparecen estratos delgados de caliza pura, intercaladas con bandas de pedernal.

Humphrey (1949 en Serrano-Marín, 1991) le asignó una edad del Aptiano con base en estudios paleontológicos en el área de Sierra de Los Muertos en Concepción del Oro, *lac* (Barajas-Nigoche, 2008).

1.11.7 Formación Cuesta del Cura (Kcc)

Albiano-Cenomaniano

La Formación Cuesta del Cura fue definida por Imlay (1936) denominando como localidad tipo a una excelente exposición de esta secuencia, aproximadamente 6.5 km al oeste de Parras, Coahuila. Esta secuencia comprende 64 m de capas delgadas y compactas de caliza de formas onduladas de coloraciones gris y gris oscuro,

intercaladas con escasos horizontes arcillosos y abundantes nódulos y bandas de pedernal negro (Barajas-Nigoche, 2008).

La Formación Cuesta de Cura se encuentra aflorando en la parte norte de la Sierra de Salinas a partir del cuerpo intrusivo del Peñón Blanco; consiste en una caliza gris claro, microcristalina, en capas delgadas, de estratificación ondulada; con bandas y lentes de pedernal negro. Los estratos se hacen más gruesos hacia su base y hacia su cima empiezan a aparecer capas de limolitas (Labarthe-Hernández *et al.*, 1986).

Consiste de calizas en estratos delgados de 3 a 10 cm, de color gris claro, microcristalina, interestratificada rítmicamente en bandas y lentes de pedernal negro, con estratificación ondulante. Presenta numerosas vetillas de calcita de color blanco sin orientación definida. El grueso de los estratos se hace más potente, hacia el contacto con la Formación La Peña, llegando a medir hasta 50 cm, así mismo, disminuyen las capas de pedernal y aumentan los lentes y nódulos. Hacia el contacto con la formación Indidura, la caliza se hace de color más claro y se vuelve más arcillosa y empiezan a aparecer capas de limolita y son menos abundantes las bandas de pedernal (Tristán-González y Aguillón-Robles, 1982).

Las rocas de la Formación Cuesta del Cura, están representadas por calizas delgadas de aproximadamente 15 a 20 cm de espesor, de coloraciones gris claro en superficie alterada y gris oscuro en superficie fresca, estas calizas se intercalan con capas delgadas de pedernal negro, comúnmente laminares con espesores de hasta 15 cm (Barajas-Nigoche, 2008). El espesor total de la unidad se estima en 160.0 m (Silva-Romo, 1993). La Formación Cuesta del Cura Sobreyace a la Formación La Peña con un contacto concordante y transicional; y subyace a la Formación Indidura también con un contacto concordante y transicional (Galicía-Ovalle, 2005).

Ice (1979) estudió la Formación Cuesta del Cura en La Sierra de Catorce, quien la situó desde el Albiano medio hasta el Cenomaniano tardío (Tristán-González, 1992).

1.11.8 Formación Indidura (Ksi)

Cenomaniano Tardío-Turoniano temprano

La Formación Indidura fue originalmente descrita por Kelly (1936) en la región de Delicias, Coahuila. En esa región consiste en 30 m de capas delgadas de lutitas y calizas, lajas que sobreyacen a la Caliza Aurora y contienen fauna del Albiano tardío al Turoniano (Barboza-Gudiño, 2004). Imlay (1936), midió una secuencia de 652 m de espesor, en la Sierra de Parras, Coah.; ahí, la unidad consiste en cinco miembros caracterizados por calizas, lutitas, lutitas calcáreas y calizas arcillosas de estratificación delgada de color gris oscuro y negro fosilíferas (Silva-Romo, 1993). Se encuentra distribuida principalmente a lo largo de la Sierra de Salinas en su parte septentrional (Tristán-González y Aguillón-Robles, 1982).

La Formación Indidura es una secuencia calcáreo-arcillosa, cuya base se caracteriza por la presencia de calizas arcillosas y lutitas calcáreas de color gris con tonos de amarillo, dispuestas en estratos con espesores entre 3 y 25 cm, con algunos horizontes de bentonita friable de color verde olivo; además, presenta nódulos de pedernal, láminas de yeso y horizontes de hematita. La cima de la formación consiste en wackestones, lutitas calcáreas y areniscas de color gris que intemperizan en tonos amarillentos, dispuestas en estratos delgados, con algunos nódulos de pedernal negro y un horizonte con abundantes amonitas recristalizadas (Silva-Romo, 1993).

Se encuentra distribuida principalmente a lo largo de la Sierra de Salinas, a inmediaciones de los poblados del Tepetate y el Pedernal; en dicha área Labarthe-Hernández *et al.*, (1982) reconocieron dos miembros de la Formación Indidura:

El miembro uno a su base y parte media inferior, está formada por capas de caliza de 10-40 cm, de color gris oscuro a negra, algo carbonosa, que intemperiza en un color gris crema, intercalada con estratos de caliza de 5-10 cm, lajas y arcillosas, de color violáceo y algunas delgadas capas de limolita del mismo color;

esporádicamente contiene algunos nódulos y bandas de pedernal negro, siendo estos más sobresalientes sobre todo hacia su contacto con la Formación Cuesta del Cura. Además, presenta una gran cantidad de vetillas de calcita, de color blanco y gris, que cruzan en todas direcciones, entre las fracturas y planos de estratificación.

Aproximadamente hacia su parte media, las capas de caliza se hacen más delgadas de 5-10 cm, de color gris claro, arcillosa, que intemperiza a color violáceo y amarillento; éstas, se intercalan con delgadas capas de limolita de color gris, violáceo y morado; en algunos lugares presenta interestratificación no rítmica con las calizas y limolitas, con delgadas bandas y lentes de pedernal negro.

Hacia su cima se encuentra un horizonte lenticular, formado por una alternancia de delgadas capas de caliza arcillosa, de color gris claro, con estratos delgados de limolitas calcáreas en capas delgadas a muy delgadas, de color gris claro a gris amarillento y algunos lentes y bandas de pedernal negro muy aislados; en algunos sitios se pudo ver un horizonte formado de gruesos lentes de caliza, hasta de 2 m de espesor, de color gris claro. Cerca de su contacto con la Formación Caracol tiene otro horizonte formado de areniscas y lutitas en capas delgadas, intercaladas rítmicamente, el cual tiene un espesor total de 1-3 mts.

Silva-Romo (1993) señala que sobreyace a la Formación Cuesta del Cura conforme a un contacto concordante y transicional definido por la desaparición de los estratos ondulados de la Formación Cuesta del Cura y por la aparición de horizontes arcillosos. Está cubierta también transicional y concordantemente por la Formación Caracol.

Con base en el contenido fosilífero que presenta y en la edad que tiene la Formación Cuesta del Cura, se le asigna una edad correspondiente al Cenomaniano Tardío-Turoniano temprano (Silva-Romo, 1993).

1.11.9 Formación Caracol (Ksc)

Cretácico Tardío Coniaciano-Maestrichtiano

Imlay (1936) propuso el nombre de Formación Caracol para describir una secuencia de 282 m de tobas desvitrificadas intercaladas con lutitas y con algunos estratos de calizas, que descansan sobre la Formación Indidura, tal como aflora en la margen oeste del Arroyo El Caracol situado en la Sierra de San Ángel, en la parte oriental de la Sierra de Parras, Coahuila (Barajas-Nigoche, 2008). Aparece distribuida en los flancos de las sierras y en las partes planas, aflorando en pequeñas ventanas, dando lugar a una topografía muy suave, sin elevaciones y generalmente cubierta por una delgada capa de material aluvial (Tristán-González y Aguillón-Robles, 1982).

Consiste de lutitas de color gris verdoso, físciles que al partirse se astillan muy fácilmente, intemperizan a un color café rojizo, alternándose con arenisca en estratos de 10 a 30 cm, son de color verde con granos sub-redondeados de feldespatos, cuarzo y una cantidad abundante de moscovita, contenidos en una matriz calcárea. Presenta una gran cantidad de estructuras de corriente, rizaduras de oscilación, moldes de estrías de corrientes, las cuales se forman por la acción de corrientes y por cargas de compactación (Tristán-González y Aguillón-Robles, 1982); presenta una secuencia turbidítica en la que se incluyen bancos, estratos, capas y láminas de areniscas de coloraciones verdes oscuro y verde amarillento a ligeramente rojiza con tonalidades ocres en superficie intemperizada y de coloración gris verdoso en superficie fresca, presentando estratificación gradada además de abundantes estructuras sedimentarias como canales, marcas de carga y marcas de corriente. Estas areniscas, están interestratificadas con capas y láminas de limolitas y lutitas físciles con colores de intemperismo verde oscuro a verde amarillento (Barajas-Nigoche, 2008).

Sobreyace en forma concordante y transicional a la Formación Indidura; el contacto está definido por la desaparición de las calizas y la sustitución por areniscas turbidíticas (Silva-Romo, 1993).

Se le asigna la edad dada por Carrillo Bravo (1971), correspondiente desde el Coniaciano hasta el Maestrichtiano (Tristán-González, Aguillón-Robles, 1982). Se tiene la emisión de basalto y toba basáltica, la cual es correlacionable con la Formación Las Joyas (Labarthe, et al, 1982)

Rocas Continentales

Las rocas continentales están representadas por depósitos conglomerados, areniscas, aluviones y depósitos lacustres.

1.11.10 Conglomerado Zaragoza

Terciario (Eoceno tardío-Oligoceno)

Se designó informalmente con este nombre a depósitos continentales compuestos de gravas, arenas y limos. Se encuentra estratigráficamente debajo de la toba Herradura y de otras unidades volcánicas del área. Su localidad tipo se encuentra en un banco de préstamo a la orilla de la terracería que va del poblado de La Herradura a Zaragoza, aproximadamente a 4 km al sureste del poblado de La Herradura (Salazar-Hurtado, 2019)

Su litología principal consiste en un conglomerado de color rojizo más o menos consolidado, con fragmentos de 1 a 20 cm, angulares a subangulares de arenisca, lutita de la Formación Caracol y de jasperoide, y en ocasiones contiene fragmentos de caliza. Su matriz es limo-arcillosa escasamente calcárea. El horizonte de conglomerado sobreyace a un paquete de arena fina a media, ligeramente compactada, de color castaño a rojizo, en ocasiones ligeramente verdosas, con fragmentos subangulares a subredondeados de arenisca, lutita y jasperoide, así como granos subredondeados de cuarzo y feldespato. Su matriz es limo-arcillosa escasamente calcárea. Su espesor se desconoce ya que sus límites base-cima se encuentran en áreas muy distintas (Rodríguez-León, 2012).

Sobreyace en discordancia angular a las rocas marinas cretácicas y subyace a la toba Herradura, riolita Herradura, ignimbrita Guanamé y al basalto Cerritos de Bernal (Rodríguez-León, 2012).

Su edad está dada por su posición estratigráfica debajo de la ignimbrita Guanamé y de la riolita Herradura; la primera con 37.7 ± 1.6 Ma y la segunda con 30.2 ± 1.5 Ma por lo cual se le colocó en el Eoceno tardío–Oligoceno temprano (Rodríguez-León, 2012).

1.11.11 Riolita Panalillo (Trp)

Oligoceno Tardío

Descrita originalmente con el nombre de Ignimbrita Panalillo por Labarthe-Tristán (1978) dándole ese nombre por haberse definido y separado en otras unidades volcánicas en las cercanías del poblado de panalillo a unos 15 km al oriente de la ciudad de San Luis Potosí (Tristán-González, Aguillón-Robles, 1982).

Se trata de una roca ignimritica de color café de textura esferolítica con vesículas rellenas de feldespatos cuarzo y calcedonia en una matriz desvitrificada, esta unidad se halla formando extensas mesetas que se distinguen fácilmente de otras rocas volcánicas. En otros sitios se le pusieron distinguir tres miembros. Miembro inferior: toba depositada por aire a la que rellena principalmente pequeñas cuencas y fosas. Miembro medio: ignimbrita de color café con abundantes fragmentos aplanados de pómez en una matriz desvitrificada y fina. Miembro superior: Riolita esferulítica con matriz fina desvitrificada y con abundantes vesículas rellenas de cuarzo y calcedonia principalmente (Tristán-González, Aguillón-Robles, 1982).

Aflora hacia la parte centro-sureste y sureste del área. En el sector norte, la Riolita Panalillo conforma dos mesetas pequeñas al noreste de Salinas de Hidalgo; mientras en el meridional, forma la sobresaliente cuesta volcánica inclinada ligeramente hacia el sur. Está compuesta por ignimbritas y tobas líticas de composición riolítica de color gris con tonos morados que intemperizan a gris rojizo. Las ignimbritas

presentan fenocristales de cuarzo beta con corrosión magmática y de feldespatos en una matriz afanítica (Silva-Romo, 1993).

Sobreyace, en forma discordante, a la secuencia jurásica-cretácica, principalmente a las formaciones La Caja y Caracol (Silva-Romo, 1993).

De acuerdo con fechamientos realizados en la zona del norte del Campo Volcánico de San Luis Potosí, se le puede asignar la edad K-Ar de 25.4 ± 0.6 Ma con roca entera (Tristán-González, 2008).

1.11.13 Granito Peñón Blanco (Tgr)

Eoceno

Mujica-Mondragón y Jacobo-Albarrán (1983) definieron a las rocas que conforman El Cerro de Peñón blanco localizado aproximadamente a 20 km al norte de Villa Hidalgo Zacatecas como un plutón de forma regularmente elipsoidal localizado entre el arroyo Cueva del Padre y el Cañón de Jaras el cual consiste de un granito porfídico color crema ligeramente rosado (de muscovita) color crema, ligeramente rosado. Contiene fenocristales de cuarzo, mica blanca y feldespato potásico, englobados en un mosaico granular fino de feldespato. Contiene fenocristales de cuarzo, ortoclasa, andesina y escamas de sericita (Barajas-Nigoche, 2008).

Existe un cuerpo intrusivo de dimensión considerable hacia el centro de la Sierra de Salinas en todo el Cerro del Peñón Blanco, prominencia que se levanta hasta 2700 msnm (Labarthe-Hernández *et al*, 1982).

Las rocas que conforman estos apófisis,, están constituidos por cristales de cuarzo bipiramidales (de hasta 0.5 cm de longitud), ortoclasa (de hasta 1 cm de longitud), muscovita (de hasta 0.3 cm de longitud) así como agregados radiales de turmalina negra de hasta 3 cm de diámetro en una matriz equigranular fina. En ocasiones aparecen xenolitos provenientes de las rocas encajonantes. Los cuerpos intrusivos mayores como los apófisis, aparentemente se emplazaron en zonas de debilidad, estas zonas de debilidad son fallas del tipo normal y presentan dos sistemas de orientación preferenciales. El sistema relativamente más antiguo en el que se

emplazaron estos apófisis están en contacto a las rocas de la Formación Zacatecas con las Formaciones Zuloaga, Tamaulipas Superior, La Caja y Taraises. Existen, además, algunos emplazados en zonas de debilidad principalmente fallas del tipo normal con esta misma orientación (Barajas-Nigoche, 2008).

Los cuerpos intrusivos están emplazados en zonas de fallas normales y planos de estratificación en calizas (dique estratos). Los contactos se observan claramente y en ocasiones aparecen zonas recristalizadas de unos cuantos metros hasta decenas de metros en rocas principalmente calcáreas (Barajas-Nigoche, 2008). Silva-Romo (1993) señala que el magma muy probablemente se formó por fusión parcial de la corteza continental.

Existe únicamente un fechamiento para las rocas que afloran en el Cerro Peñón Blanco, realizado por Mujica-Mondragón y Jacobo-Albarrán (1983) en cristales de muscovita por el método K-Ar, determinando una edad de 45 ± 4 Ma (Eoceno; Barajas-Nigoche, 2008).

1.11.14 Sedimentos Continentales Terciarios

Silva-Romo (1993), denomina informalmente como conglomerados terciarios a los depósitos conglomeráticos continentales que cubren discordantemente a la secuencia triásica. También incluyen dentro de esta unidad a los conglomerados expuestos al sur de los Cerros Verde, La Ballena y San Antonio que se acumularon sobre un relieve labrado en las areniscas de la Formación Caracol; los conglomerados están formados por fragmentos de cuarzo blanco criptocristalino, caliza, pedernal, arenisca, granito y de ignimbrita en tamaños que varían entre 4 mm y 6 cm; cuya redondez varia de redondeados a subredondeados, estos clastos se encuentran en una matriz areno-limosa y con cementante calcáreo.

La unidad se encuentra cubriendo discordantemente a la secuencia mesozoica. Silva-Romo (1993) asignó una edad correspondiente al Terciario, posterior a la actividad magmática, en virtud de que incluye clásticos de granito y de ignimbrita.

1.11.15 Formación Las Joyas

Cuaternario (Pleistoceno-Reciente)

Unidad propuesta formalmente por Labarthe et al., (1982), de acuerdo a la descripción informal de Aranda y Labarthe (1977). Consiste en un conjunto de rocas piroclásticas y lávicas de composición basáltica y de carácter alcalino, agrupadas en dos miembros, piroclásticos y Basalto (Labarthe-Hernández y Aguillón-Robles, 1986). Sus principales afloramientos están en la porción norte-centro del acuífero y otros de menores dimensiones al noreste del mismo. La litología está compuesta por los dos miembros mencionados anteriormente; el miembro 1, piroclásticos: Consisten de una serie de rocas piroclásticas que van desde brechas a tobas de lapilli basálticas. Las brechas están en general mal clasificadas, como fragmentos de 5 cm a 1 cm, de basalto vesicular negro y escoria basáltica en una matriz de arena volcánica. Tiene muy aislados nódulos de Lherzolita y más frecuentes de rocas metamórficas como granulitas. Las tobas están bien clasificadas, estratificadas y gradadas y van de tamaño desde lapilli (4mm) a cenizas gruesas (1mm) (Labarthe-Hernández y Aguillón-Robles, 1986).

Miembro 2. Basalto: Los basaltos son de textura afanítica y contienen labradorita como mineral esencial y como minerales accesorios: Olivino, augita y magnetita en una matriz de microlitos de plagioclasas y vidrio básico algunos cristales de olivino se encuentran alterados a iddingsita. Los derrames presentan estructura vesicular. La unidad tiene un espesor aproximado de 70 m. Cubre discordantemente a las formaciones jurásicas y cretácicas. Aparece cubierta únicamente por depósitos continentales de talud, caliche y aluviales (Silva-Romo, 1993).

Aflora como conos cineríticos bien conservados y derrames lobulares y son más manifiestos hacia la porción central poniente del área. El basalto, es una roca de color negro, generalmente vesicular, de textura holocristalina, inequigranular, microporfirítica y pilotaxítica. Los fenocristales son de olivino alterados a iddingsita, en una matriz de microlitos de plagioclasa cálcica, con piroxenos rellenando los huecos entre ellas (Rodríguez-León, 2012).

Tiene una edad Pleistoceno-Reciente, ya que en las cercanías de su localidad tipo, sobreyace a conglomerados pleistocénicos que contienen restos fósiles de vertebrados que pueden corresponder a mamuts. Se tienen depósitos de rocas volcánicas, riolíticas, basálticas y andesíticas, las primeras están constituidas de riolitas, tobas riolíticas y brechas. En estudios anteriores se les ha correlacionado con la Riolita Panalillo (Labarthe *et al.*, 1982).

1.11.16 Aluvión (Q)

Cuaternario

El área de Peñón Blanco, (Labarthe-Hernández *et al.*,1982) la describieron como una extensa capa de material aluvial que varía desde unos cuantos centímetros hasta espesores de 100 m o más. De acuerdo a su distribución y situación lo clasificaron en tres tipos:

- Tipo uno: aquel material que cubre los lomeríos siendo generalmente de poco espesor que son el resultado de la desintegración de la roca cercana formando una delgada capa vegetal que puede variar de 10 a 50 cm.
- Tipo dos: aquellas gravas, arenas y limos que se acumulan en las desembocaduras de los arroyos formando pequeños abanicos aluviales cuyos espesores no pasan los 5 m.

- Tipo tres: aquellos que se extienden hacia los amplios valles rellenando cuencas o fosas profundas como los que se encuentran bajo las lagunas del Valle de Salinas formados por capas de gravas arenas y limos interrumpidos por horizontes de suelo residual muy compactado de color café rojizo. Sus espesores pueden ser mayores de 100 m según reportes obtenidos por las perforaciones de pozos para agua potable realizados en el valle.

Al poniente de la sierra se encuentra una franja de abanicos aluviales coalescentes y más alejados de ella, los depósitos lacustres del Sistema Chapala-Salinas-El Salitre, en tanto que hacia el oriente de la sierra se observa una planicie diluvial bordeada por depósitos de talud. Por lo general, los valles fluviales presentan una generación de terrazas fluviales, mientras el Cerro Peñón Blanco está bordeado por algunos depósitos de talud (Silva-Romo, 1993).

En los bordes de las laderas del Arroyo de Comanja, se encontró un conglomerado polimíctico de aproximadamente 1 m de espesor, compuesto por fragmentos principalmente calcáreos y arenosos provenientes de las formaciones expuestas en los cerros adyacentes, se pudo observar que los fragmentos arenosos provenían de la Formación Caracol y los fragmentos calcáreos de las otras formaciones mesozoicas. Estos depósitos conforman un pequeño abanico aluvial (Barajas-Nigoche, 2008).

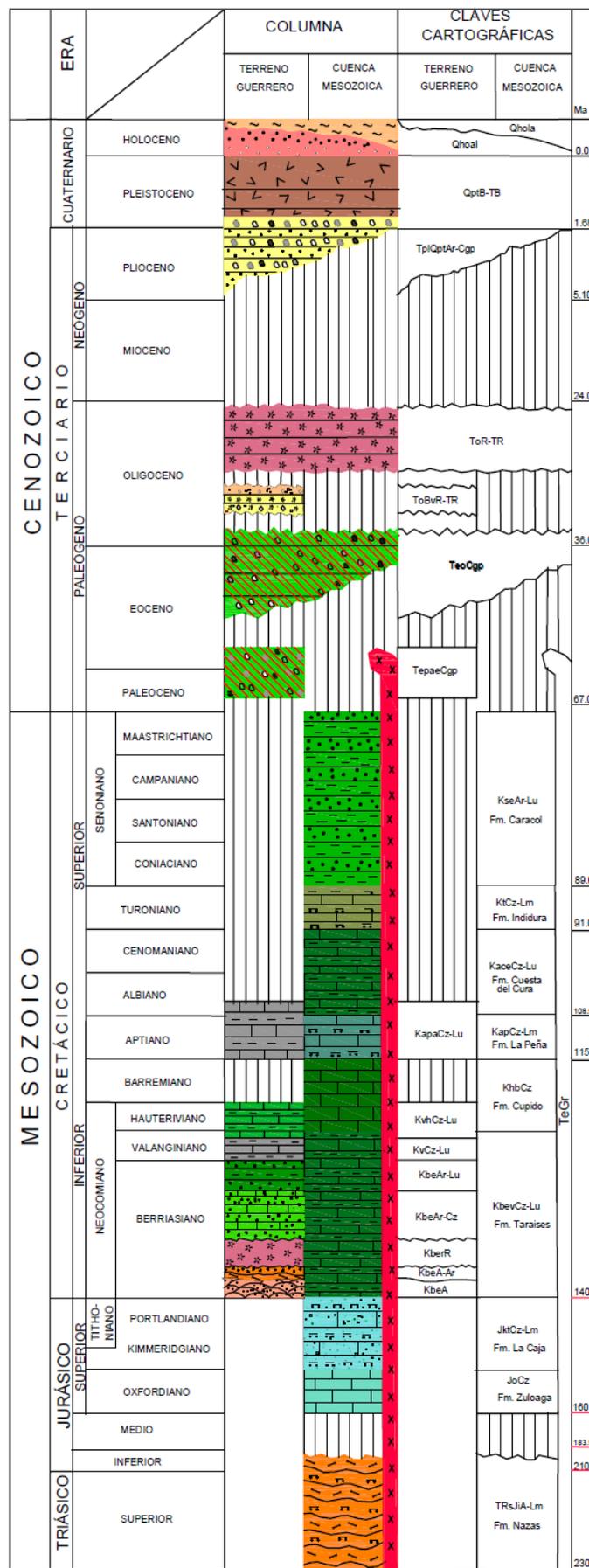


Figura.3. Columna estratigráfica de la geología del acuífero de Salinas de Hidalgo
(Digitalizada del Servicio Geológico Mexicano, 2007)

1.12 Aspectos Particulares del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo

El acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo con clave 2403 está delimitado por los vértices que se muestran en la Tabla 1.

Tabla.1. Ubicación de vértices del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo

Acuífero Administrativo de Salinas de Hidalgo (2403)		
Vértice	Longitud Oeste	Latitud Este
1	244289.20	2517551.80
2	226335.40	2490603.90
3	201952.70	2507682.10
4	206264.70	2517906.20
5	211375.60	2516367.60
6	216532.60	2517268.10
7	219729.90	2523414.90
8	229111.00	2530890.80

Datum: UTM WGS 84

1.13 Área del suelo y vegetación

El acuífero está constituido por los tipos predominantes de vegetación: matorral, uso agrícola, nopalera y pecuario, los cuales están distribuidos en grandes extensiones en el acuífero (Figura 4). Para el caso de los suelos, está constituido por 8 tipos (Figura 5); cambisol castañozem, fluvisol, litosol, phaeozem, regosol, solonetz y xerosol y los cuales se describen a continuación (INEGI, 2004).

Cambisol: Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. También pertenecen a esta unidad algunos suelos muy delgados que están colocados directamente encima de un tepetate (INEGI, 2004).

Castañozem: Suelos alcalinos que en condiciones naturales tienen vegetación de pastizal, con algunas áreas de matorral. Frecuentemente tienen más 70 cm de profundidad y se caracterizan por presentar una capa superior de color pardo o rojizo oscuro, rica en materia orgánica y nutriente, con acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo y son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2004).

Fluvisol: Se caracterizan por estar formados de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta. Los fluvisoles presentan capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas, como efecto de la corriente y crecidas del agua en los ríos (INEGI, 2004).

Litosol: Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales. Su principal vegetación son los matorrales pastizales utilizados principalmente en la agricultura (INEGI, 2004).

Phaeozem: Suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental, se forman sobre material no consolidado. Se encuentran en climas templados y húmedos con vegetación natural de pastos altos o bosques. Son suelos oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que son muy utilizados en agricultura de temporal (IUSS, 2007).

Regosol: Suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad (INEGI, 2004).

Solonetz: Suelos con altas concentraciones de sales. Se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso con terrones duros en formas de columnas o prismas debido al alto contenido de sales de sodio. Su vegetación natural es muy escasa y cuando existe es de pastizal o matorral. No tienen uso agrícola (INEGI, 2004).

Xerosol: Suelo seco Su vegetación natural es de matorral y pastizal. Tienen por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica. Debajo de esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial. Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza (INEGI, 2004).



Vegetación y uso de suelo en el acuífero administrativo Salinas de Hidalgo, S.L.P.

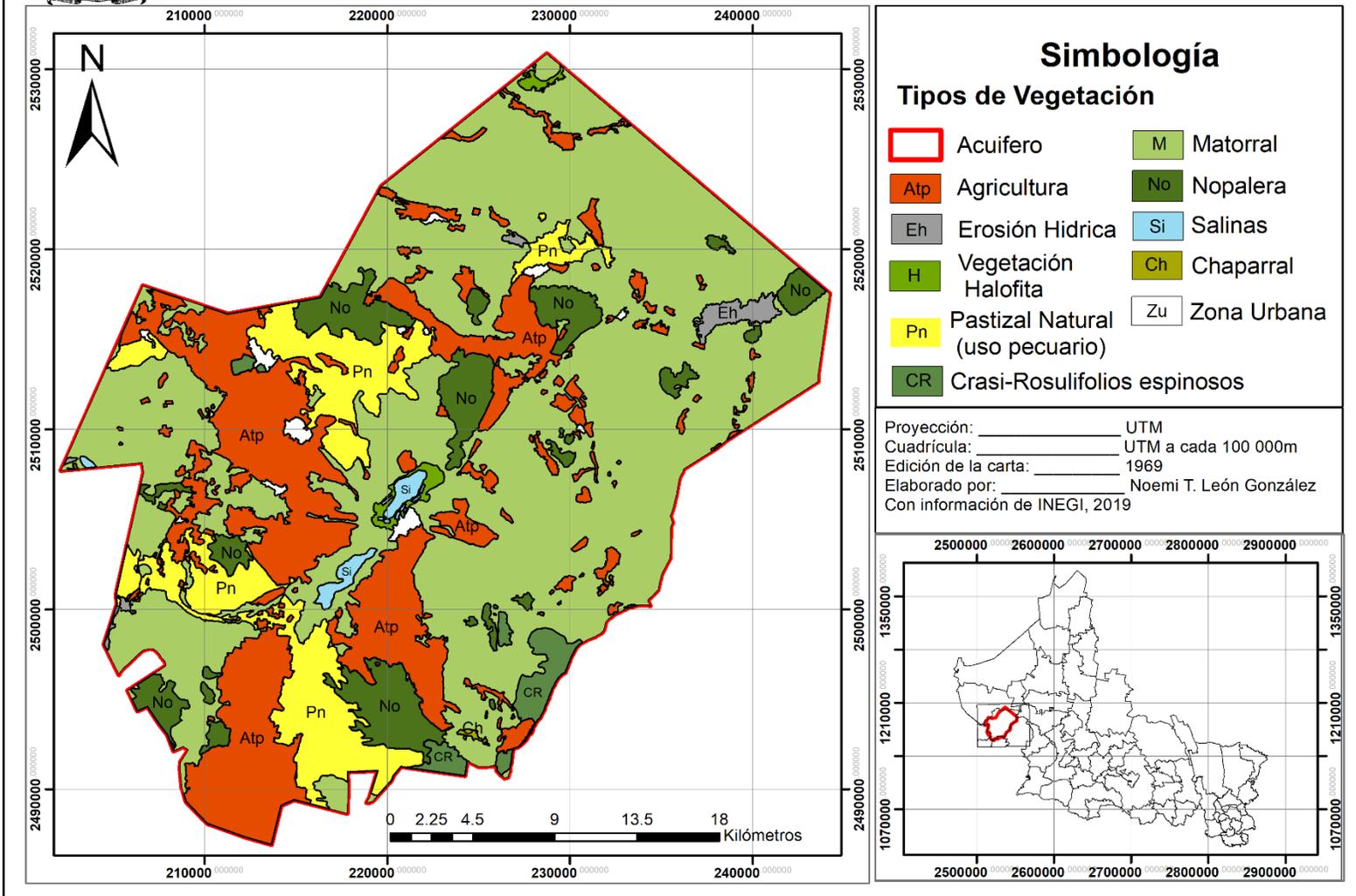


Figura 4. Vegetación y uso de suelo del acuífero de Salinas de Hidalgo



Uso de Suelos acuífero administrativo Salinas de Hidalgo, S.L.P.

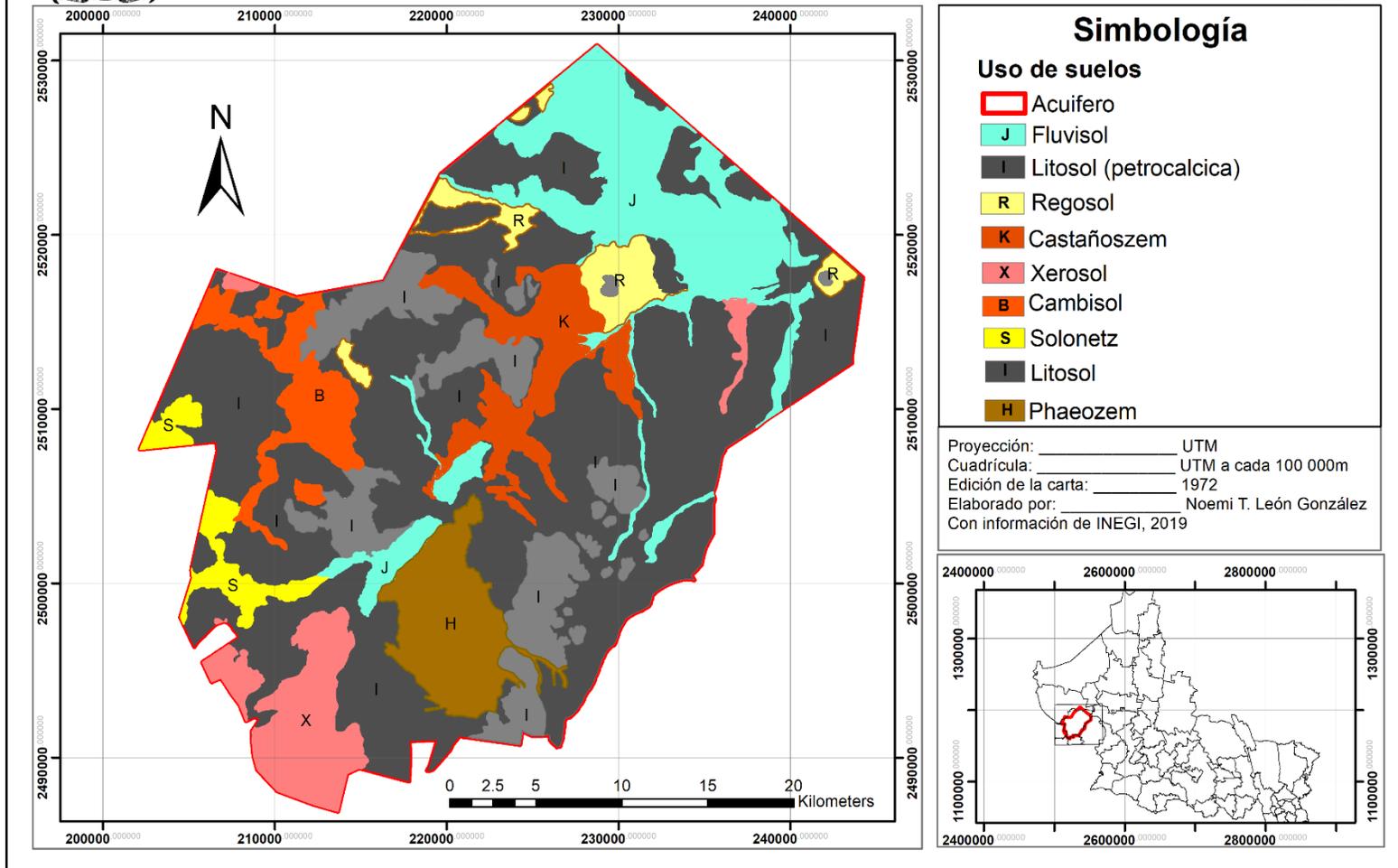


Figura 5. Tipos de suelos en el acuífero de Salinas de Hidalgo

1.14 Calidad del agua

Se realizó un muestreo de calidad de agua a 35 pozos y norias ubicados estratégicamente para cubrir la mayor parte del área del acuífero y los cuales fueron analizados en el Laboratorio de análisis de agua y suelo de Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería a través del estudio de elementos mayores, elementos traza, alcalinidad, pH, entre otros.

Con dichos análisis se pudieron determinar 9 familias de agua por ion dominante, siendo la familia Mixta-Mixta la cual se presenta en más pozos y norias, seguida por la familia Bicarbonatada-Sódica y posteriormente la familia Mixta-Sódica (Figura 6).

En general, la calidad del agua detectada en Salinas de Hidalgo se analizó con base en la NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

Sin embargo, en el análisis resultaron algunos elementos de importancia que no cumplen con los límites máximos permisibles estipulados por la NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano, los cuales se describen a continuación:

Hierro (Fe): es el elemento que presenta más pozos y norias en las cuales sobrepasan el límite máximo permisible para uso y consumo humano el cual para Fe es de 0.3 mg/L y de un total de 35 unidades, 26 sobrepasan (Figura 7). La presencia de este elemento en la mayoría de los pozos y norias puede deberse a que el acuífero está compuesto principalmente por rocas vulcanosedimentarias y sedimentarias y estas en su mayoría contienen hierro en diversos grados. Puede inferirse también la presencia de este elemento a algunas vetas y depósitos minerales de óxidos presentes en diferentes zonas del acuífero.

Fluoruros (F⁻): es otro elemento que presenta un número importante de pozos y norias en las cuales sobrepasan el límite máximo permisible para uso y consumo humano que para F⁻ es de 1.5 mg/L y de un total de 35 unidades, 15 sobrepasan y se encuentran distribuidos principalmente en la parte Noreste y Noroeste del

acuífero (Figura 8). La presencia de fluoruro se infiere que se debe por una parte al área mineralizada Sierra de Salinas la cual tiene manifestaciones de mineralización de fluorita en depósitos hidrotermales, de tipo epitermal (SGM, 2017), y, por otro lado, puede deberse a la presencia de algunas vetas de riolita ya que en algunas zonas del acuífero está presente en abundantes cantidades, así como también, existe la presencia de algunas vetas y depósitos minerales de fluorita en la zona sur del acuífero. En dichos casos los minerales y rocas están posiblemente asociados a la presencia de fluoruros en el agua subterránea y el cual también puede generar algunos daños en la salud de las personas.

Arsénico (As): El arsénico es un elemento muy tóxico para el organismo humano. Y no solo en concentraciones altas, donde la exposición causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales, también la exposición durante un largo período a bajas concentraciones relativas de arsénico (por ejemplo, por ingestión de agua) tiene efectos negativos crónicos para la salud. Por eso, el arsénico en las aguas superficiales y subterráneas susceptibles de ser utilizadas para consumo, constituye una gran amenaza para la salud (Lillo, 2008). Este elemento presenta un importante número de pozos y norias las cuales sobrepasan el límite máximo permisible para uso y consumo humano el cual para As es 0.025 ppm y de un total de 35 unidades 13 sobrepasan el límite (Figura 9). La presencia de este elemento en los pozos y norias se debe, posiblemente a que se encuentran 3 zonas mineralizadas importantes denominadas, San Nicolás- El Salvador, El Guadalupito y Sierra de Salinas y las cuales contienen depósitos relacionados con arsénico (SGM, 2007).

En la zona mineralizada San Nicolás – El Salvador se logró la evaluación de un depósito volcánogénico, donde los principales minerales extraídos fueron Plata, Oro y Cobre, los cuales están asociados posiblemente con el arsénico. Dicha zona se encuentra fuera del acuífero, pero muy cercana a la frontera Oeste y es una zona muy extensa por lo que se puede inferir que el agua subterránea que llega hasta el acuífero pase por algunas vetas mineralizadas (SGM,2007).

La zona mineralizada denominada El Guadalupito presenta un marco geológico parecido al de la zona San Nicolás El Salvador, con afloramientos de la secuencia

vulcanosedimentaria donde se tiene la presencia de algunos prospectos y manifestaciones de mineral que podrían ser de interés en la exploración de sulfuros masivos los cuales también posiblemente estén relacionados con la presencia de arsénico en el agua (SGM, 2007).

Finalmente, el área mineralizada de Sierra de Salinas, se tienen manifestaciones de mineralización con valores de plata y oro lo cuales se tratan de depósitos hidrotermales de tipo epitermal, relacionados también posiblemente con presencia de arsénico (SGM, 2007).

El arsénico como ya se mencionó anteriormente, es un elemento tóxico para el organismo, por lo tanto, es un foco de atención para el estudio de esta zona, ya que de los 13 pozos y norias que sobrepasan el límite máximo permisible para consumo humano, 5 unidades se utilizan para uso y consumo humano. Por lo tanto, se puede inferir que el flujo del agua que se encuentra en el acuífero se transporta por donde hay una alta mineralización.

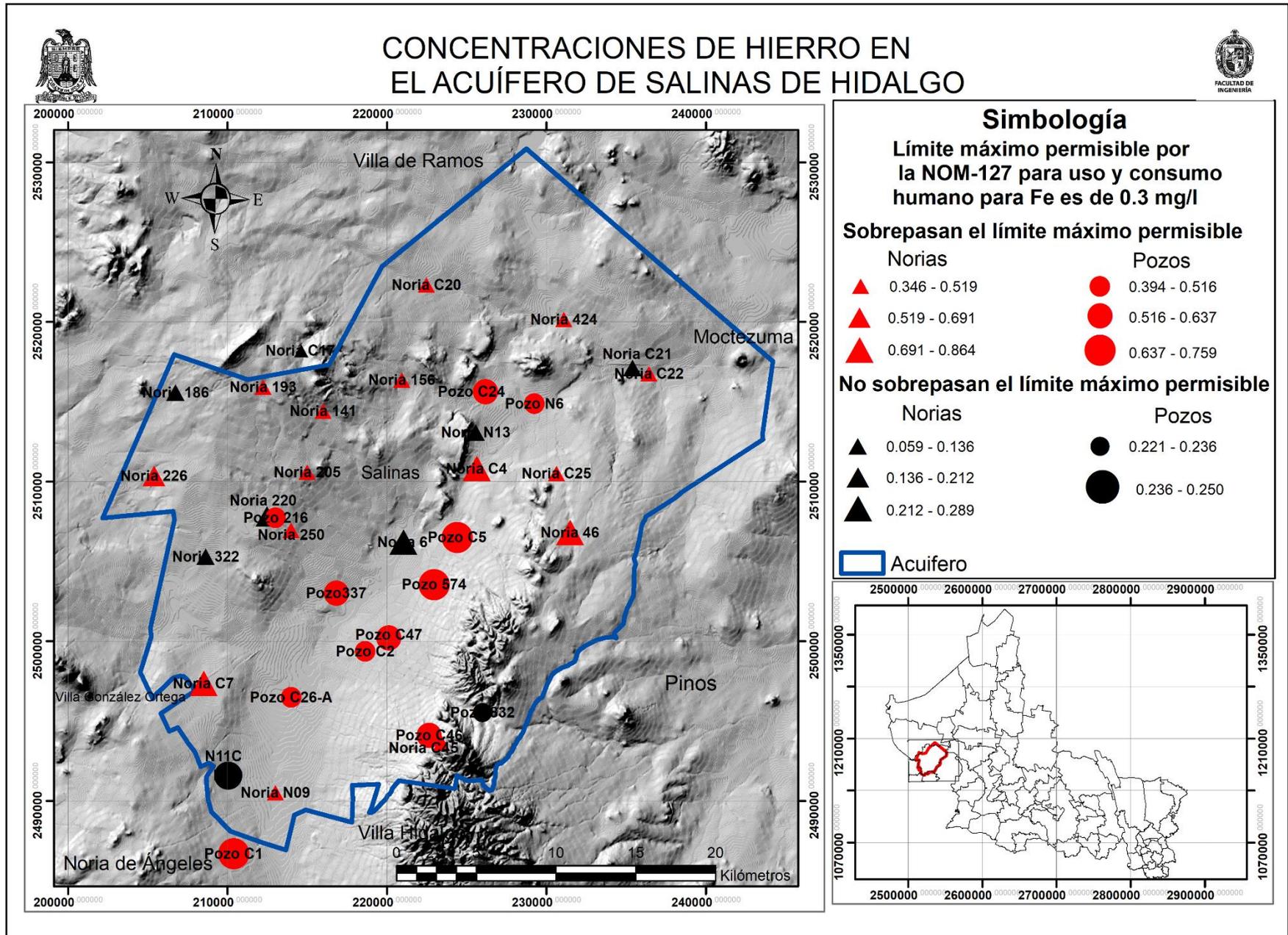


Figura 7. Mapa de concentraciones de hierro en el Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.

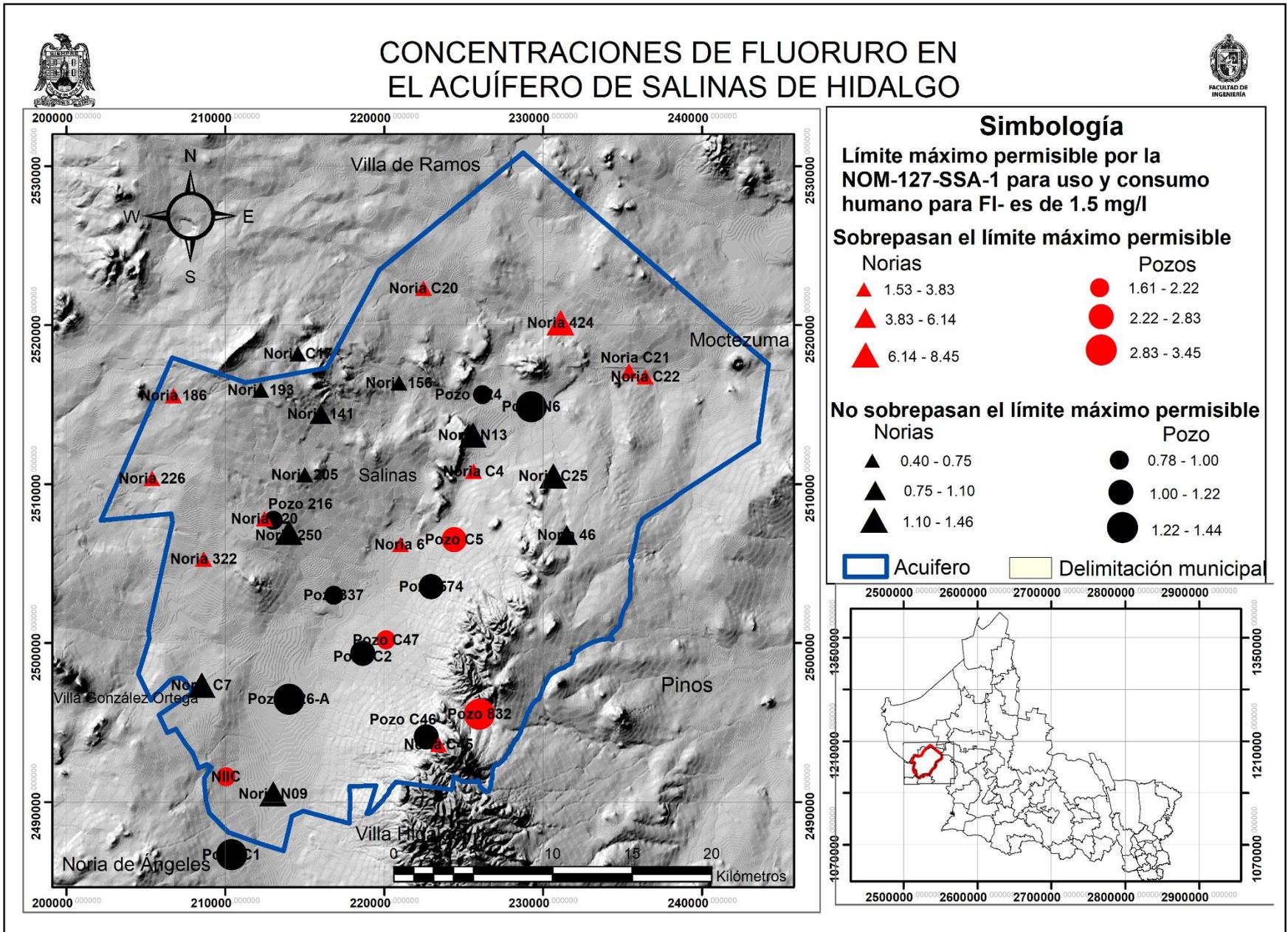


Figura 8. Mapa de concentraciones de fluoruro en el Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.



CONCENTRACIONES DE ARSENICO EN EL ACUÍFERO DE SALINAS DE HIDALGO

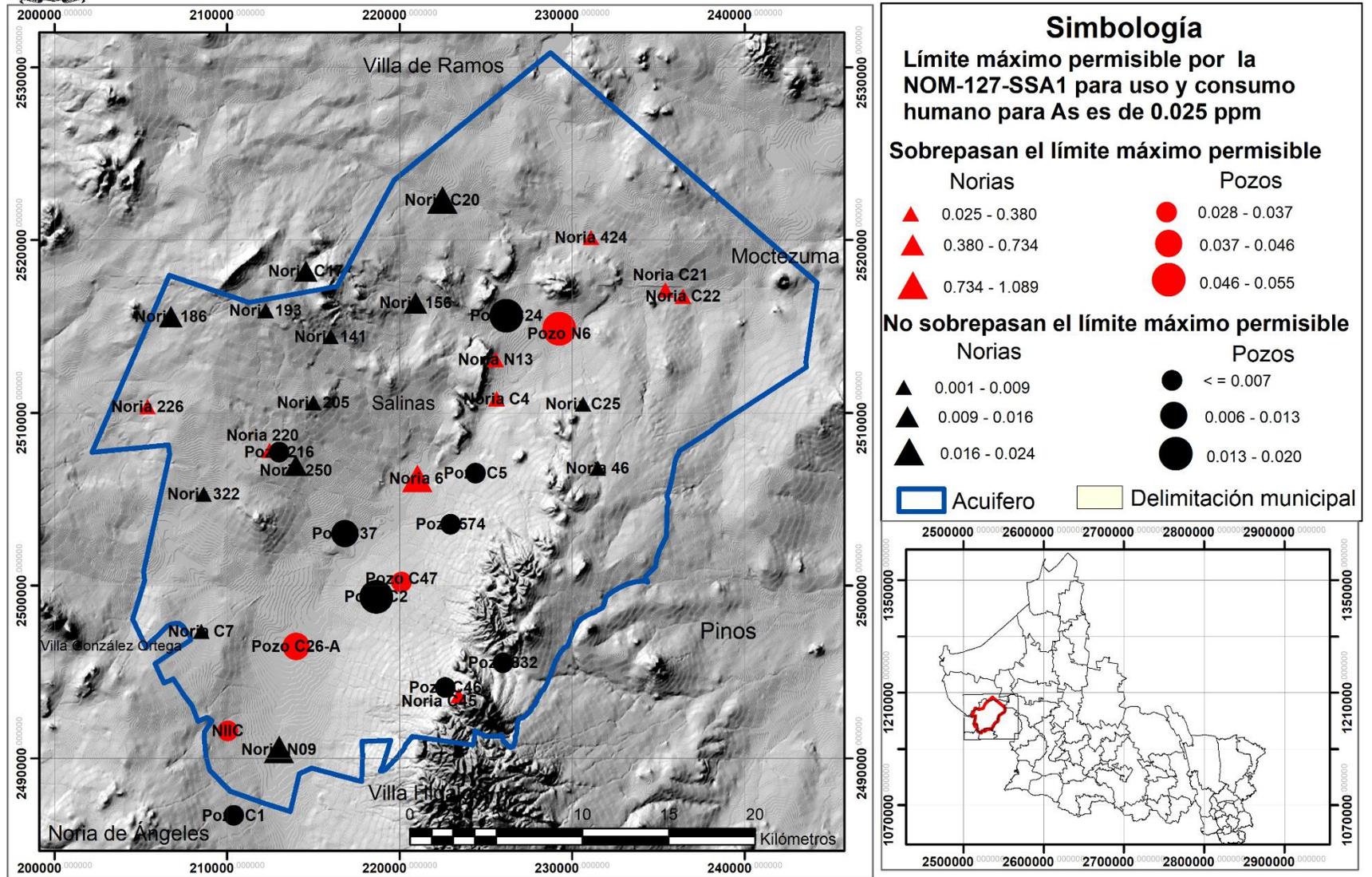


Figura 9. Mapa de concentraciones de arsénico en el Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.

2. Balances hídricos históricos superficiales y subterráneos

2.1 Precipitación media anual

Para la estimación de la precipitación media anual se utilizó el método de Isoyetas, en la Tabla 2 se muestra el resultado de cada año (1985-2015), utilizando la información de 16 estaciones meteorológicas correspondientes a los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, cuyos datos se obtuvieron de CONAGUA (2015) (Figura 10). En la Tabla 3 se presenta la información correspondiente de las estaciones que fueron consideradas para el estudio.

Tabla 2. Precipitación media anual por el método de Isoyetas del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.

ISOYETAS	
Año	Precipitación promedio anual
1985	415
1986	325
1987	383
1988	397
1989	247
1990	566
1991	422
1992	532
1993	250
1994	410
1995	364
1996	222
1997	345
1998	259
1999	163
2000	150
2001	272
2002	500
2003	363

ISOYETAS	
Año	Precipitación promedio anual
2004	452
2005	278
2006	360
2007	463
2008	373
2009	340
2010	293
2011	174
2012	325
2013	611
2014	419
2015	575

Tabla 3. Estaciones Climatológicas en el acuífero de Salinas de Hidalgo.

Estaciones Meteorológicas			
Estación	Clave	Longitud Oeste	Latitud Norte
El Estribo	24019	237880.4	2556178.2
El Grito	24021	281211	2508402
El Rusio	32015	213264.5	2484500.2
Espíritu Santo	32187	221742.6	2502322.1
Guadalupe Victoria	32024	208419.4	2479480.6
Guaname	24150	269237.4	2528917.9
La Herradura	24161	218161.2	2549421.7
La Reforma	24073	228189.6	2519016.7
Peñón Blanco	24055	212812.1	2489343
Pinos	32068	234183.5	2466274.1
Salinas de Hidalgo	24148	220758.9	2504988.5
San Juan de Tuzal	24176	260091.7	2561843.7
Vallejo	24048	239263.1	2558458.9
Villa de Ramos	24059	201063.6	2527861.3
Villa González Ortega	32144	205326.4	2492900.5
Villa Hidalgo	32061	222056.1	2473719.6

DATUM, WGS 84

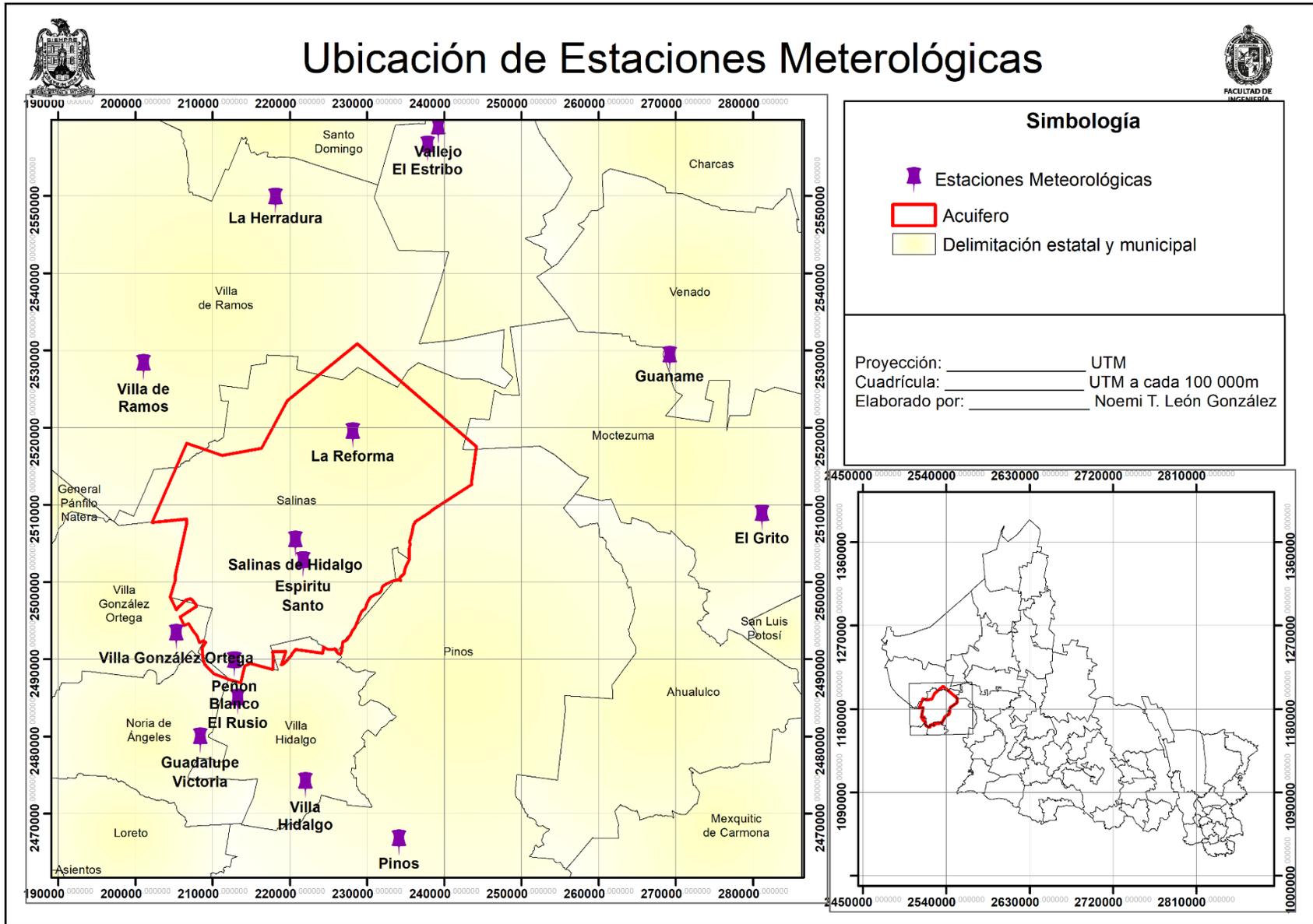


Figura 10. Ubicación de Estaciones Meteorológicas.

2.2 Temperatura media anual

La temperatura fue obtenida con los resultados de la temperatura promedio mensual de cada una de las estaciones climatológicas proporcionadas por CONAGUA. Las estaciones que presentaban datos incompletos en algunos de los meses, se completaron con el promedio de las 3 estaciones más cercanas, completando así los datos. En la Tabla 4 se muestran los datos de la Temperatura media anual de los años 1985-2015.

2.3 Coeficiente de escurrimiento

Para determinar el coeficiente de escurrimiento, se realizó una clasificación hidrológica de los tipos de suelo según su permeabilidad, obteniendo así, el número de escurrimiento "N", el cual pertenece al tipo hidrológico de suelo. Posteriormente, se obtuvo una ponderación con los porcentajes de las áreas de los diferentes tipos de suelo para así, asignar un número hidrológico correspondiente al número de curva según la cobertura que depende del uso del suelo y vegetación con el que finalmente se obtuvo un "N" total resultante de la sumatoria de todos los valores de N ponderados con el porcentaje de área (Tabla 5).

Tabla 4. Temperatura media anual en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.

Año	Villa de Ramos	La Herradura	El Estribo	Vallejo	San Juan del Tuzal	Guaname	La Reforma	Salinas	El Grito	Peñon Blanco	Gpe Victoria Zac	Espiritu Santo	Pinos	Villa Glez	Villa Hidalgo	El Saladillo	TEMP.MEDIA ANUAL
1985	15.43	17.1	19.34	19.02	15.5	15.95	15.80	16.92	15.70	17.70	17.08	17.04	17.23	16.53	17.58	16.27	16.89
1986	15.64	16.6	19.79	18.48	16.0	17.64	15.72	17.18	16.90	17.62	16.60	17.32	16.86	16.70	17.15	16.48	17.04
1987	14.72	16.2	19.26	18.53	14.1	17.43	15.28	16.68	17.19	16.83	16.17	18.60	18.23	16.58	16.92	15.54	16.77
1988	14.95	16.2	22.43	18.62	14.3	16.29	15.84	16.60	16.71	16.37	16.21	17.35	16.33	16.24	17.70	15.44	16.72
1989	14.26	16.5	18.64	19.23	14.6	15.56	15.99	16.90	16.66	16.77	16.49	17.46	16.66	16.70	16.71	15.91	16.56
1990	14.56	16.7	17.18	19.38	14.5	15.18	16.28	17.28	16.22	16.43	16.68	16.19	15.53	16.32	15.80	16.06	16.27
1991	13.82	16.7	17.73	19.69	12.7	13.97	15.33	17.57	15.65	17.83	16.70	17.10	15.05	16.35	15.10	15.88	16.07
1992	14.28	16.8	17.42	20.79	15.1	16.98	16.16	18.44	16.12	17.14	16.83	15.21	14.79	15.41	14.35	16.04	16.37
1993	15.78	17.2	16.70	21.03	14.9	18.22	17.07	16.79	16.97	18.06	17.23	15.40	14.84	16.45	15.13	16.26	16.75
1994	16.00	18.3	15.53	22.09	15.4	18.89	17.85	16.79	17.70	18.80	18.30	16.35	15.66	17.06	15.35	16.57	17.29
1995	17.56	17.8	15.98	20.82	14.7	17.54	17.53	16.56	17.55	18.73	17.81	17.52	15.79	16.70	15.14	16.89	17.16
1996	17.10	17.9	16.12	20.61	14.5	17.28	17.03	15.94	16.71	18.34	17.90	15.83	15.13	15.79	12.68	16.25	16.57
1997	17.17	18.3	16.80	20.21	14.7	14.97	16.66	15.98	15.59	17.60	18.33	15.33	14.60	16.07	14.30	16.32	16.43
1998	22.55	20.0	22.47	21.21	15.5	19.52	16.22	16.21	17.31	17.64	19.99	17.00	15.56	16.97	16.17	18.95	18.33
1999	22.82	18.8	16.29	17.78	15.5	16.68	16.01	15.45	16.08	16.58	18.75	15.54	15.36	21.23	15.38	19.83	17.37
2000	22.55	18.9	16.26	21.31	24.8	17.40	17.16	16.31	17.54	15.23	18.86	15.79	15.83	19.64	15.70	25.60	18.67
2001	21.23	18.1	15.91	21.06	27.4	17.66	17.49	16.48	18.81	15.81	18.08	15.88	18.87	17.01	16.33	15.43	18.22
2002	20.73	16.0	16.22	20.16	28.0	17.73	16.46	15.18	16.76	17.22	16.04	16.08	18.72	16.09	15.48	15.29	17.64
2003	20.06	17.4	15.67	20.55	27.9	16.80	16.19	15.97	17.41	16.44	17.39	15.46	18.48	15.73	15.48	15.87	17.67
2004	19.73	16.4	16.79	20.30	28.7	17.50	17.05	15.54	17.64	16.19	16.40	15.75	19.49	14.99	15.41	14.92	17.68
2005	20.42	16.1	16.55	21.21	16.9	17.23	16.77	16.67	17.79	15.43	16.14	16.27	16.32	15.98	15.48	15.55	16.93
2006	20.12	15.0	19.47	17.28	16.7	16.68	16.52	16.21	17.03	14.56	15.04	15.67	16.08	16.26	15.36	15.47	16.47
2007	18.82	14.7	17.76	18.24	17.4	16.58	16.25	16.23	15.52	18.38	14.72	15.71	15.71	16.81	15.13	15.51	16.47
2008	19.60	14.2	19.41	17.95	17.0	15.69	15.60	15.57	15.75	19.42	14.18	15.85	15.54	15.99	14.81	15.38	16.37
2009	18.99	14.6		17.60	17.5	17.33	16.62	17.40	14.12	20.08	14.56	16.75	16.06	16.44	15.89	15.93	16.65
2010	18.12	14.5		16.49	16.3	15.22	16.07	15.33	13.32	19.48	14.50	15.17	15.48	15.41	14.80	15.01	15.68
2011	18.02	14.3		16.84	16.8	16.28	16.93	16.58	14.29	19.33	14.27	15.96	16.59	16.72	15.70	15.99	16.31
2012	18.33	13.0		16.78	16.6	17.61	16.76	16.22	13.65	17.77	13.01	16.21	15.43	16.67	15.49	15.88	15.96
2013	17.12	12.8		16.55	16.3	17.56	16.83	16.91	13.92	17.72	12.78	15.21	15.52	15.91	15.19	15.84	15.74
2014	16.53	13.9		16.23	17.0	14.94	16.43	17.43	13.59	17.26	13.88	15.17	15.20	15.83	15.08	15.45	15.60
2015	16.18	13.3		16.25	22.6	17.04	16.53	18.03	14.53	18.64	13.25	16.04	15.14	16.29	15.01	16.01	16.32

Tabla 5. Determinación del coeficiente de escurrimiento.

SUELO	AREA (m2)	N	Porcentaje de área /100 (A)	A*N	Suma (A*N)
FLUVISOL	Area	A			
Agricultura	13306862.0832	67	0.01308	0.8763	58
Eh_erosion	2858479.88960	68	0.00281	0.1910	
Halofita	6174461.1710	49	0.00607	0.2974	
Nopalera	1351295.0994	39	0.00133	0.0518	
Matorral	97107474.16180	34	0.09544	3.2450	
Pecuario	5235507.3961	49	0.00515	0.2521	
Zona urbana	273971.2578	77	0.00027	0.0207	
Cuerpos agua	7496589.3043	100	0.00737	0.7368	
CAMBISOL	Area	D			
Agrícola	4344074.8541	86	0.00427	0.3672	
Nopalera	43305.52865	84	0.00004	0.0036	
Matorral	2704526.0036	78	0.00266	0.2073	
Pecuario	1130771.152	84	0.00111	0.0934	
Zona Urbana	1039974.523	92	0.00102	0.0940	
CASTAÑOZEM	Area	C			
Agrícola	28143406.1507	83	0.02766	2.2958	
Halofita	548388.4734	79	0.00054	0.0426	
Nopalera	4813358.0805	74	0.00473	0.3501	
Matorral	20464960.7864	71	0.02011	1.4281	
Pecuario	223757.4628	79	0.00022	0.0174	
Zona urbana	10398.40145	90	0.00001	0.0009	
LITOSOL	Area	B			
Agrícola	29317969.3668	76	0.02881	2.1899	
Chaparral	511392.8271	48	0.00050	0.0241	
Erosion hidr�ca	2453179.2886	79	0.00241	0.1905	
Halofita	1407050.4590	69	0.00138	0.0954	
Nopalera	37053783.5492	61	0.03642	2.2215	

SUELO	AREA (m2)	N	Porcentaje de área /100 (A)	A*N	Suma (A*N)
Matorral	425843602.6619	58	0.41853	24.2748	
Pecuario	93377440.9660	69	0.09177	6.3324	
Zona Urbana	4782435.2409	85	0.00470	0.3995	
Cuerpos de agua	191415.4928	100	0.00019	0.0188	
PHAEOZEM	Area	C			
Agrícola	31645317.3140	83	0.03110	2.5815	
Nopalera	16010585.5078	74	0.01574	1.1644	
Matorral	6834582.9503	71	0.00672	0.4769	
Pecuario	1179070.4573	79	0.00116	0.0915	
Zona urbana	459055.2060	90	0.00045	0.0406	
Cuerpo agua	35014.0461	100	0.00003	0.0034	
REGOSOL	Area	B			
Agrícola	2361936.9516	76	0.00232	0.1764	
Nopalera	11783032.6835	61	0.01158	0.7064	
Matorral	23900104.2937	58	0.02349	1.3624	
Pecuario	392588.31370	69	0.00039	0.0266	
Zona Urbana	549180.6207	85	0.00054	0.0459	
SOLONETS	Area	D			
Agricultura	436024.2540	86	0.00043	0.0369	
Erosion hidrica	1214187.5175	89	0.00119	0.1062	
Nopalera	77073.21683	84	0.00008	0.0064	
Matorral	15882515.0735	78	0.01561	1.2176	
Pecuario	2633328.3571	84	0.00259	0.2174	
XEROSOL	Area	B			
Agricultura	40520893.8507	76	0.03983	3.0267	
Erosion hidrica	903273.7102	79	0.00089	0.0701	
Nopalera	7122518.0100	61	0.00700	0.4270	
Matorral	5149499.3428	58	0.00506	0.2935	

Posteriormente, se calculó la Precipitación efectiva, la cual corresponde a la parte de la precipitación que escurre de manera superficial, obteniéndose con la siguiente formula: (Tabla 6).

$$Pe = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32}$$

Donde

P = Precipitación (en cm).

N= N° de escurrimiento

2.4 Evapotranspiración real anual

La estimación de la evapotranspiración real anual fue obtenida por medio del Método de Turc, dicho método contempla la precipitación total anual y la temperatura media anual:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

Donde:

$$L = 300 + 25 T + T^3$$

Estando P en milímetros y T en °C.

La condición teórica de esta fórmula es que para $P < 0.31 * L$, daría una ETR mayor que la precipitación, por lo tanto, en tales casos habrá que considerar a $ETR = P$.

En la Tabla 7 se presentan las estimaciones anuales de la evapotranspiración real correspondiente y, en el cual se muestra que 9 años no cumplen con la condición teórica, por lo tanto, su evapotranspiración es igual a su precipitación total anual.

Tabla 6. Calculo de valor de N.

Año	P (cm)	N	Pe	Ce
		58		
1985	41.52		25.46	0.61
1986	32.49		17.59	0.54
1987	38.30		22.61	0.59
1988	39.73		23.87	0.60
1989	24.72		11.23	0.45
1990	56.59		39.26	0.69
1991	42.21		26.08	0.62
1992	53.25		36.16	0.68
1993	25.03		11.47	0.46
1994	40.95		24.96	0.61
1995	36.38		20.93	0.58
1996	22.19		9.29	0.42
1997	34.50		19.30	0.56
1998	25.93		12.18	0.47
1999	16.28		5.12	0.31
2000	15.00		4.31	0.29
2001	27.21		13.21	0.49
2002	50.02		33.17	0.66
2003	36.29		20.85	0.57
2004	45.20		28.77	0.64
2005	27.85		13.73	0.49
2006	35.99		20.59	0.57
2007	46.28		29.75	0.64
2008	37.35		21.78	0.58
2009	34.02		18.89	0.56
2010	29.31		14.92	0.51
2011	17.44		5.89	0.34
2012	32.46		17.56	0.54
2013	61.08		43.47	0.71
2014	41.88		25.79	0.62
2015	57.51		40.12	0.70

Tabla 7. Resultados de evapotranspiración real anual.

Año	Precip. Media anual (mm/año)	Temp. Media anual	L (t)	ETR	0.31*L	ETR = P
1985	415	16.89	962.94	398.42	298.51	
1986	325	17.04	973.25	323.03	301.71	
1987	383	16.77	954.82	371.73	295.99	
1988	397	16.72	951.83	383.31	295.07	
1989	247	16.56	941.36	251.16	291.82	247
1990	566	16.27	921.90	500.81	285.79	
1991	422	16.07	909.49	399.65	281.94	
1992	532	16.37	928.36	480.31	287.79	
1993	250	16.75	953.64	254.28	295.63	250
1994	410	17.29	990.60	395.75	307.09	
1995	364	17.16	981.80	357.19	304.36	
1996	222	16.57	941.72	227.05	291.93	222
1997	345	16.43	932.81	338.78	289.17	
1998	259	18.33	1066.05	264.80	330.48	259
1999	163	17.37	996.59	169.13	308.94	163
2000	150	18.67	1092.47	156.46	338.66	150
2001	272	18.22	1057.80	276.82	327.92	272
2002	500	17.64	1015.12	467.91	314.69	
2003	363	17.67	1017.83	358.10	315.53	
2004	452	17.68	1018.18	431.53	315.64	
2005	278	16.93	965.72	280.85	299.37	278
2006	360	16.47	934.97	351.53	289.84	
2007	463	16.47	934.93	432.47	289.83	
2008	373	16.37	928.55	362.45	287.85	
2009	340	16.65	947.18	335.40	293.63	
2010	293	15.68	884.53	291.63	274.20	
2011	174	16.31	924.50	180.30	286.59	174
2012	325	15.96	902.17	319.88	279.67	
2013	611	15.74	888.72	521.41	275.50	
2014	419	15.60	879.53	394.55	272.65	
2015	575	16.32	925.36	507.08	286.86	

2.5 Infiltración

Debido a la geología presente en el acuífero, se infiere que es una zona donde hay muy poca infiltración, ya que los medios geológicos de las capas superficiales son impermeables y el agua no logra llegar al nivel freático, por lo cual, la cantidad de agua que se infiltra no logra constituir una recarga.

Para la estimación de la infiltración se aplicó la ecuación de balance superficial:

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} - \text{Esguerrimiento}$$

En este caso, se determina que los esguerrimientos están implícitos dentro de la evapotranspiración, debido a que, en su topografía, llegan a estar presentes, pero no tienen continuidad y desaparecen en el valle; por lo cual se infiere que existe esguerrimiento intermitente momentáneo y posteriormente se evapora, aunado a lo mencionado anteriormente acerca de la infiltración y recarga.

Por lo tanto:

$$\text{Infiltración (m}^3\text{/año)} = 585.04 \text{ Mm}^3\text{/año} - 515.93 \text{ Mm}^3\text{/año}$$

$$\text{Infiltración} = 69.11 \text{ Mm}^3\text{/año}$$

2.6 Pozos de observación

Los pozos de observación son estructuras de aprovechamiento o experimentales en las que se puede medir la profundidad al nivel del agua, entre otros parámetros (Ortiz, 1996).

Teórica y prácticamente deberían utilizarse como pozos de observación, todos aquellos en los que se han hecho mediciones en campo periódicamente. Desafortunadamente, para este estudio, no se logró clasificar dicha información; esto quiere decir, que se cuenta con mediciones de niveles en diferentes años, pero es difícil identificar algunos aprovechamientos debido a que uno mismo puede tener

diferentes claves y/o coordenadas en distintos estudios, lo cual crea gran incertidumbre con respecto a las mediciones.

Como consecuencia de lo antes mencionado, se utilizó la base de datos generada en la obtención de los niveles estáticos para cada pozo en los años considerados en el estudio (2017 y 2019), se optó por elegir una serie de pozos de observación que, con su distribución, cubrieran la mayor parte del acuífero con el objetivo de lograr una calibración óptima de acuerdo a la información con la que se cuenta, conociendo así, el comportamiento del modelo ante las diferentes situaciones de extracción.

Se realizaron mediciones de niveles estáticos de 61 aprovechamientos que se encontraban distribuidos en la mayor parte de la superficie del acuífero, de los cuales, son 19 pozos y 42 norias. De las 61 mediciones, 57 se encuentran en aprovechamientos activos y 4 inactivos. De los activos, 22 son para uso múltiple, 29 para uso agrícola, 4 para uso pecuario y 2 para abastecimiento público-urbano (Figura 11).

De acuerdo con las mediciones realizadas, se reportaron profundidades de niveles estáticos de 50 m como máximo, 4.6 m como mínimo y 17.70 m como promedio.

2.7 Censo de aprovechamientos

De acuerdo con los datos proporcionados por el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) (CONAGUA, 2019) el censo de aprovechamientos, está formado por 1,259 pozos destinados a los siguientes usos: 940 para uso agrícola, 25 para uso público urbano, 203 para usos múltiples, 41 para uso doméstico, 13 para uso industrial y 37 para uso pecuario.

Del censo mencionado, se tiene que 252 pozos no cuentan con la información básica para ser aplicada en este estudio y/o se encuentran fuera del área; por lo tanto, para fines de este estudio, se consideraron 1,007 pozos, los cuales cuentan con la información mínima necesaria y están destinados a los usos siguientes: 780 para uso agrícola, 23 para uso público urbano, 135 para usos múltiples, 35 para uso doméstico, 10 para uso industrial y 24 para uso pecuario. En la figura 12 se presenta la ubicación de los pozos de bombeo.

Es importante mencionar que, de acuerdo a los datos proporcionados por CONAGUA (2019) en el censo de aprovechamientos, para los 1,007 pozos, se tiene una concesión total de 23'453,434 m³/año de extracción, una extracción máxima en un pozo de bombeo de 350,000 m³/año, una extracción mínima en un pozo de bombeo de 57.4 m³/año y una extracción promedio de 23,290 m³/año.

Nota: No se tiene un registro de las profundidades totales de los aprovechamientos.

Nota: En el anexo 1 se muestra el censo realizado por CONAGUA (2019) simplificado; dicho censo cuenta con la siguiente información: número de pozo (asignado para este trabajo), coordenadas UTM, altitud (la cual fue obtenida con el modelo digital de elevación) y volumen de extracción anual de agua (concesionado).

2.8 Retorno agrícola

Es posible encontrar una gran variedad de métodos para calcular la infiltración; sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, en la zona de estudio no existe suficiente infiltración que se vea reflejada en la recarga del agua subterránea, por lo tanto, se infiere que solo un 10% del total de extracción de los pozos de uso agrícola retorna al acuífero. Lo anterior se traduce de la siguiente manera: de los 20.47 Mm³/año que se extraen de los pozos para uso agrícola, se considera un retorno agrícola de 2.047 Mm³/año (para la misma superficie).

2.9 Elevaciones del nivel estático

Se determinaron las elevaciones de los niveles estáticos para los años 2017 y 2019 para cada uno de los pozos; lo cual, se pudo obtener mediante la altitud del pozo (Z) utilizando un modelo digital de elevación y las profundidades a los niveles estáticos medidas en las campañas de monitoreo, mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Elev. de terreno (Z)} - \text{Prof. del Niv. Estático} = \text{Elevación del Nivel estático}$$

Con las elevaciones de los niveles estáticos, se realizaron las configuraciones de las elevaciones del nivel freático para determinar las direcciones de flujo subterráneo. En el anexo 2 se presentan las elevaciones de los niveles estáticos para los pozos de monitoreo en los años mencionados.



POZOS DE OBSERVACIÓN EN EL ACUIFERO ADMINISTRATIVO SALINAS DE HIDALGO, S.L.P

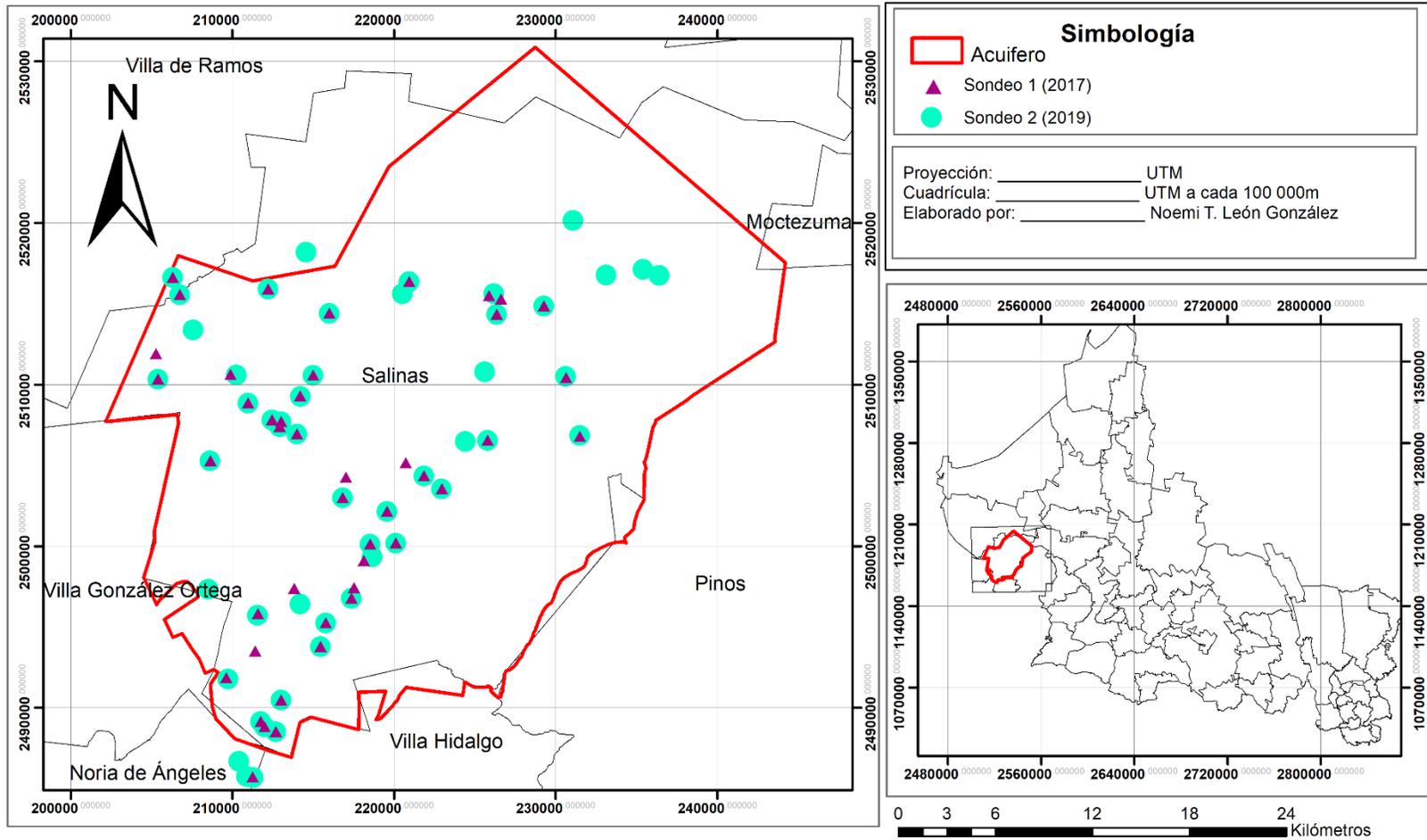


Figura 11. Distribución de los pozos de observación en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.



POZOS DE BOMBEO EN EL ACUIFERO ADMINISTRATIVO SALINAS DE HIDALGO, S.L.P

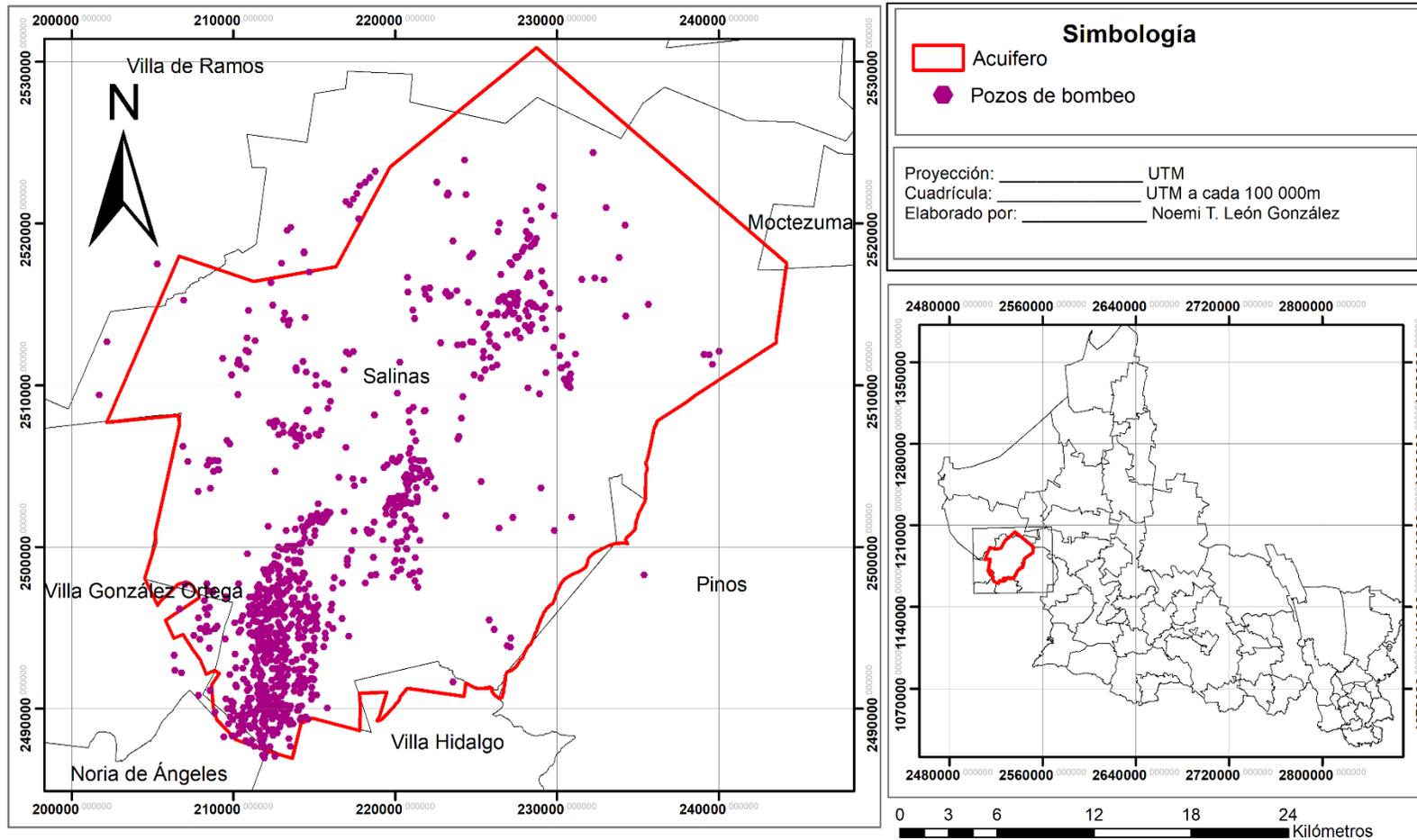


Figura 12. Distribución de los pozos de bombeo en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.

2.10 Balances hídricos superficiales y subterráneos

El balance de aguas superficial y subterráneo está compuesto por el registro de las entradas y salidas y el cambio del almacenamiento. Para conocer la definición del balance hídrico en el área, es necesario incluir los siguientes componentes: precipitación, escurrimiento, evapotranspiración, infiltración, cambios en el almacenamiento superficial y subterráneo, bombeo, recarga y entradas y salidas por flujo subterráneo.

La ecuación para el balance superficial se define bajo la condición que a continuación se establece:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

Donde:

Entradas = Precipitación

Salidas = Escurrimiento, Evapotranspiración, Infiltración.

Por lo tanto:

$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración} + \text{Infiltración} + \text{Escurrimiento}$$

Entradas (Precipitación) = Infiltración, Retorno agrícola

Salidas = Evapotranspiración, Infiltración.

En este caso, para poder obtener las entradas de flujo subterráneo al sistema del acuífero, se trabajó por medio de La Ley de Darcy, el cual nos da como resultado **98.63 Mm³/año** para las entradas por flujo subterráneo.

Aplicando la ecuación de balance con respecto al acuífero de Salinas de Hidalgo y para el balance subterráneo se tiene que:

$$\text{Recarga} + \text{E/subt.} + \text{Retorno agrícola} = \text{EVTR} + \text{Bombeo} + \text{S/flujo subt.}$$

Entonces:

$$\mathbf{E/subt + Retorno agrícola - Bombeo = EVTR}$$

$$98.63 + 2.047 - 23.453 = EVTR$$

$$EVTR = 77.227 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

Donde, como ya se mencionó anteriormente, la infiltración es muy poca y no llega a la zona de descarga, por lo que en este caso se propuso que no hay recarga derivada de la infiltración, lo mismo sucede con las salidas de flujo subterráneo ya que éstas ocurren en su mayoría por medio de la evapotranspiración a partir de las entradas subterráneas y por bombeo.

Es importante mencionar que la cantidad de agua calculada representa una magnitud aproximada de agua que está entrando al acuífero en forma de flujo subterráneo.

En la figura 13 se presenta el balance de aguas subterráneas para el acuífero de Salinas de Hidalgo.

Balance para el año 2015

Unidades $Mm^3/año$

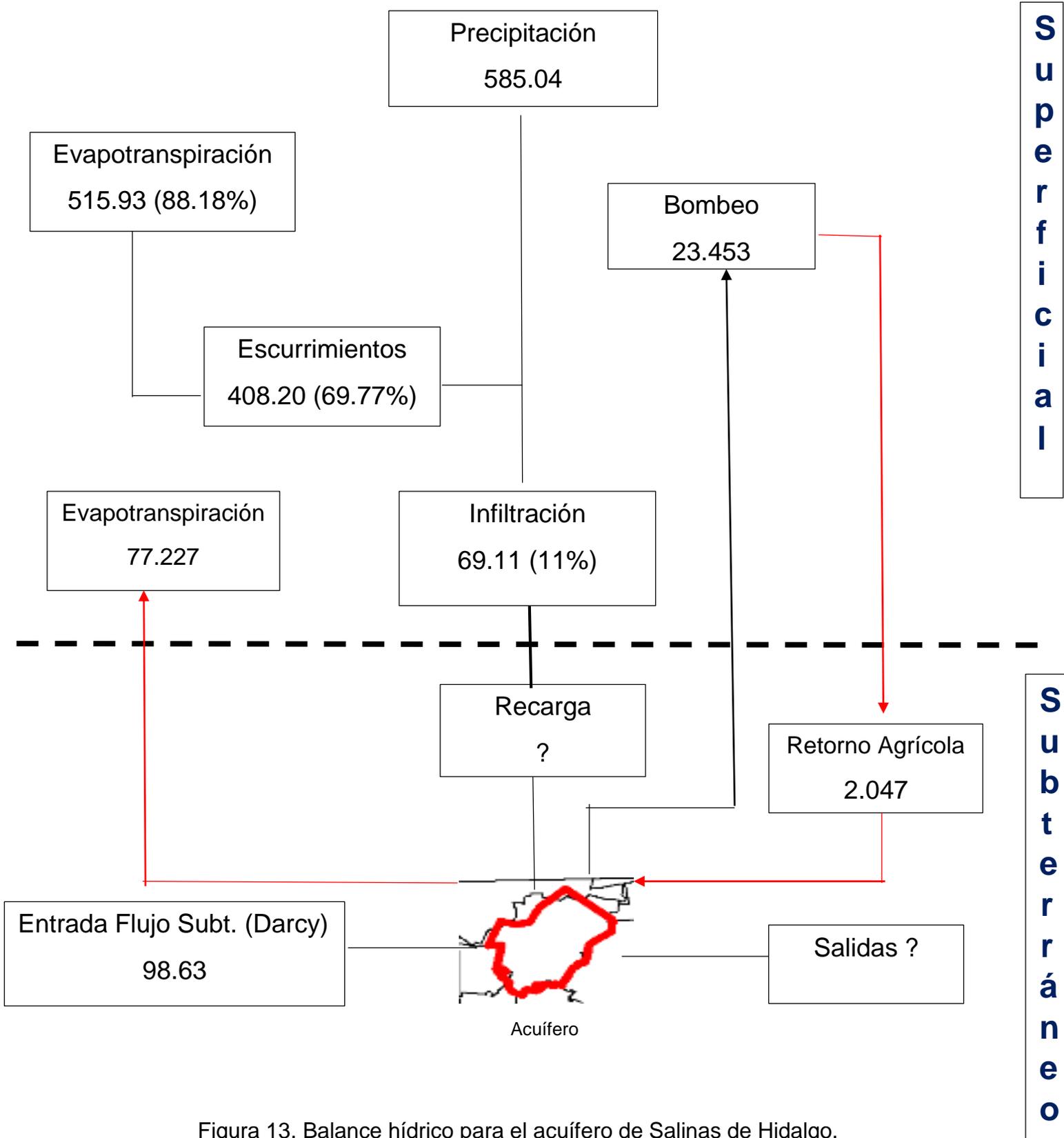


Figura 13. Balance hídrico para el acuífero de Salinas de Hidalgo.

Tabla 8. Datos correspondientes a todos los años utilizados en el estudio.

	Precip. Media anual (mm/año)	ETR	Ce	Escurrimiento	I m/año	Ac (m2)	Ret. Agrícola	Bombeo Total
						1,017'471,848	2,047,670.23	23,453,434.83
1985	415	398.42	0.61	254.63	0.017	17'051,256		
1986	325	323.03	0.54	175.83	0.002	1'871,175		
1987	383	371.73	0.59	226.01	0.011	11'324,608		
1988	397	383.31	0.60	238.71	0.014	14'212,345		
1989	247	247.00	0.45	112.29	0.000	242,757		
1990	566	500.81	0.69	392.62	0.065	66'217,714		
1991	422	399.65	0.62	260.80	0.022	22'818,138		
1992	532	480.31	0.68	361.54	0.052	53'067,097		
1993	250	250.00	0.46	114.70	0.000	293,939		
1994	410	395.75	0.61	249.58	0.014	14'034,385		
1995	364	357.19	0.58	209.29	0.007	6'715,340		
1996	222	222.00	0.42	92.87	0.000	0		
1997	345	338.78	0.56	193.00	0.006	6'276,518		
1998	259	259.00	0.47	121.84	0.000	343,110		
1999	163	163.00	0.31	51.24	0.000	0		
2000	150	150.00	0.29	43.13	0.000	0		
2001	272	272.00	0.49	132.07	0.000	93,788		
2002	500	467.91	0.66	331.75	0.032	32'859,819		
2003	363	358.10	0.57	208.53	0.005	4'912,128		
2004	452	431.53	0.64	287.74	0.020	20'814,851		
2005	278	278.00	0.49	137.25	0.000	481,372		
2006	360	351.53	0.57	205.91	0.008	8'514,500		
2007	463	432.47	0.64	297.52	0.030	30'822,277		
2008	373	362.45	0.58	217.75	0.011	11'220,474		
2009	340	335.40	0.56	188.92	0.005	4'917,205		
2010	293	291.63	0.51	149.20	0.001	1'445,152		
2011	174	174.00	0.34	58.89	0.000	399,003		
2012	325	319.88	0.54	175.57	0.005	4'753,246		
2013	611	521.41	0.71	434.74	0.089	90'978,553		
2014	419	394.55	0.62	257.86	0.024	24'680,462		
2015	575	507.08	0.70	401.22	0.068	69'200,967		

3. Implementación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas

Introducción

El primer paso en la planeación, implementación y proceso de un modelo de simulación de flujo de aguas subterráneas, es la elaboración del modelo conceptual del funcionamiento del sistema. El modelo conceptual de los sistemas de flujo de agua subterránea, es la etapa de la modelación donde la información que describe las condiciones reales del sistema es acoplada de manera sistemática para describir el flujo subterráneo, por lo tanto, el modelo conceptual constituye una representación simplificada de cómo funciona el sistema real, siendo una de las etapas más importantes en el desarrollo del modelo de simulación (Durán, 2012).

Frecuentemente el modelo conceptual está representado en forma de un bloque, diagrama o una sección transversal; comprende también las características de los parámetros hidráulicos de cada unidad, las posiciones de las superficies freáticas y piezométricas y por lo tanto de las condiciones de flujo subterráneo. Además, se requiere identificar zonas y procesos de recarga y evaluación de reservas. El propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de forma efectiva. La simplificación es necesaria porque una reconstrucción completa del sistema es imposible, un modelo conceptual es la idea básica de cómo operan los sistemas y procesos (Durán, 2012).

Un modelo conceptual está conformado principalmente por tres grandes componentes: 1) unidades hidrogeológicas, definidas a partir del estudio de las formaciones geológicas, en términos de la caracterización litológica, la capacidad específica, y la conductividad hidráulica del sistema acuífero, 2) sistema de flujo, que comprende el análisis de la dinámica del flujo subterráneo y 3) balance hídrico, está relacionado con las entradas y salidas del sistema modelado (Durán, 2012).

Un modelo numérico implementado con el propósito de ayudar a entender la hidrodinámica del sistema del acuífero, debe permitir al momento de alcanzar la calibración en estado estacionario representar y explicar la hidrodinámica del sistema del acuífero. Una vez definido este objetivo se procede al diseño e implementación de la modelación numérica.

Para la implementación de un modelo numérico, se tienen en cuenta la extensión del área a modelar, el nivel de detalle de la información disponible y la escala de trabajo a la cual se desea construir el modelo hidrogeológico conceptual; para así, definir inicialmente el número de capas y el espaciamiento nodal que arrojará un número de celdas adecuado y a la vez razonable, en términos de la magnitud de memoria computacional a ocupar y del tiempo de ejecución de cada corrida del modelo (Betancur *et al.*, 2009).

Los modelos numéricos son representaciones matemáticas que simplifican la complejidad de la hidrología, hidrogeología y química de un sistema acuífero a partir del uso de ecuaciones diferenciales (ecuación general de flujo, Ley de Darcy y la ecuación general de transporte), resueltas por métodos numéricos aproximados para cada elemento del dominio. Las soluciones obtenidas corresponden a la distribución de velocidades, niveles de agua, concentración de soluto a través del espacio y el tiempo, entre otras, permitiendo determinar la magnitud y la dirección del escurrimiento de flujo subterráneo y el soluto presente en el acuífero. Los estudios hidrogeológicos se desarrollan principalmente para establecer la cantidad y calidad de agua subterránea para diferentes tipos de consumo (Durán, 2012).

El presente trabajo fue desarrollado a través del programa de cómputo Visual Modflow versión 2009.1 que es un modelo numérico desarrollado por McDonald y Harbaugh (1988) pertenecientes al Servicio Geológico de los Estados Unidos. MODFLOW (Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model) es un algoritmo que resuelve numéricamente la ecuación de flujo de aguas subterráneas utilizando una aproximación por diferencias finitas centradas en el espacio (centro celda), permitiendo la simulación del flujo en estado estacionario o variable en el tiempo (transitorio) en tres dimensiones para un medio poroso saturado; posee una estructura modular que consiste básicamente en un programa principal y una serie de subrutinas altamente independientes denominadas “módulos”, que realizan funciones muy concretas. Los módulos se agrupan en “paquetes”, que poseen características específicas del sistema hidrogeológico a ser simulado.

La división del programa en módulos permite al usuario examinar características hidrogeológicas específicas del modelo independientemente y, facilita el desarrollo de capacidades adicionales dado que los módulos nuevos pueden ser añadidos sin modificar los existentes. El sistema real es representado por una malla de nodos, que forman filas, columnas y capas; teniendo un sistema cartesiano de referencia, los nodos a lo largo de una fila son paralelos al eje x, mientras que los nodos a lo largo de una columna son paralelos al eje y, y los nodos a lo largo de una vertical son paralelos al eje z. Conceptualmente, los nodos representan bloques o celdas en los cuales las propiedades hidráulicas son constantes, por lo que cualquier valor asociado se aplica o se distribuye sobre toda la extensión de esa celda (Durán, 2012).

3.1 Geometría del sistema

En la región del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P., los componentes del subsuelo, señalan que se trata de un acuífero libre heterogéneo anisotrópico, en donde el agua subterránea se desplaza a través de diferentes medios porosos. Para la definición de los espesores de cada uno de los medios, se utilizaron las secciones geológicas resultantes de los estudios geofísicos realizados en el acuífero (Figura 14 a 16). Los estudios geofísicos se realizaron por medio de sondeos eléctricos verticales, los cuales fueron 39 (Figura 20) y fueron tomados en la parte sur, centro y norte de la región de estudio. Una vez analizados los sondeos, se obtuvieron 3 unidades geoelectricas las cuales se asignaron con base en las resistividades presentes en cada sondeo. Se determinaron 3 unidades diferentes; la Unidad 1 que se divide en 1A y 1B, comprendió resistividades de 1 a 50 ohms y contiene material sedimentario de relleno y arcillas, su condición hidrológica varía desde permeable hasta poco permeable según sea el caso. La Unidad 2, comprendió resistividades bajas/medias (50 -207 ohms) y se conforma por secuencias sedimentarias y volcánicas depositadas en un ambiente de cuenca.

La Unidad 3 comprendió resistividades muy altas (300-1400 ohms) y se conforma por secuencias sedimentarias con un alto grado de compactamiento y muy baja permeabilidad (Tabla 9) (Salazar-Hurtado, 2019).

Tabla 9. Unidades geoelectricas (Salazar-Hurtado, 2019).

Unidades	Resistividades (ohm)	Litología	Formaciones	Condiciones
Unidad 1A	7-50	Conglomerado-relleno sedimentario	Conglomerado Zaragoza	Permeable/impermeable
Unidad 1B	1-7	Arcillas	Arcillas, relleno sedimentario	Impermeable
Unidad 2	50-207	Caliza, Caliza-lutita, Roca ígnea (basalto e ignimbrita), Caliza-limolita.	Las Joyas, La Peña, Cupido, Cuesta del Cura, Riolita Panalillo.	Permeable/medianamente permeable
Unidad 3	300-1400	Arenisca-Lutita Caliza-Arenisca Caliza-Lutita	Caracol, Taraises, Indidura	Poco/ Muy poco permeable

Finalmente, para fines de este estudio y con los resultados de la geofísica y la relación de los medios geológicos presentes en el acuífero, la clasificación de las secciones con respecto a las formaciones presentes y las permeabilidades quedó constituido de la siguiente manera como se muestra en la tabla 10 y en las secciones según su permeabilidad (Figura 17 a 19).

Tabla 10. Clasificación según la permeabilidad.

	Clasificación según la permeabilidad	Formaciones
P	Permeable	Aluvión (Relleno sedimentario con conglomerados y relleno sedimentario con conglomerado y arcillas)
P-M	Permeable/ Medianamente permeable	Fm. Las Joyas Fm. Panalillo Fm. La Peña Fm. Cupido Fm. Cuesta del Cura
M-B	Medianamente permeable/ baja permeabilidad	Fm. Caracol Fm. Indidura Fm. Taraises
B-b	Muy baja permeabilidad	Relleno sedimentario con arcillas

3.2 Definición de las direcciones de flujo subterráneo

La dirección de flujo en la región de interés se evalúa mediante el estudio de las equipotenciales trazadas a partir de datos que fueron medidos en las campañas de toma de niveles estáticos.

La información sobre los niveles de agua disponibles señala que existen diferentes direcciones de flujo de las aguas subterráneas en el plano horizontal en ambos periodos de monitoreo (2017 y 2019), las equipotenciales resultantes muestran que el flujo va con dirección del norte del acuífero desplazándose hacia la parte central, esto indica que el agua, a través de los escurrimientos fluye y se acumula donde se encuentra localizada la laguna de Salinas.

Con base en los resultados, se observa que no existe un cambio considerable en las líneas de flujo entre ambas configuraciones (2017 y 2019). En la figura 21 se muestran las direcciones de flujo subterráneo con base en las elevaciones de niveles estáticos monitoreadas en el mes de junio del 2017 y febrero del 2019 (Figura 22); en la figura 23 se muestran la configuración de la conductividad eléctrica tomadas de un muestreo realizado en abril del 2019, en el cual se observa un gradiente que se incrementa hacia la dirección de la laguna, esto se asemeja a la dirección de flujo obtenidas mediante las elevaciones de niveles estáticos (Figura 21 y 22).

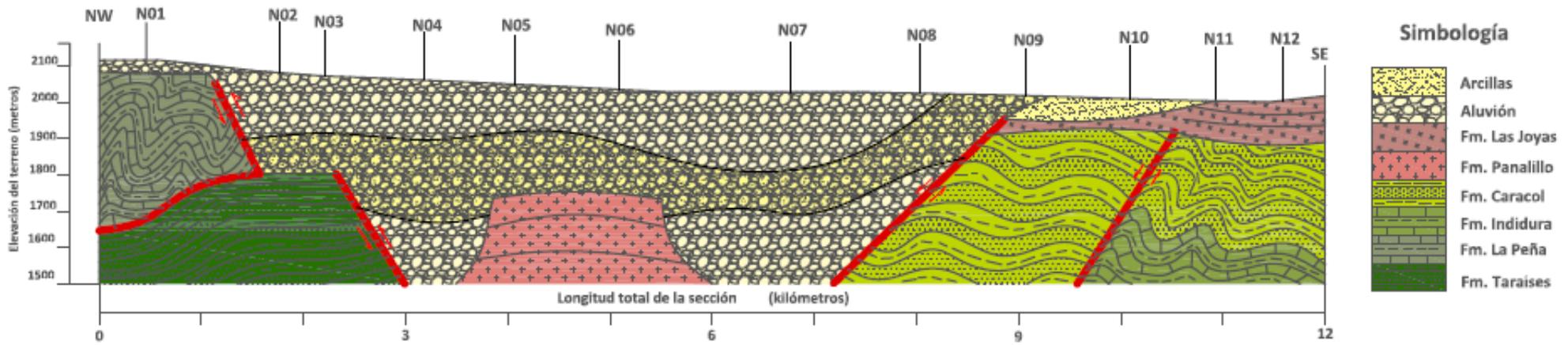


Figura 14. Sección geológica norte Salinas de Hidalgo (Salazar-Hurtado, 2019).

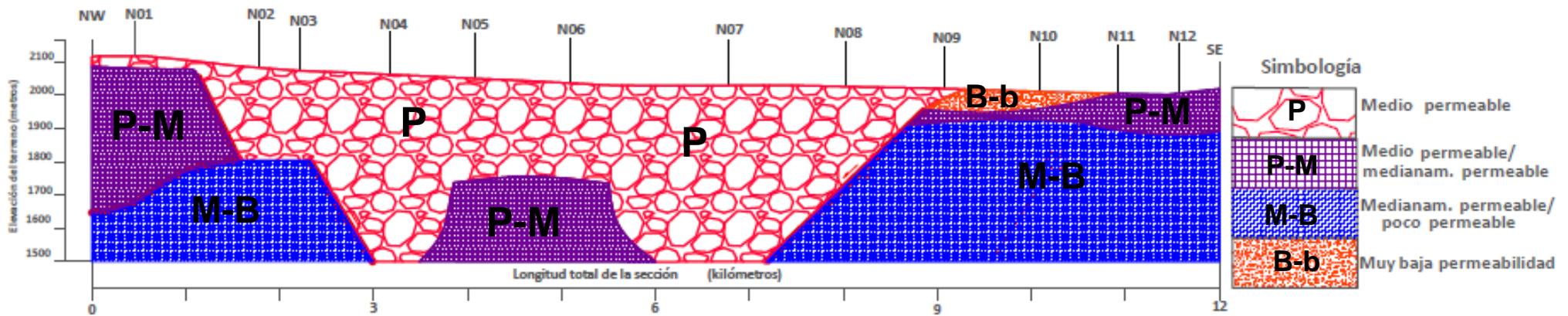


Figura 17. Sección norte, clasificación según la permeabilidad.

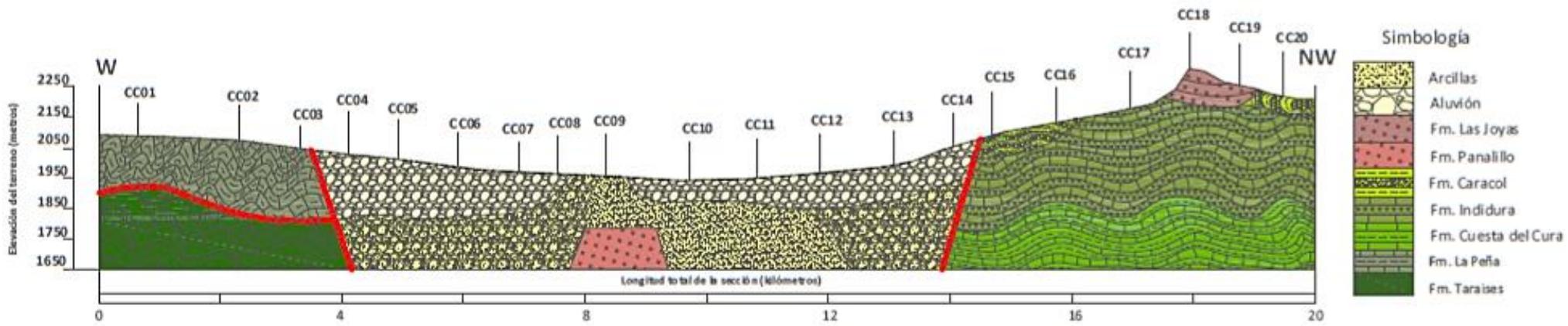


Figura 15. Sección geológica centro Salinas de Hidalgo (Salazar-Hurtado, 2019).

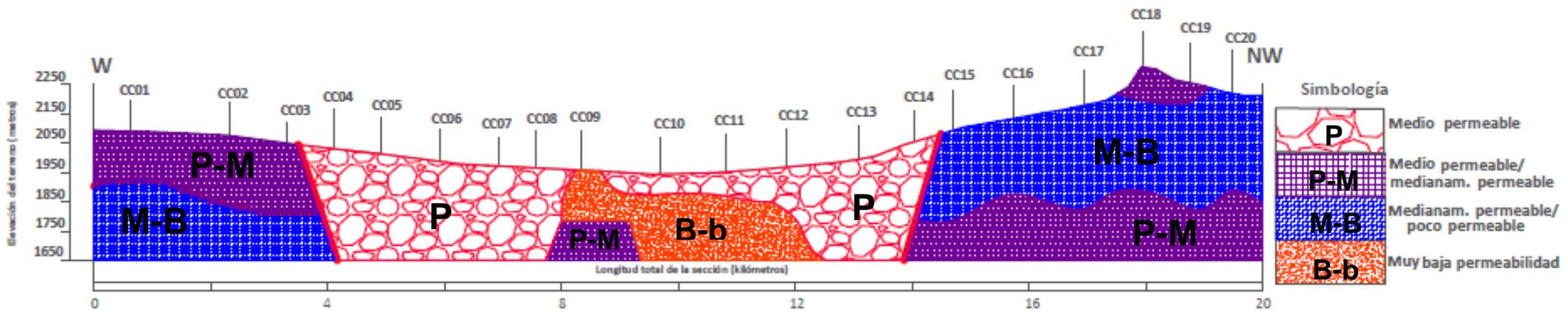


Figura 18. Sección centro, clasificación según la permeabilidad.

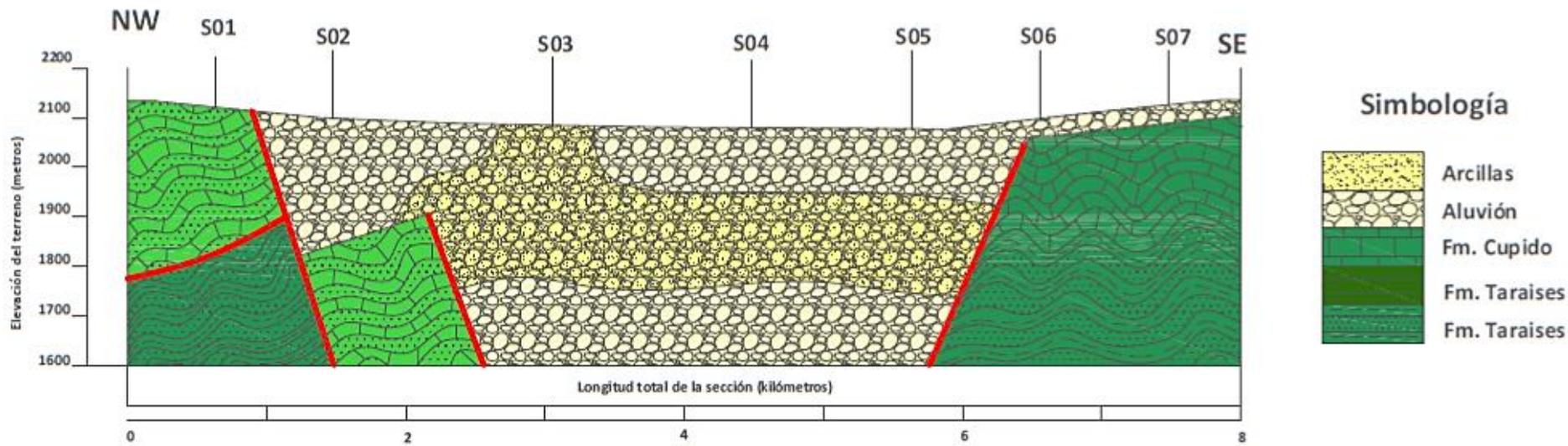


Figura 16. Sección geológica sur Salinas de Hidalgo (Salazar-Hurtado, 2019).

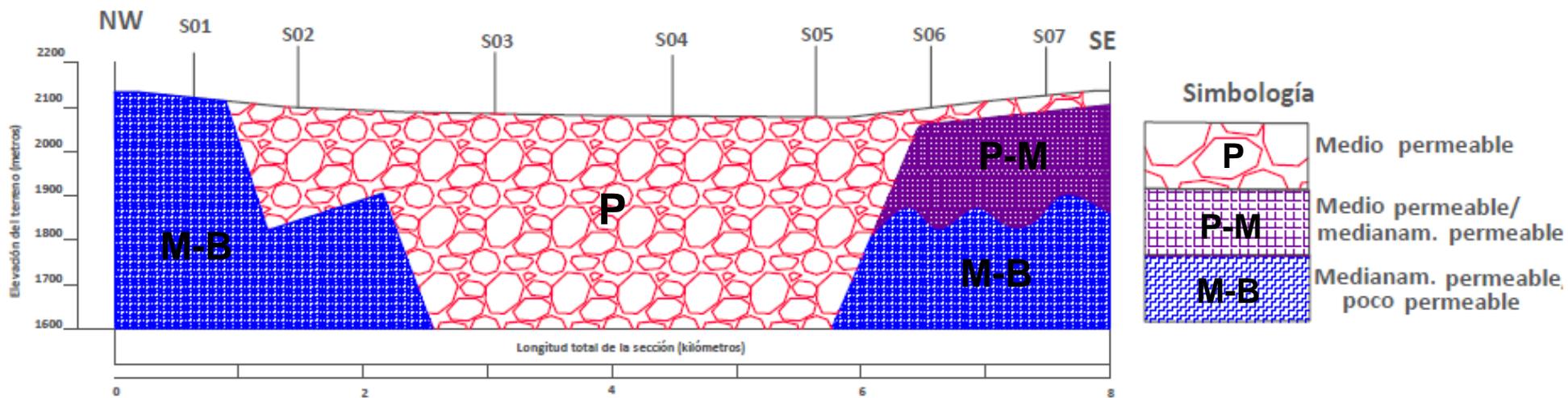


Figura 19. Sección sur, clasificación según la permeabilidad.

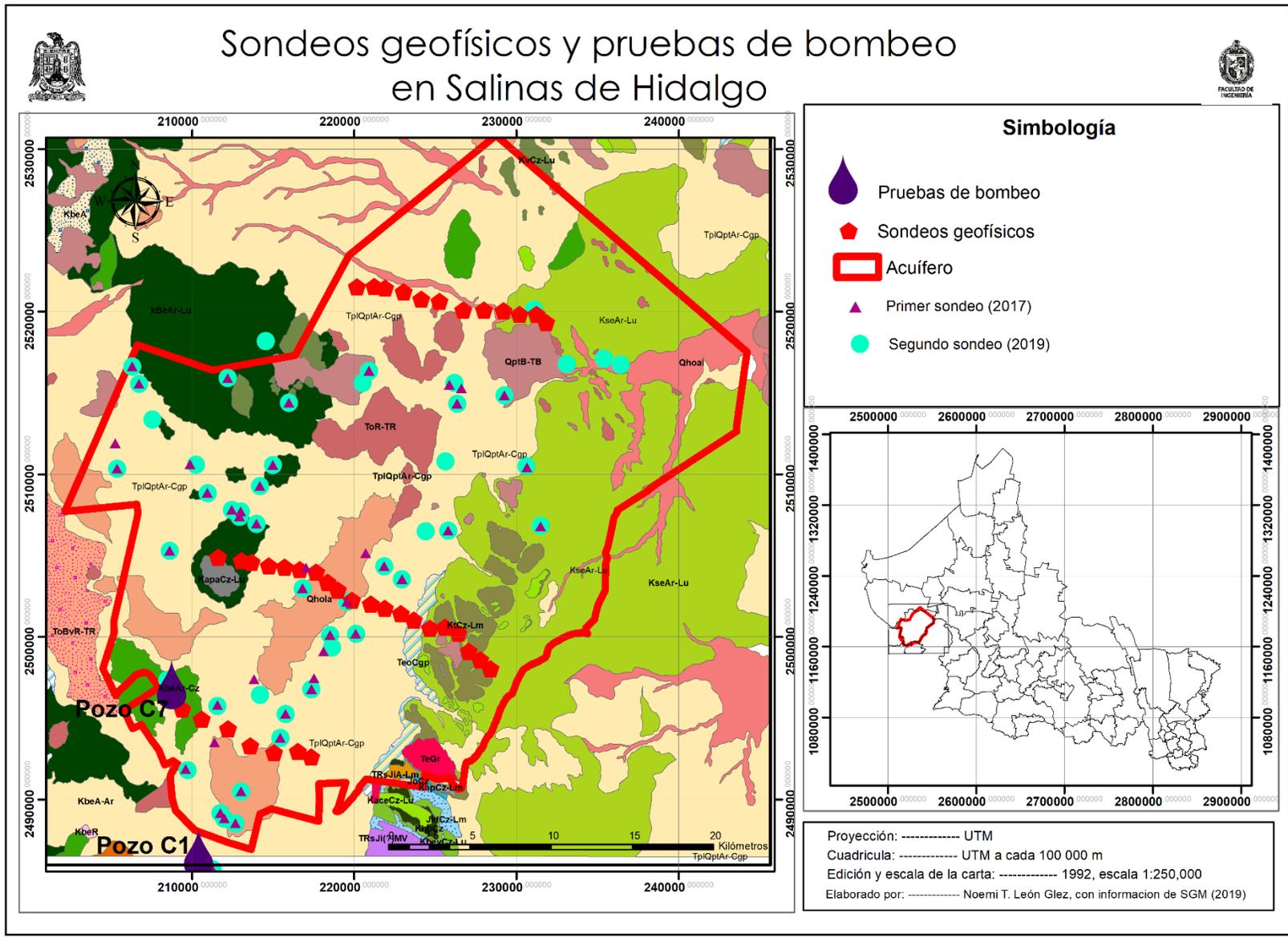


Figura 20. Sondeos eléctricos verticales (Salazar-Hurtado, 2019) y pruebas de bombeo en el acuífero de Salinas de Hidalgo.



Direcciones de Flujo para el año 2017

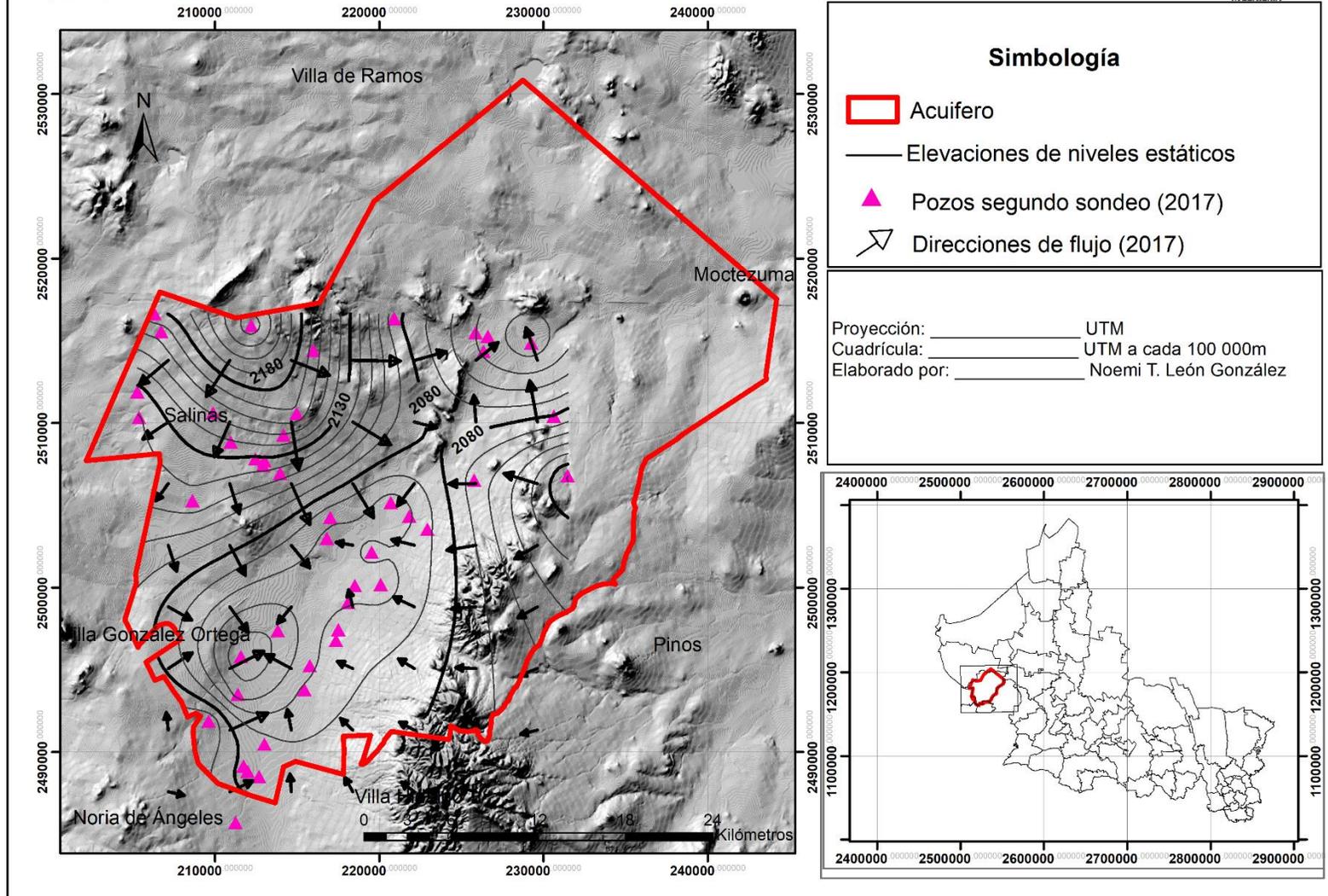


Figura 21. Vectores de flujo del acuífero de Salinas de Hidalgo (2017).



Direcciones de Flujo para el año 2019

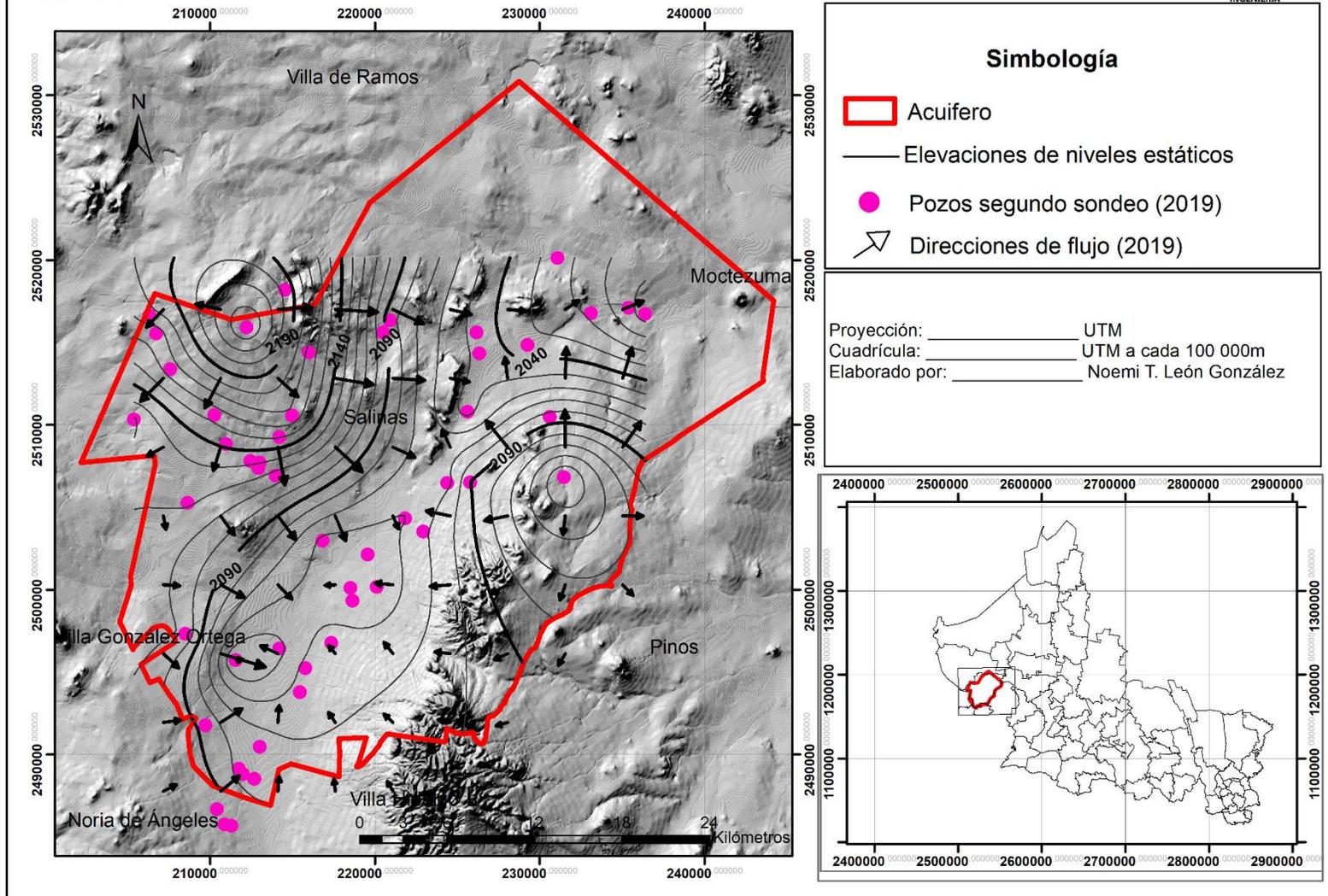


Figura 22. Vectores de flujo del acuífero de Salinas de Hidalgo (2019).

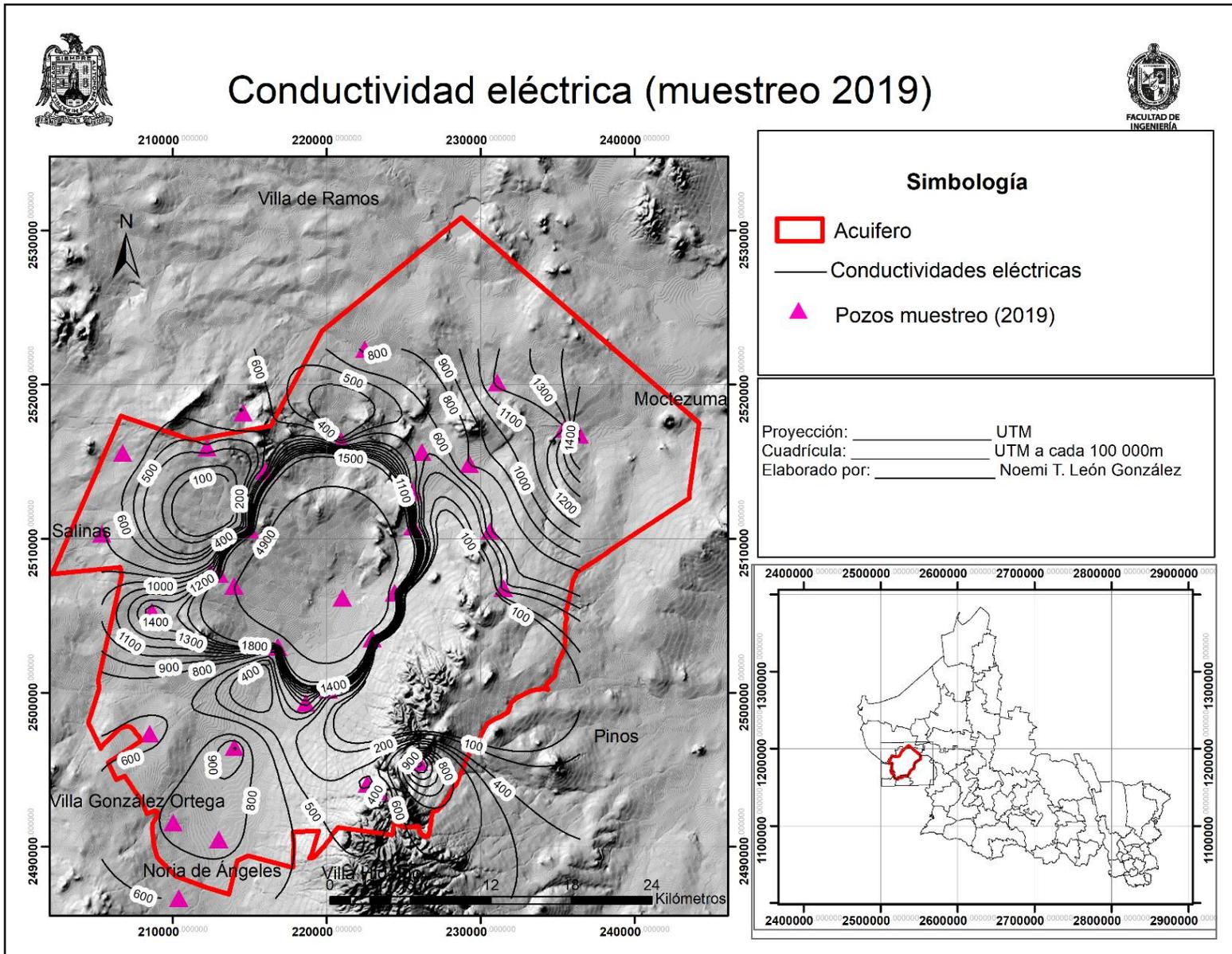


Figura 23. Conductividad eléctrica a partir de muestreo (2019).

3.3 Pruebas de bombeo

Una prueba de bombeo es un método para estimar el funcionamiento, capacidad y la zona de influencia de la extracción de agua mediante un pozo, además de determinar las características de un acuífero determinado, como el almacenamiento, la transmisividad, la extensión y la presencia de límites o barreras de flujo y posibles conexiones con fuentes superficiales (Castañeda, 2019).

Una prueba de bombeo esencialmente consiste en la extracción de agua desde un pozo, normalmente a caudal constante, y la medición de cambios en los niveles de agua (descensos) en el mismo pozo y en los puntos de observación, o sectores de afloramiento o cauce superficial de flujo de agua. Asimismo, esta prueba mide los cambios en el nivel de agua y flujos luego de que el bombeo finaliza, esta información servirá para la comprensión del funcionamiento hidráulico del acuífero (Castañeda, 2019).

Una prueba de bombeo tiene dos objetivos principales. El primero es determinar las características hidráulicas de los acuíferos. Este tipo de pruebas estudian al acuífero mismo y al pozo, más no a la bomba, son llamadas también pruebas de acuífero. Cuando se planifican y llevan a cabo correctamente estas pruebas pueden proporcionar información básica para la solución de problemas locales y aún regionales sobre el flujo del agua subterránea (Conagua, 2007). El segundo objetivo es proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o la relación caudal-abatimiento, para seleccionar el equipo de bombeo adecuado. Dicha definición deberá basarse además de los resultados de esta prueba de bombeo (aforo) en las características físico-químicas de las aguas extraídas (Conagua, 2007).

3.3.1 Metodología de ejecución

La metodología para realizar una prueba de bombeo consiste en bombear un pozo que esté perforado en el acuífero que se desea estudiar, durante un cierto tiempo, a un determinado caudal y medir la evolución del nivel piezométrico debida al bombeo, tanto en el mismo pozo de bombeo como en piezómetros y pozos cercanos (pozos de observación; Conagua, 2007).

A partir del comportamiento de los abatimientos de los niveles, la distancia entre los pozos de observación y el pozo bombeado y el caudal de bombeo, se puede obtener información sobre las características del acuífero, como son: su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, existencia de barreras impermeables cercanas, así como de recarga y definir y confirmar el tipo de respuesta hidráulica del acuífero (Conagua, 2007).

El procedimiento para realizar un aforo es más sencillo, ya que no se requiere de pozos de observación únicamente se mide el caudal de descarga y el abatimiento del nivel del agua dentro del pozo (Conagua, 2007).

Las pruebas de aforo suministran información sobre la calidad de construcción y desarrollo del pozo, pérdidas de carga a la entrada del agua al pozo, caudal de bombeo óptimo y profundidad a la que se debe colocar la bomba (Conagua, 2007).

3.3.2 Elección del sitio para la prueba de bombeo

Cuando se va a utilizar un pozo en la prueba o cuando se requieren las características hidráulicas de una ubicación específica, el sitio del pozo está predeterminado y no se puede mover a otro, posiblemente un sitio más adecuado (Krusema *et al.*, 1994). Al planear la organización general de las pruebas de bombeo, el primer punto a definir es el sitio donde se hará ésta. En la mayoría de los casos el sitio ya está predeterminado y no hay posibilidades de cambiar a otro más adecuado, ya que casi siempre se tiene que utilizar pozos ya existentes o

algunas veces se necesita conocer las características del acuífero en un sitio en particular. Sin embargo, lo ideal es poder seleccionar el sitio más apropiado para la realización de la prueba (Conagua, 2007).

Para la selección del sitio se deben considerar los siguientes puntos:

- ❖ Las condiciones hidrogeológicas no deberían cambiar en distancias cortas y deberían ser representativas del área bajo consideración o al menos una gran parte de ella.
- ❖ El sitio no debe estar cerca de ferrocarriles o autopistas donde el paso de trenes o tráfico pesado pueda producir fluctuaciones medibles en la cabeza hidráulica de un acuífero confinado.
- ❖ El sitio no debe estar cerca de pozos que estén descargando.
- ❖ La descarga de agua durante la prueba deberá verse hacia un punto donde pueda regresar al acuífero.
- ❖ El gradiente hidráulico o de la superficie piezométrica debe ser baja.
- ❖ El sitio debe ser de fácil acceso, tanto para el personal, como para los equipos y fuentes de poder en caso de ser necesario.
- ❖

3.3.3 Características del pozo de bombeo

Para elegir un pozo de abastecimiento de agua para la prueba de bombeo, éste debe presentar las características mencionadas anteriormente y la prueba comenzará hasta que el nivel del agua en el mismo pozo se encuentre en reposo total (Conagua, 2007).

Si no existen pozos de extracción en el sitio seleccionado para la prueba, se tendrá que construir uno para tal fin. Para la construcción de pozos consultar los manuales de la Conagua. Los pozos construidos para pruebas de bombeo no necesariamente requieren de un gran diámetro, estos pueden ser equipados con bombas de succión colocadas en la superficie del terreno. Es fundamental conocer el diseño constructivo y corte litológico de los pozos (Conagua, 2007).

La bomba debe ser capaz de operar continuamente por 3 o 4 días a una descarga constante. La capacidad de la bomba y la magnitud de la descarga, deberán ser lo suficientemente grandes para producir abatimientos medibles en el pozo de bombeo y piezómetros ubicados a distancias máximas de entre 100 y 200 m del pozo de extracción (Conagua, 2007).

Es recomendable recopilar la información necesaria de los pozos, de tal manera que se pueda identificar a que pozo corresponde cada prueba, si se tiene pozos de observación o no, la ubicación y demás información relevante.

3.3.4 Realización de pruebas

La parte más importante de una prueba de bombeo es medir el abatimiento (o recuperación, según de la etapa que se trate) de niveles piezométricos en los pozos de observación y en el de bombeo durante toda la prueba. Como el abatimiento y la recuperación de los niveles son mayores durante las primeras dos horas, las lecturas se deben realizar a intervalos cortos, estas se van aumentando conforme se prolonga el bombeo (CONAGUA, 2007).

En las tablas 11 y 12 correspondientes a las 2 pruebas realizadas en este estudio al pozo C1 y Noria C7 (Figura 20) y en las cuales se sugieren secuencias de intervalos de tiempos, aplicables para el pozo de bombeo, así como para los de observación que se encuentren cercanos al pozo bombeado, ya que en ellos las variaciones de nivel del agua son inmediatas.

El control del caudal de extracción debe ser riguroso, por lo que debe medirse periódicamente. Además, se debe llevar un registro de los sucesos ocurridos en el transcurso de la prueba, con el mayor detalle posible. Si se produce una suspensión involuntaria y se considera que pueden ser útiles los datos de abatimiento registrados hasta antes de la interrupción, se procede a medir la recuperación. De lo contrario, se debe esperar a que el nivel se recupere para iniciar el bombeo nuevamente (CONAGUA, 2007).

Tabla 11. Formato de campo de registro de datos de prueba de bombeo (adaptado de Comisión Nacional del Agua) para pozo C1.

		FORMATO DE CAMPO PARA COLECTA DE DATOS DE PRUEBA DE BOMBEO				
		PRUEBA NUMERO	1	FECHA	17/04/2019	
		CLAVE DE IDENTIFICACION	C1	HORA DE INICIO	8:24 hrs	
TIPO DE BOMBA	SUMERGIBLE	APROVECHAMIENTO		PROFUNDIDAD (m)		
PROFUNDIDAD C.B. (m)		MUNICIPIO	SALINAS	Ø ADEME (")		
DIAMETRO (")				Ø DESCARGA (")	3 "	
COORDENADAS		LOCALIDAD	Noria de Angeles	N.E. (m)	32.63	
X	Y	PROPIETARIO				
210403	2486676	GASTO PROMEDIO (lps)				
	TIEMPO				N.D. (m)	ABATIMIENTO (m)
	DIAS	HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS		
	0	0	0	0	32.63	0
	0.0018	0.043	2.6	156	40.402	7.772
	0.0020	0.049	2.93	175.8	41.866	1.464
	0.0024	0.058	3.48	208.8	43.590	1.724
	0.0028	0.067	4	240	45.169	1.579
	0.0030	0.073	4.36	261.6	46.250	1.081
	0.0033	0.080	4.81	288.6	47.568	1.318
	0.0042	0.100	6	360	50.552	2.984
	0.0074	0.179	10.71	642.6	62.955	12.403
	0.0104	0.250	15	900	68.983	6.028
	0.0208	0.500	30	1800	86.714	17.731
	0.0507	1.217	73	4380	95.010	8.296
	0.0625	1.500	90	5400	95.010	0.000
	0.0757	1.817	109	6540	95.010	0.000
	0.0903	2.167	130	7800	95.010	0.000
	0.0972	2.333	140	8400	95.010	0.000
	0.1111	2.667	160	9600	95.010	0.000
	0.1181	2.833	170	10200	95.010	0.000
	0.1319	3.167	190	11400	95.010	0.000
	0.1389	3.333	200	12000	95.010	0.000
	0.1528	3.667	220	13200	95.010	0.000
	0.1597	3.833	230	13800	95.010	0.000
	0.1736	4.167	250	15000	95.010	0.000
	0.1806	4.333	260	15600	95.010	0.000
	0.1986	4.767	286	17160	95.010	0.000
	0.2014	4.833	290	17400	95.010	0.000
	0.2153	5.167	310	18600	95.010	0.000
	0.2222	5.333	320	19200	95.010	0.000
	0.2361	5.667	340	20400	95.010	0.000
	0.2431	5.833	350	21000	95.010	0.000
	0.2604	6.250	375	22500	95.010	0.000
	0.2813	6.750	405	24300	95.010	0.000

Tabla 12. Formato de campo de registro de datos de prueba de bombeo (adaptado de Comisión Nacional del Agua) para Noria C7.

		FORMATO DE CAMPO PARA COLECTA DE DATOS DE PRUEBA DE BOMBEO				
		PRUEBA NUMERO	1	FECHA	19/04/2019	
		CLAVE DE IDENTIFICACION	CPB	HORA DE INICIO	7:58 hrs	
TIPO DE BOMBA	SUMERGIBLE	APROVECHAMIENTO		PROFUNDIDAD (m)		
PROFUNDIDAD C.B. (m)		MUNICIPIO	SALINAS	Ø ADEME (")		
DIAMETRO (")				Ø DESCARGA (")	2.5 "	
COORDENADAS		LOCALIDAD		N.E. (m)	15.52	
X	Y	PROPIETARIO Ivan González				
208,747	2497057	GASTO PROMEDIO (lps)				
TIEMPO					N.D. (m)	ABATIMIENTO (m)
DIAS	HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS			
	0	0	0		15.52	0
0.0009	0.023	1.35	81		17.75	2.230
0.0017	0.042	2.5	150		18.18	0.430
0.0018	0.044	2.63	157.8		18.27	0.090
0.0024	0.058	3.45	207		18.47	0.060
0.0027	0.064	3.83	229.8		18.53	0.060
0.0035	0.083	5	300		18.04	0.490
0.0069	0.167	10	600		19.65	1.610
0.0104	0.250	15	900		20.33	0.680
0.0208	0.500	30	1800		22.22	1.890
0.0417	1.000	60	3600		24.75	2.530
0.0625	1.500	90	5400		37.26	12.510
0.0729	1.750	105	6300		37.45	0.190
0.0833	2.000	120	7200		37.49	0.040
0.0903	2.167	130	7800		37.49	0.000
0.0972	2.333	140	8400		37.50	0.010
0.1111	2.667	160	9600		37.43	0.070
0.1250	3.000	180	10800		37.39	0.040
0.1458	3.500	210	12600		37.48	0.090
0.1667	4.000	240	14400		37.36	0.120
0.1875	4.500	270	16200		37.40	0.040
0.2083	5.000	300	18000		37.37	0.030
0.2292	5.500	330	19800		37.35	0.020
0.2778	6.667	400	24000		37.25	0.100

3.3.5 Duración de la prueba

No es conveniente fijar una duración para todas las pruebas de bombeo, esta debe fijarse de acuerdo con los objetivos perseguidos, al análisis de la información recopilada, a la distancia a la que se encuentran los pozos de observación y a los datos obtenidos durante la prueba. Adicionalmente, el tiempo de bombeo depende del tipo de acuífero, grado de exactitud deseada para evaluar sus características hidráulicas y condiciones propias del pozo de extracción, es deseable que el bombeo se prolongue hasta alcanzar condiciones de flujo permanente (CONAGUA, 2007).

En las pruebas de bombeo que se programan para determinar las características hidráulicas del acuífero con pozos de observación adecuadamente ubicados, en la mayoría de los casos son suficientes 24 horas de bombeo. La duración puede alargarse hasta unos seis días, dependiendo de la distancia a que se encuentren las barreras del pozo de bombeo y de la velocidad de propagación del cono de abatimiento. Puesto que las estabilizaciones del nivel piezométrico son casi siempre aparentes, es necesario prolongar el bombeo hasta conseguir la respuesta real del tipo de acuífero, en particular que permita interpretar correctamente la prueba. Por lo anterior, es conveniente hacer la gráfica y analizar los resultados en el campo, de forma simultánea a la realización de la prueba, de esta manera se evita prolongar innecesariamente la prueba o finalizarla antes de tiempo (Conagua, 2007).

Al finalizar el bombeo, se deben tomar las medidas de recuperación, con la misma secuencia de tiempos utilizada durante la etapa de abatimiento. La duración de esta etapa depende del tiempo de bombeo y normalmente no es necesario superar el tiempo de bombeo (Conagua, 2007).

3.3.6 Interpretación de los datos

Para poder interpretar las pruebas de bombeo, es necesario identificar de qué tipo de acuífero se trata.

Para poder identificar el tipo de acuífero se deben utilizar las gráficas de logaritmo del tiempo y/o abatimiento con respecto al logaritmo del tiempo (Figura 24.)

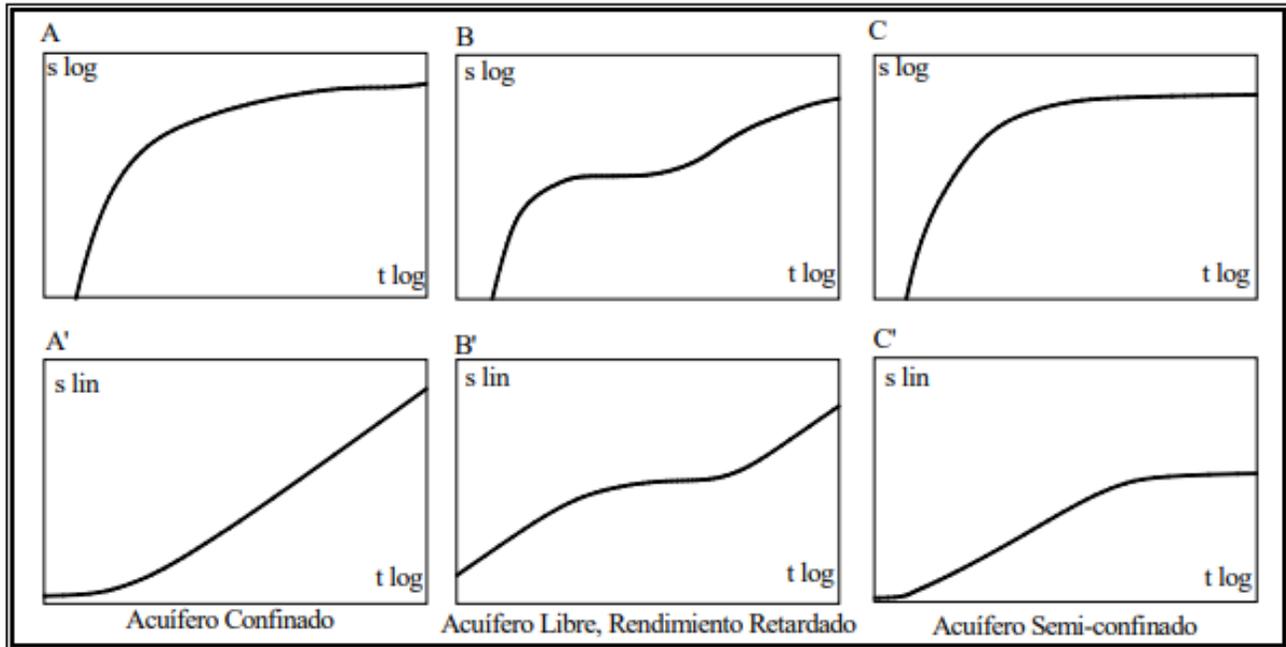


Figura 24. Graficas logarítmicas y semilogarítmicas de las relaciones teóricas tiempo-abatimiento para acuíferos sin consolidar (Kruseman, 1990).

La identificación de sistemas se realiza mediante modelos conceptuales, cuyas características se supone que representan el acuífero que se está probando. Los modelos conceptuales teóricos incluyen establecer el tipo de acuífero y las condiciones iniciales y de frontera. En una prueba de acuífero estos constituyentes tienen una influencia directa sobre el comportamiento del abatimiento. con los datos disponibles de los pozos, y se define que metodología se usará para realizar la interpretación de la prueba. El modelo incluye niveles de agua, espesor del acuífero, nivel dinámico estabilizado, distancias a pozo de observación, medios geológicos de la zona, diámetro de ademe, diámetro del pozo entre otros.

3.3.7 Pruebas de bombeo realizadas en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo

Para las 2 pruebas de bombeo realizadas en estudio (Figura 20), preliminarmente se infirió que correspondían a un acuífero libre, ya que, con base en los estudios de geofísica y de geología que se realizaron para el acuífero administrativo de Salinas y según el comportamiento del pozo durante la prueba arrojaban estos resultados preliminares.

En este caso, para las 2 pruebas realizadas para este estudio, el tiempo aproximado de bombeo fue de un poco más de 6 horas.

No se cuentan con pozos de observación en ningún caso, por lo tanto, solo se lograron hacer las mediciones en los pozos de bombeo.

Actualmente, existen herramientas que ayudan en la interpretación de las pruebas, haciendo de manera automática el ajuste de las curvas de abatimiento por diferentes métodos según el tipo de acuífero. Para iniciar el procedimiento de análisis de pruebas de bombeo, se utilizó el programa de computo AcuiferTest 10.0 el cual fue desarrollado y es distribuido por la empresa Waterloo Hydrogeologic.

Para poder llevar a cabo la prueba, se requieren algunos datos generales de la prueba y del tipo de acuífero que se está analizando, así como datos generales del pozo donde se llevó a cabo la prueba los cuales se muestran en la figura 25 para el pozo C1 y en la figura 26 para la Noria C7.

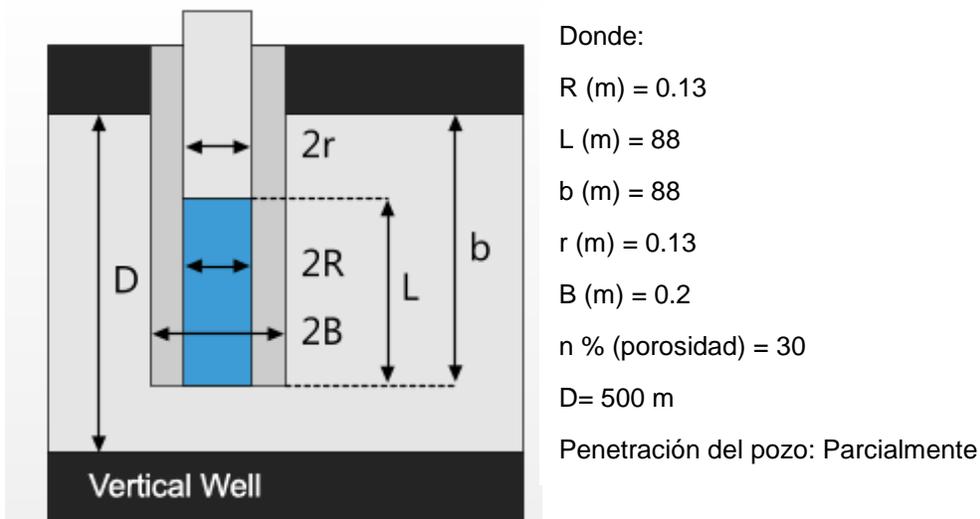
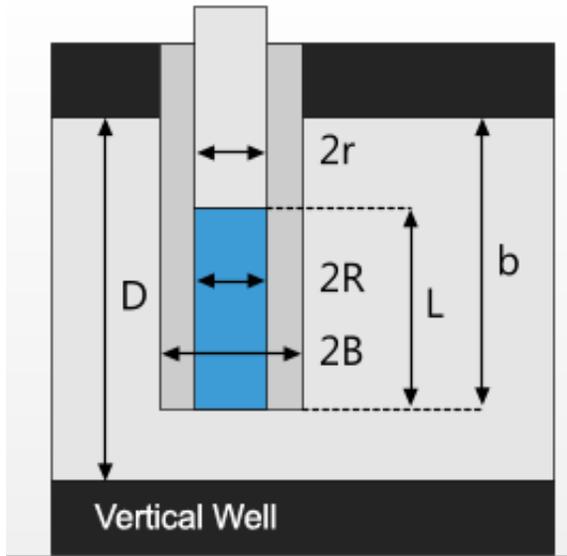


Figura 25. Datos generales del Pozo C1



Donde:

$$R \text{ (m)} = 0.15$$

$$L \text{ (m)} = 98$$

$$b \text{ (m)} = 98$$

$$r \text{ (m)} = 0.15$$

$$B \text{ (m)} = 0.25$$

$$n \text{ \% (porosidad)} = 38$$

$$D = 500 \text{ m}$$

Penetración del pozo: Parcialmente

Figura 26. Datos generales de la Noria C7.

Posteriormente se colocan los valores de descarga del caudal extraído durante la prueba y los niveles de agua, abatimientos y los intervalos de tiempo en los que se midieron los niveles.

Una vez que se ingresaron los niveles del agua se procede con el ajuste de las curvas de abatimiento (Figura 27 para el pozo C1 y Figura 28 para la noria C7). Como se mencionó anteriormente, en ambos casos se trabajó con acuíferos libres y el programa contiene diferentes métodos para el ajuste de las curvas y finalmente se eligió el método de Neuman, el cual es comúnmente utilizado para este tipo de acuíferos.

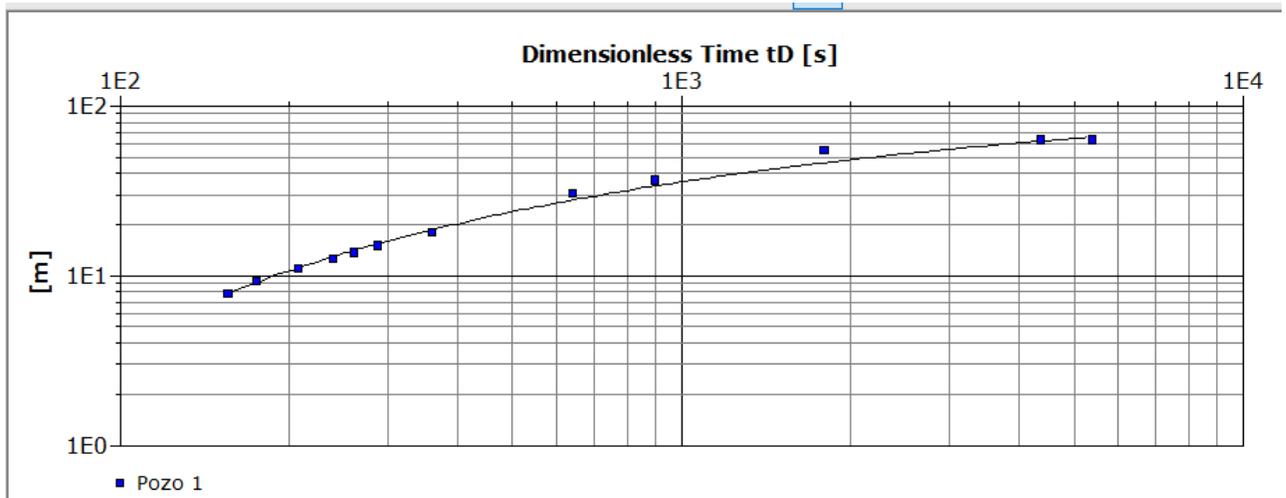


Figura 27. Curva de abatimiento del Pozo C1.

De este análisis se obtuvo la transmisividad (T), la cual se utiliza para poder obtener la conductividad hidráulica (K)

- **Transmisividad (T) = $1.09 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$**

Para este análisis se consideró un espesor del acuífero de 88 m, por lo tanto:

$$K = \frac{T}{b}$$

$$K = \frac{1.09 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{88 \text{ m}}$$

K = $1.24 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ para el pozo C1

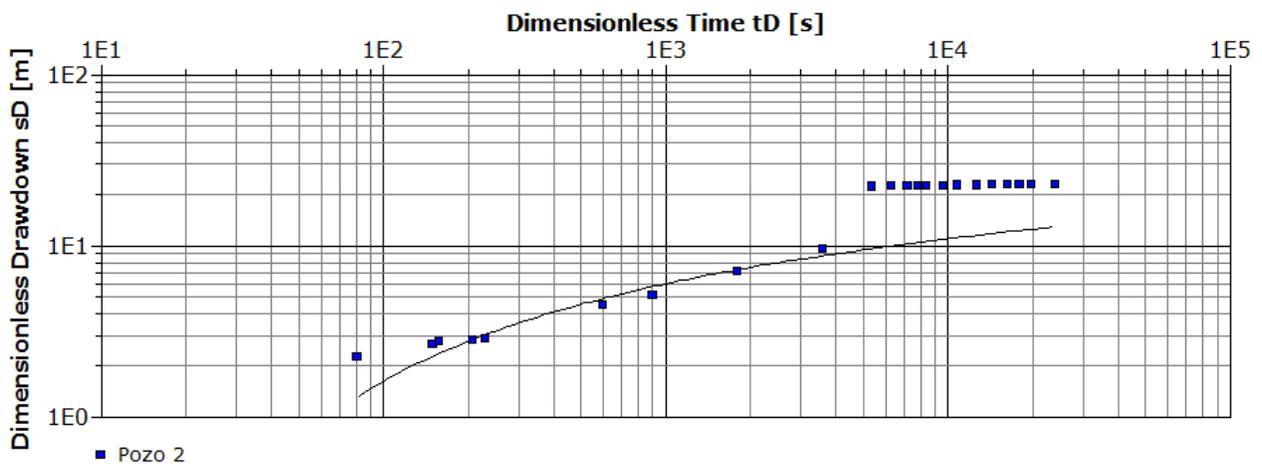


Figura 28. Curva de abatimiento de la Noria

De este análisis se obtuvo la transmisividad (T), la cual se utiliza para poder obtener la conductividad hidráulica (K)

- **Transmisividad (T) = $8.31 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$**

Para este análisis se está considerando un espesor del acuífero de 98 m, por lo tanto:

$$K = \frac{T}{b}$$

$$K = \frac{8.31 \times 10^{-5} m^2/s}{98 m}$$

K= 8.48 x 10⁻⁷ m/s para la Noria C7

Los 2 resultados de conductividad obtenidos en este análisis de prueba de bombeo, son resultados preliminares, es decir, se utilizaron para iniciar con la interpretación de las pruebas con un método numérico, esto se debe a que los resultados arrojados por el programa AcuiferTest, no son tan precisos y necesitan un ajuste en las curvas de abatimiento las cuales se realizan por medio del método antes mencionado.

Con la finalidad de intentar mejora la interpretación de prueba de acuífero mediante métodos analíticos, las pruebas pueden interpretarse utilizando un modelo de dos capas y flujo radial al pozo. Este método numérico permite tomar en cuenta el control geológico al flujo subterráneo y en forma paralela definir aspectos hidráulicos del pozo y del acuífero aprovechado. A diferencia de los métodos analíticos convencionales, el modelo de flujo radial de dos capas permite anexar de manera simple, al mismo tiempo en la interpretación (si es el caso):

- Gasto de extracción variable,
- Radio del pozo,
- Efectos de penetración parcial,
- Presencia de componentes verticales del flujo subterráneo,
- Variaciones laterales de las propiedades hidráulicas y
- Anisotropía de los materiales geológicos,
- Cambio de acuífero confinado a libre por efecto del abatimiento en las inmediaciones del pozo.

Una ventaja adicional es que el modelo de dos capas permite integrar todos los conceptos previos dentro del marco de referencia que brinda un conocimiento adecuado y deseable de la geología del subsuelo en las inmediaciones del sitio en donde se desarrolló el experimento de bombeo. Muchos de los conceptos que afectan significativamente la respuesta de un acuífero sujeto a bombeo por un pozo no han sido incluidos en las soluciones analíticas clásicas (curvas tipo). Sin embargo, cuando éste es el caso los métodos numéricos pueden ser usados para representar el comportamiento particular de un acuífero o, incluso, un sistema acuífero.

Los factores que se incluyen en el modelo numérico son de particular importancia, en especial es de notar que esta solución considera el marco geológico y las condiciones de campo en las cuales las pruebas se realizan, estos son:

- Radio finito del pozo
- Almacenamiento de agua en el pozo
- Variaciones en el caudal de extracción
- Recuperación (extracción cero)
- Barreras externas impermeables y de carga constante (recarga)
- Variación del espesor saturado
- Conductividad hidráulica que varía horizontalmente
- Conductividad hidráulica que varía con la profundidad
- Coeficiente de almacenamiento que varía horizontalmente
- Coeficiente de almacenamiento que varía con la profundidad
- Condiciones semiconfinadas
- Recarga intermitente
- Respuesta de drenado retardado
- Pérdidas de pozo no lineales
- Aporte de zonas fracturadas
- Penetración parcial
- Cambio de condiciones confinadas a libres

De acuerdo con Rathod y Rushton (1991), este modelo de flujo radial fue proyectado inicialmente para el cálculo de abatimientos con respecto al tiempo, producto del

bombeo de un pozo en un acuífero en el que sus parámetros hidráulicos eran conocidos. Posteriormente, se comenzó a aplicar de manera inversa; es decir a partir del conocimiento de la distribución de los abatimientos registrados en un pozo de bombeo y su relación con el tiempo de bombeo, para estimar por medio de ensayo y error, los valores de los parámetros hidráulicos del acuífero analizado. Cuando se utiliza de esta manera, la utilización del modelo de flujo radial de dos capas es equivalente a la interpretación convencional de una prueba de bombeo por medio de métodos convencionales (analíticos).

La base de la aproximación numérica de Rathod y Rushton (1991) es la resolución de la ecuación diferencial de flujo dependiente del tiempo, por medio de un esquema de diferencias finitas. La discretización del campo de flujo hacia el pozo se realiza por medio de una malla radial, cuyos intervalos se incrementan logarítmicamente desde el centro del pozo de bombeo hasta la frontera lateral. Por los requerimientos de la aproximación utilizada, en las inmediaciones del pozo de bombeo el espaciamiento en la malla es pequeño, incrementándose paulatinamente en dirección hacia la frontera exterior. El tiempo también se fracciona de manera logarítmica en pasos discretos.

Una vez que se tienen las características del medio hidrogeológico (espesor, propiedades hidráulicas), del pozo (dimensiones, pérdidas por entrada, gasto de extracción) y el tiempo de extracción, el modelo realiza el cálculo de los abatimientos, procedimiento que se lleva a cabo resolviendo, por métodos de matrices simples, las ecuaciones simultáneas resultantes para cada intervalo de tiempo. Los abatimientos son calculados en cada uno de los nodos, se realizan en la superficie freática y a una distancia de 0.25 el espesor saturado, por arriba de la base del acuífero. Como lo establecen Rathod y Rushton (1991) la metodología que se utiliza para la interpretación de las pruebas de acuífero mediante métodos numéricos consiste en: i) la identificación del modelo conceptual del flujo de agua subterránea hacia el pozo analizado, ii) adaptación e implementación del modelo conceptual al modelo numérico de dos capas, iii) incorporación de la información obtenida de la geología del subsuelo (geometría) iv) utilización de los parámetros

hidráulicos estimados con los métodos de curvas tipo (primera aproximación), tiempo y gasto de bombeo. La técnica de calibración utilizada establece que, por medio de ensayo y error, deben realizarse modificaciones a los valores de conductividad hidráulica inicial, hasta lograr un ajuste razonable de los resultados (s-t) calculados por el modelo con relación a los datos s-t medidos en campo.

Existe un gran número de condiciones hidrogeológicas que pueden afectar la dinámica del flujo del agua cuando un pozo es bombeado, entre otras, destacan las componentes verticales (de flujo) en la vecindad del pozo. Esta componente se puede establecer como en el caso de un acuífero confinado el cual es explotado por un pozo que sólo tiene rejilla en su parte inferior. Cuando el pozo está en un acuífero libre con tubería ranurada en la parte inferior, las componentes verticales son resultado del agua de respuesta del drenado retardado como del agua que se desprende del almacenamiento del nivel superior de saturación. En el caso de un acuífero semiconfinado a través de un acuitardo (de baja conductividad hidráulica vertical), aquí los patrones de flujo son complejos, tanto para las componentes verticales como, para las horizontales. El flujo es definitivamente vertical a través de la capa de baja conductividad hidráulica. Estos ejemplos muestra la importancia de las componentes horizontales y verticales de flujo, por lo que es imprescindible considerarlas en todos aquellos casos donde las condiciones geológicas, e hidráulicas, así lo indiquen (Cardona, 2018).

3.3.8 Parámetros de los modelos de dos capas

El modelo de dos capas considera conceptualmente la presencia de dos capas permeables horizontales, ambas con una capa impermeable intermedia y otra inferior. El modelo conceptual se puede aplicar a distintas condiciones geométricas, así como a sistemas libres, confinantes y semiconfinante (Figura 29).

Las distancias entre las capas y el espesor de cada zona se miden verticalmente hacia abajo a partir del nivel estático (RWL) y a cada uno de los componentes:

- Cima de la capa superior (TPOL)
- Cima del acuífero superior o base de la capa superior (TPUP)
- Base del acuífero superior o cima del acuitardo (BSUP)
- Cima del acuífero inferior (confinado) o base del acuitardo (TPLO)
- Base del acuífero inferior o profundidad al basamento (BSLO)

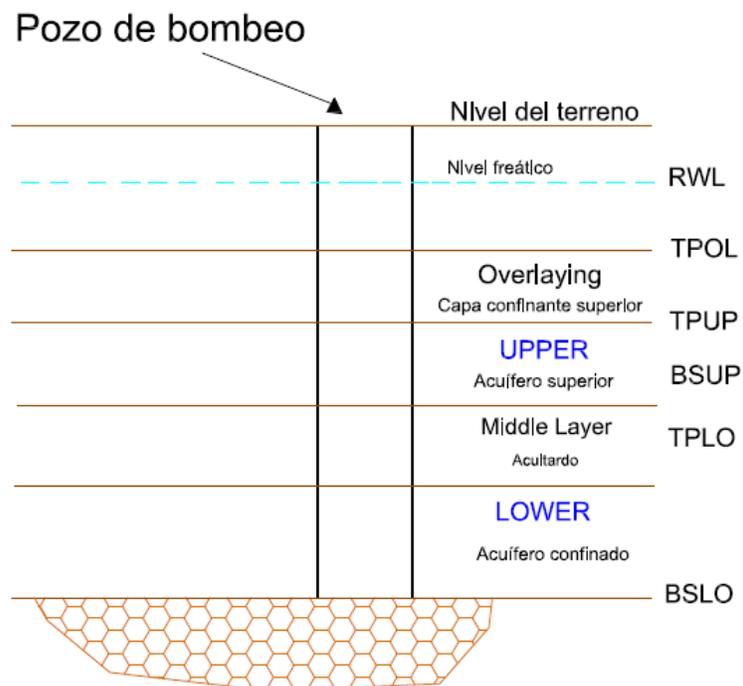


Figura 29. Modelo conceptual del modelo numérico de dos capas. Adaptado de (Rathod & Rushton, 1991) y (Cardona, 2018).

Con el modelo conceptual previamente analizado en AquiferTest y completado con algunos datos faltantes y el cual se muestra en la figura 30 para el pozo C1 y la figura 31 para la Noria C7, el siguiente paso corresponde en adaptar los modelos conceptuales al modelo numérico.

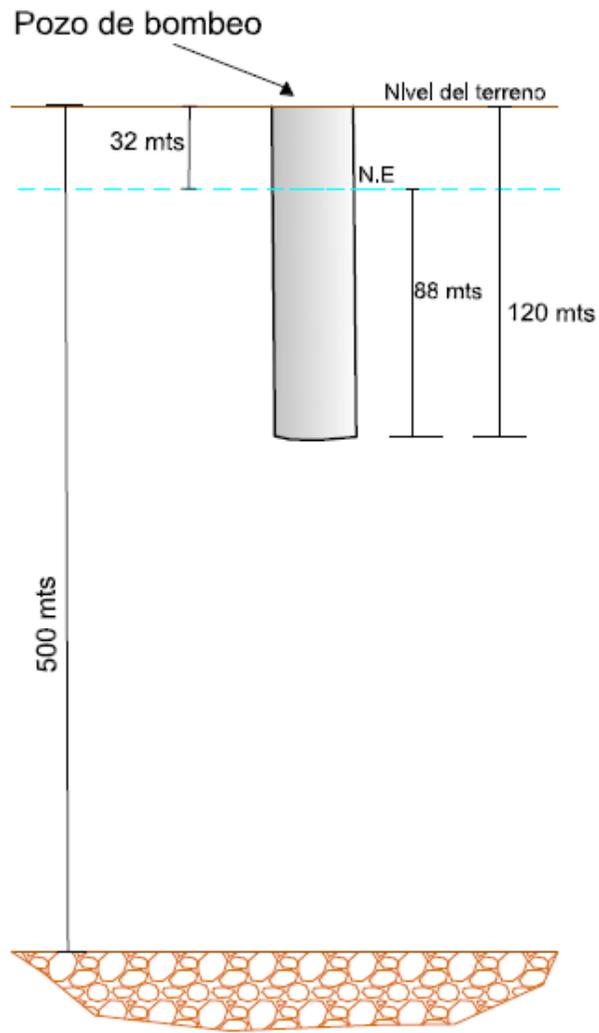


Figura 30. Modelo conceptual de la prueba de bombeo, pozo C1.

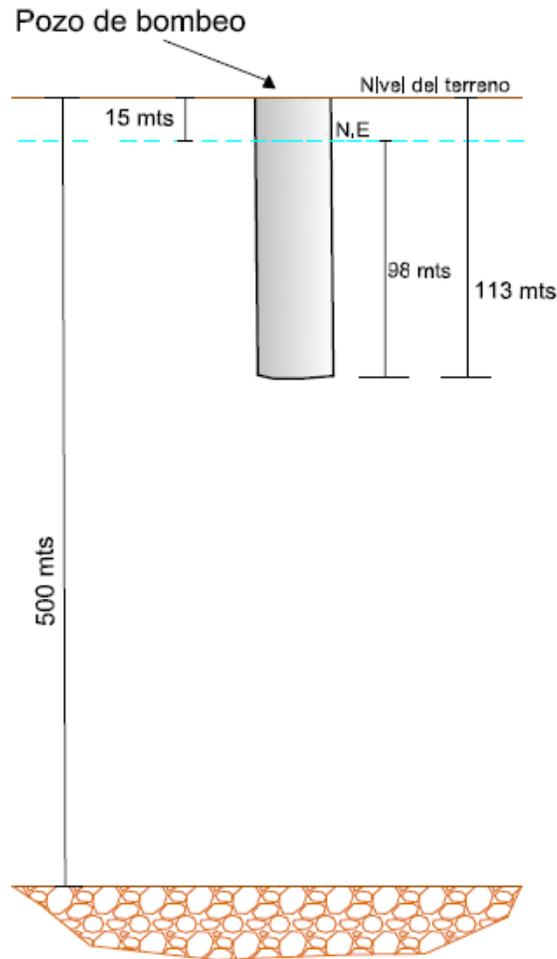


Figura 31. Modelo conceptual de la prueba de bombeo, Noria C7.

Es importante mencionar que las profundidades de los 2 pozos son un aproximado, ya que los dueños de los pozos no conocían con exactitud este dato, y con respecto a la profundidad del basamento, se tomaron los 500 m que fueron obtenidos de las profundidades de las secciones geofísicas.

Para el análisis de la prueba utilizando el modelo numérico, primero se deben adaptar los modelos conceptuales de las figuras 30 y 31 a los modelos conceptuales de dos capas adaptando la geometría de las variables de la figura 29. Los modelos finalmente adaptados se muestran en las figuras 32 y 33.

Como se trata de un acuífero libre, el dato RWL, TPOL y TPUP se ubica en la misma posición de la superficie piezométrica (figura 32 y 33) que en este caso es el nivel freático (por eso los tres primeros números son cero). El modelo conceptual implica un solo acuífero libre, que está formado por dos capas. Para que las dos capas del acuífero formen uno solo, el dato BSUP Y TPLO están a 88 y 98 m respectivamente a partir del nivel freático, de tal manera que este espesor representa la zona saturada del acuífero, mientras tanto, la capa denominada *Middle layer* es cero.

Utilizando los modelos conceptuales de ambos pozos, se continua con la base de datos del modelo de dos capas el cual cuenta con los siguientes datos:

- Radio del pozo:
Pozo C1: 0.13 m
Noria C7: 0.15 m
- Duración de la prueba:
Pozo C1: 0.28 días (6.7 horas)
Noria C7: 0.27 días (6.6 horas)
- Conductividad Hidráulica vertical:
Pozo C1: 0.010 m/día (1.24×10^{-7} m/s)
Noria C7: 0.073m/dia (8.24×10^{-7} m/s)
- Conductividad Hidráulica horizontal:
Pozo 1: 0.010 m/día (1.24×10^{-7} m/s)
Noria C7: 0.073m/dia (8.24×10^{-7} m/s)
- Caudal extraído durante la prueba:
Pozo 1: 241.9 m³/día (2.8 litros/s)
Noria C7: 198.7 m³/día (2.3 litros/s)
- Coeficiente de almacenamiento: 0.0007 para ambos pozos.

Nota: Las conductividades hidráulicas iniciales son las que se obtuvieron por medio del modelo de AquiferTest y el coeficiente de almacenamiento es de la bibliografía de acuerdo con un valor considerado dentro del rango para los acuíferos de flujo libre.

De acuerdo con los requerimientos del programa (que se denomina MODUNO.EXE) los datos anteriores deben colocarse en un archivo de línea denominado example.dat ambos ubicados en el mismo directorio. El programa MODUNO.EXE está escrito en BASIC y corre en ambiente MS-DOS, generando varios archivos TWZN.OUT que tiene toda la información, y los archivos MODEL A.OUT, MODEL B.OUT, MODEL 1A.OUT y MODEL 1B.OUT, únicamente tiene los datos de abatimiento y tiempo para el pozo de bombeo en el acuífero superior e inferior. Una vez que se corre el programa estos archivos se pueden manejar en un programa como Excel para comparar los datos de campo con relación a los datos del modelo (Cardona, 2018).

Finalmente, después de correr el programa con base en la metodología de prueba y error y modificando conductividades hidráulicas, se obtuvieron las 2 gráficas finales (figura 34 para pozo C1 y figura 35 para Noria C7), las cuales representan el mejor ajuste.

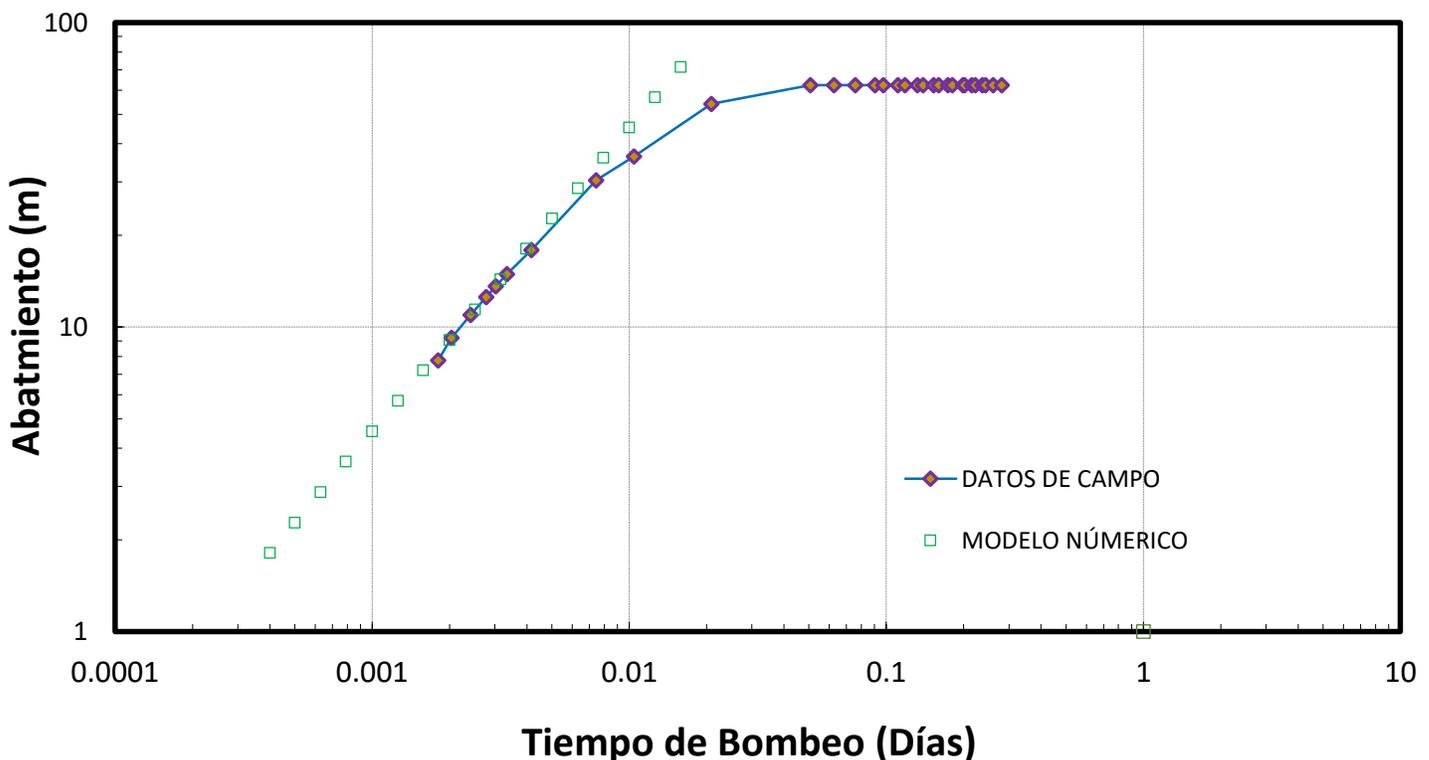


Figura 34. Ajuste de curva de abatimiento con el modelo numérico para pozo C1

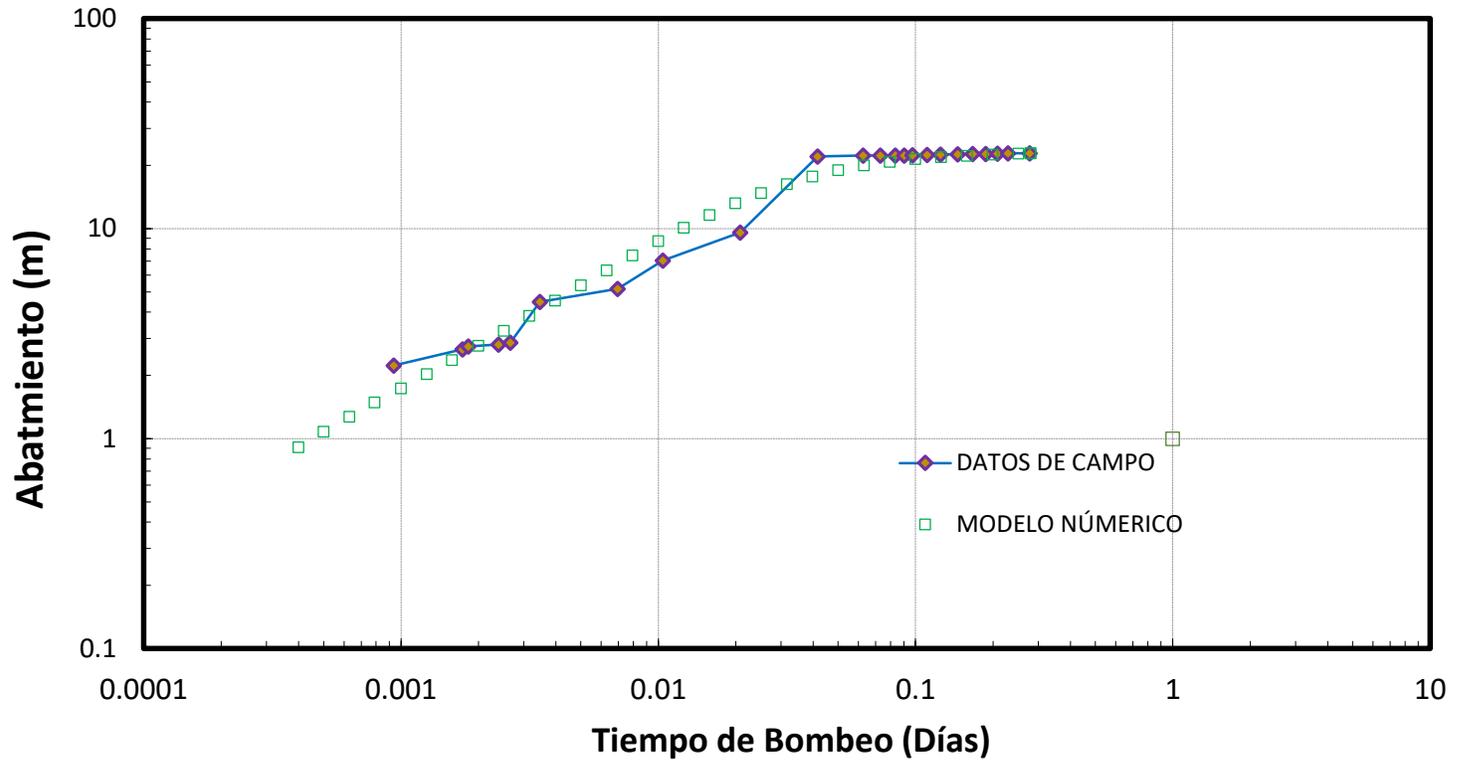


Figura 35. Ajuste de curva de abatimiento con el modelo numérico para Noria C7

Haciendo una comparación con las gráficas de ajuste entre el modelo de AquiferTest y el modelo numérico de dos capas, ese último realiza un mejor ajuste, debido a que permite variar los espesores de los estratos y los parámetros hidrogeológicos a lo largo de la prueba, especialmente en los puntos intermedios. Como se ha mencionado, el modelo numérico permite incluir diferentes parámetros hidrogeológicos para las dos capas del acuífero, y en las partes intermedias de estos, en este caso, solo se realizó el ajuste a las dos capas (upper y lower) por la configuración y el tipo de acuífero.

Entre más información se conozca de la zona de proyecto, el modelo conceptual elaborado será más completo, cercano a la realidad y permitirá hacer un mejor análisis de la prueba de bombeo. Los aumentos repentinos de abatimientos en poco tiempo, o mantenerse sin abatimiento, son aspectos relevantes que pueden asociarse a medios geológicos con conductividad hidráulica muy pequeña o grande, lo cual puede incluirse por la versatilidad de este modelo numérico y buscar que los datos se puedan ajustar lo más posible a los de campo.

Considerando los resultados del modelo numérico, se tienen como conductividades hidráulicas finales para la prueba de bombeo del pozo C1 $1.16 \times 10^{-9} m/s$ y $4.05 \times 10^{-6} m/s$ para Noria C7.

Estos resultados se tomaron como conductividades iniciales para el modelo numérico de flujo de agua subterránea y así poder continuar con la calibración y ajuste del modelo.

3.4 Diseño

Se entiende por modelo de un acuífero el procedimiento analítico, matemático o analógico, que permite realizar la simulación de su comportamiento. Un modelo es una representación del sistema real y puede reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que los relacionan, (Custodio y Llamas, 1996).

El modelo matemático utilizado para el análisis del flujo del agua subterránea en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, es el que está dado por la ecuación básica en derivadas parciales que describe el movimiento tridimensional del flujo de agua subterránea de densidad constante a través de un medio poroso saturado, resuelta por el código de simulación MODFLOW, resuelta por una combinación matemática entre las ecuaciones de balance de masa de flujo en un medio poroso saturado (ecuación de continuidad) y la ley de Darcy:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

K: representa la conductividad hidráulica en las direcciones horizontales (x,y) y vertical (**z**).

h: representa la carga hidráulica

W: es el flujo volumétrico por unidad de volumen

Ss: es el coeficiente de almacenamiento específico del medio

t: representa el tiempo.

La ecuación anterior, junto con las condiciones iniciales, describe el movimiento tridimensional del agua subterránea a través de un medio poroso, saturado, heterogéneo y anisotrópico, variable en el tiempo y la cual ha sido resuelta mediante el método de diferencias finitas. En este enfoque, el problema en un dominio continuo se “discretiza” de tal manera que las variables dependientes existen solo

en puntos discretos. Las derivadas se aproximan mediante diferencias, lo que da origen a una representación algebraica de las ecuaciones diferenciales parciales. MODFLOW resuelve la ecuación utilizando el esquema numérico de diferencias finitas centradas en el espacio (centro celda), para lo cual el sistema de aguas subterráneas es sustituido por un conjunto finito y discreto de puntos en el espacio y en el tiempo, y de las derivadas parciales por diferencias de valores de la función h (carga hidráulica) en dichos puntos (Duran, 2012).

El proceso da como resultado un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales simultáneas. Su solución entrega el valor del nivel de agua en los puntos especificados en los instantes de tiempo elegidos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de valores en el tiempo que daría una solución analítica de la ecuación diferencial (Durán, 2012).

La figura 36 representa un acuífero de 3 x 3 celdas con una carga constante h_0 y donde, de la celda C se extrae un caudal de agua "Q", con esto se demuestra en forma general el funcionamiento del sistema de diferencias finitas.

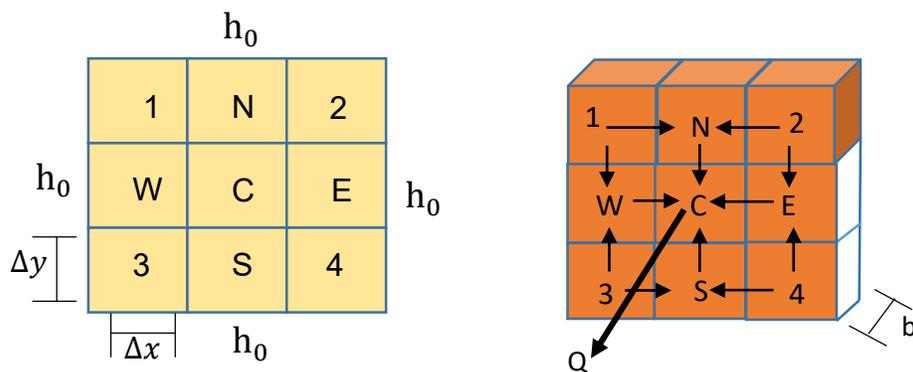


Figura 36. Representación de un sistema 3x3 celdas.

El desarrollo de la ecuación de flujo de diferencias finitas, resulta de aplicar la ecuación de continuidad a una celda, al sumar todos los flujos que entran y salen de una celda deben ser igual a la variación en el almacenamiento.

Así, mediante la Ley de Darcy, que describe el movimiento de una partícula líquida a través de medios porosos y se expresa $Q = K i A$, se puede establecer por continuidad:

Caudal que entra - Caudal que sale = Cambio en el almacenamiento

Por lo tanto, se puede establecer que para el nodo C:

$$Q_{wc} + Q_{ec} + Q_{nc} + Q_{sc} = SS \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \Delta x \Delta y b$$

Tomando en cuenta que:

$$Q = K * i * A$$

$$i = \frac{\partial h}{\partial L}$$

por lo tanto:

$$K_x \frac{h_w - h_c}{\Delta x} \Delta y * b + K_x \frac{h_E - h_c}{\Delta x} \Delta y * b + K_y \frac{h_N - h_c}{\Delta y} \Delta x * b + K_y \frac{h_S - h_c}{\Delta y} \Delta x * b = SS \frac{h_c^{j+1} - h_c^j}{\Delta T} \Delta x * \Delta y * b$$

j = instante inicial

$j+1 = t + \Delta t$

Considerando:

$$K_x = K_y$$

$$K * b = T$$

$$SS * b = S$$

Se obtiene:

$$T \frac{h_W - h_C}{\Delta x} \Delta y + T \frac{h_E - h_C}{\Delta x} \Delta y + T \frac{h_N - h_C}{\Delta y} \Delta x + T \frac{h_S - h_C}{\Delta y} \Delta x = SS \frac{h_C^{j+1} - h_C^j}{\Delta t} \Delta x * \Delta y$$

Dividiendo por $\Delta x * \Delta y$:

$$T \frac{h_W - h_C}{\Delta x^2} + T \frac{h_E - h_C}{\Delta x^2} + T \frac{h_N - h_C}{\Delta y^2} + T \frac{h_S - h_C}{\Delta y^2} = SS \frac{h_C^{j+1} - h_C^j}{\Delta t}$$

Multiplicando por $\frac{\Delta t}{S}$ y haciendo $\Delta x = \Delta y$:

$$\frac{T*\Delta t}{S*\Delta x^2} (h_W - h_C) + \frac{T*\Delta t}{S*\Delta x^2} (h_E - h_C) + \frac{T*\Delta t}{S*\Delta y^2} (h_N - h_C) + \frac{T*\Delta t}{S*\Delta y^2} (h_S - h_C) = h_C^{j+1} - h_C^j$$

Tomando en cuenta que $\Delta x = \Delta y$ y nombrando a $\frac{T*\Delta t}{S*\Delta x^2} = \lambda$

$$\lambda(h_W - h_C) + \lambda(h_E - h_C) + \lambda(h_N - h_C) + \lambda(h_S - h_C) = h_C^{j+1} - h_C^j$$

Para el instante j:

$$\lambda h_W^j - \lambda h_C^j + \lambda h_E^j - \lambda h_C^j + \lambda h_N^j - \lambda h_C^j + \lambda h_S^j - \lambda h_C^j = h_C^{j+1} - h_C^j$$

$$\lambda h_W^j + \lambda h_E^j + \lambda h_N^j + \lambda h_S^j - 4\lambda h_C^j = h_C^{j+1} - h_C^j$$

$$\lambda h_W^j + \lambda h_E^j + \lambda h_N^j + \lambda h_S^j - h_C^j(1 - 4\lambda) = h_C^{j+1}$$

Obteniendo de manera similar la ecuación de cada nodo se tiene:

Nodo 1.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_N^j + \lambda h_W^j + h_1^j(1 - 6\lambda) = h_1^{j+1}$$

Nodo N.

$$\lambda h_1^j + \lambda h_2^j + 2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + h_N^j(1 - 5\lambda) = h_N^{j+1}$$

Nodo 2.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_N^j + \lambda h_E^j + h_2^j(1 - 6\lambda) = h_2^{j+1}$$

Nodo W.

$$2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + \lambda h_1^j + \lambda h_3^j + h_W^j(1 - 5\lambda) = h_W^{j+1}$$

Nodo E.

$$2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + \lambda h_2^j + \lambda h_4^j + h_E^j(1 - 5\lambda) = h_E^{j+1}$$

Nodo 3.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_N^j + \lambda h_W^j + h_3^j(1 - 6\lambda) = h_3^{j+1}$$

Nodo S.

$$\lambda h_3^j + \lambda h_4^j + 2\lambda h_0^j + \lambda h_C^j + h_S^j(1 - 5\lambda) = h_S^{j+1}$$

Nodo 4.

$$4\lambda h_0^j + \lambda h_S^j + \lambda h_E^j + h_4^j(1 - 6\lambda) = h_4^{j+1}$$

Por lo tanto, la matriz resultante es:

$$\begin{matrix}
 & h_1 & h_N & h_2 & h_W & h_C & h_E & h_3 & h_S & h_4 \\
 \begin{bmatrix}
 1 - 6\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda & 1 - 5\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda & 1 - 6\lambda & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda & 0 & 0 & 1 - 5\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1 - 4\lambda & \lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1 - 5\lambda & 0 & 0 & 0 & \lambda \\
 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 1 - 6\lambda & \lambda & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1 - 5\lambda & \lambda & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1 - 6\lambda & \lambda \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & \lambda & 1 - 6\lambda
 \end{bmatrix}
 & \begin{bmatrix}
 h_1^j \\
 h_N^j \\
 h_2^j \\
 h_W^j \\
 h_C^j \\
 h_E^j \\
 h_3^j \\
 h_S^j \\
 h_4^j
 \end{bmatrix}
 & = & \begin{bmatrix}
 h_1^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\
 h_N^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_2^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\
 h_W^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_C^{j+1} \\
 h_E^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_3^{j+1} - 4\lambda h_0^j \\
 h_S^{j+1} - 2\lambda h_0^j \\
 h_4^{j+1} - 4\lambda h_0^j
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

3.5 Discretización espacial

La discretización espacial del área en planta (horizontal), se realizó mediante un arreglo de celdas rectangulares definidas con base en un número de filas y columnas entre los límites de la región de interés, que para acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo (Figura 37) son los siguientes (coordenadas UTM):

$X_1 = 193,600$, $Y_1 = 2'478,600$ (Límite inferior izquierdo)

$X_2 = 254,600$, $Y_1 = 2'478,600$ (Límite inferior derecho)

$X_1 = 193,600$, $Y_2 = 2'536,600$ (Límite superior izquierdo)

$X_2 = 254,600$, $Y_2 = 2'536,600$ (Límite superior derecho)

El modelo consistió de un área de 61 km (N-S) x 58 km (E-O) y fue discretizado mediante una malla de 120 columnas (508.33 m) y 116 renglones (500 m). Respecto a la discretización vertical, el modelo hidrogeológico está representado por 5 capas integradas por distintos medios geológicos. Los espesores de cada una de las capas fueron asignados con base en las secciones geológicas mencionadas anteriormente.

De acuerdo con las características geológicas, en algunas partes del acuífero las celdas fueron consideradas como inactivas, representando así, las fronteras de no flujo.

3.6 Discretización temporal

El rango de tiempo seleccionado para realizar la calibración fue de 7 años y 2 meses en régimen de flujo transitorio, considerando del 1 de enero de 2012 al 04 de febrero de 2019 (Figura 38 y 39).

Para el proceso de calibración, se establecieron 2 periodos de observación, uno para el año 2017 y otro para el año 2019, correspondientes a los días 1,995 y 2,590 respectivamente. Dichas fechas corresponden a los datos obtenidos en campo.

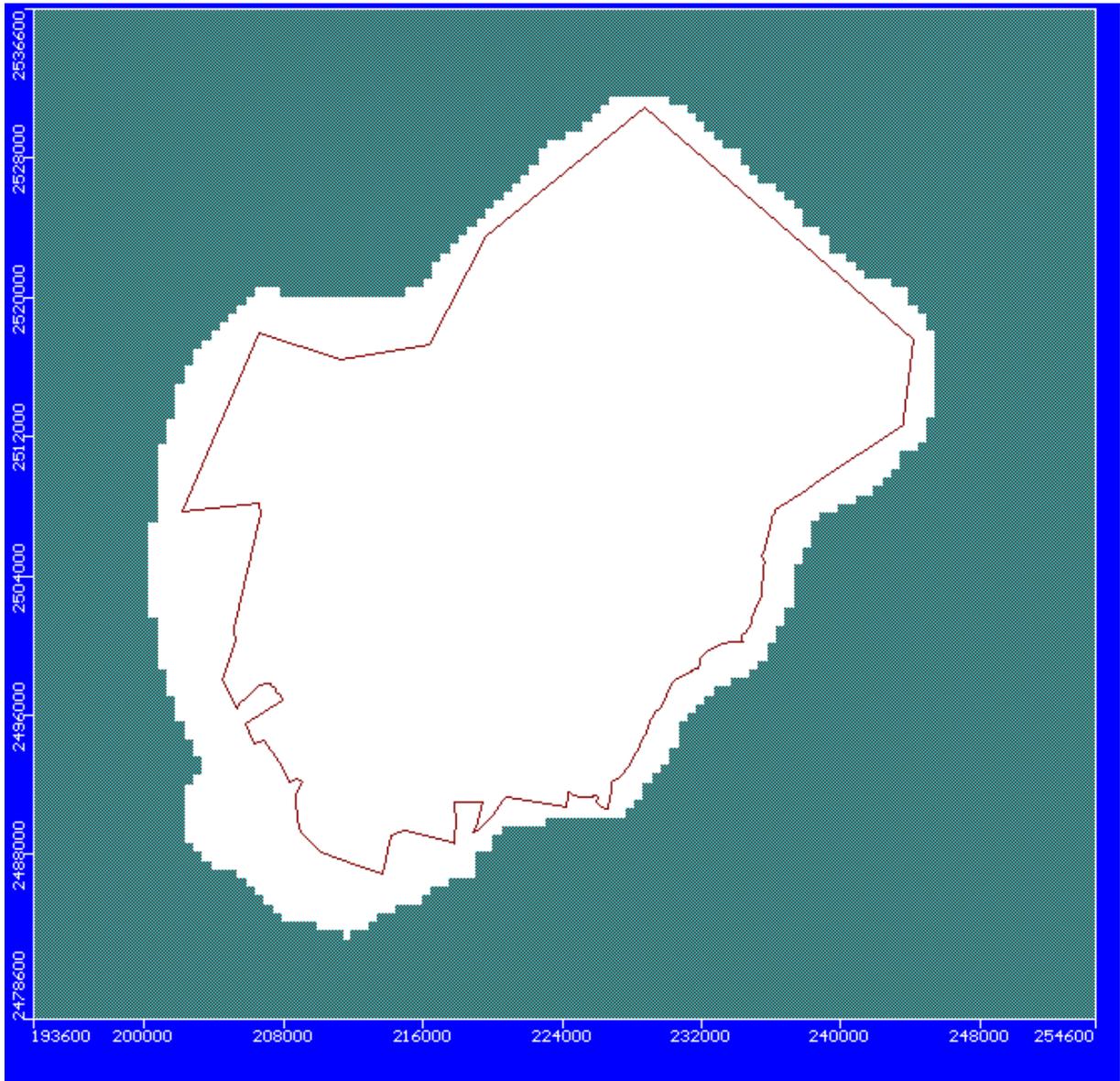


Figura 37. Discretización espacial del modelo (vista en planta).

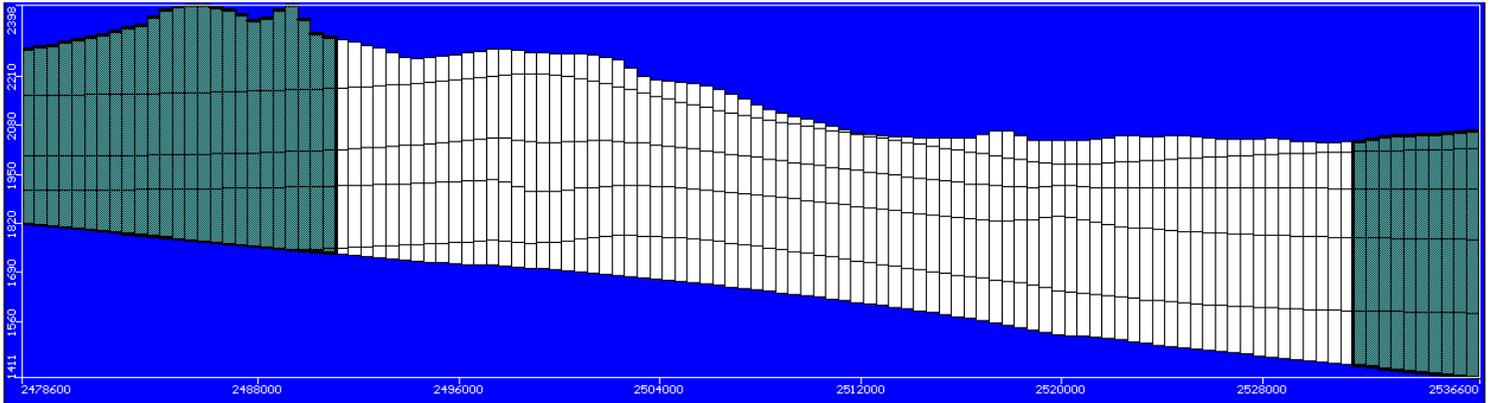


Figura 38. Discretización espacial del modelo. Vista en perfil (Columna)

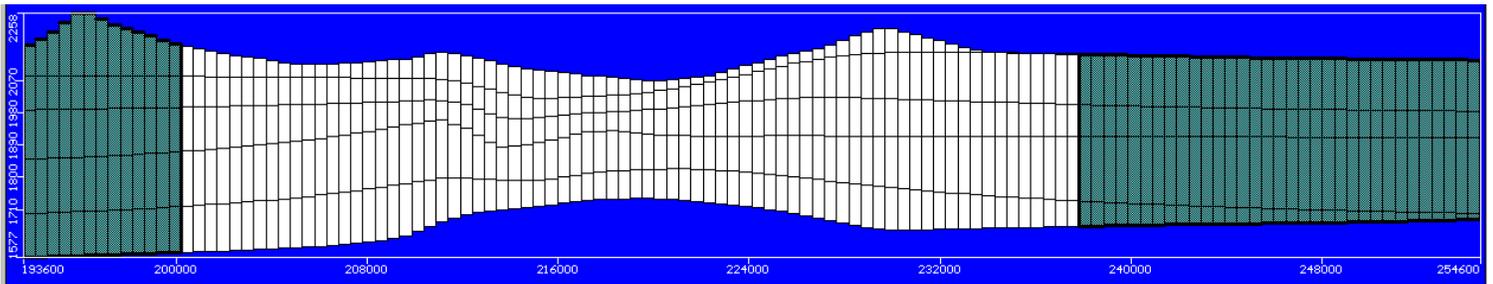


Figura 39. Discretización espacial del modelo. Vista en perfil (Renglón)

Para asignar la configuración geométrica de cada una de las capas, se realizó por medio de las elevaciones entre los espesores de los medios geológicos del acuífero. Dichas elevaciones se obtuvieron por medio de un modelo digital de elevación de la región de interés.

3.7 Conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento

Las propiedades hidráulicas iniciales que se muestran en la tabla 10 fueron asignadas en el proceso de calibración y corresponden a las conductividades hidráulicas (K) horizontales y verticales, el coeficiente de almacenamiento específico (Ss), rendimientos específicos (Sy), porosidades efectivas y porosidades totales. Cada tipo de roca y de suelo por el cual están formados los medios se presentan en las Figuras 40 a 44 respectivamente; inicialmente se clasificó en

medios geológicos los cuales, compartían características semejantes y éstos, a su vez, se clasificaron en 4 unidades hidrogeológicas, según su permeabilidad, esto con el fin de tener un modelo simplificado.

En el caso de las conductividades hidráulicas se les asignaron valores presentados por Sanders (1998), dicho trabajo presenta distintas bibliografías para diferentes tipos de medios geológicos, para este modelo numérico, se tomó como bibliografía Freeze *et al.* (1979) para caliza, lutita, arenisca, andesita, riolita y limolita, Domenico *et al.* (1998) para lacustre, granito y conglomerados; de la misma forma se realizó para los parámetros de almacenamiento, tomando en cuenta en el caso del coeficiente de almacenamiento específico (Ss) un valor considerado dentro del rango para los acuíferos de flujo libre.

En la tabla 13 se encuentran descritas las propiedades hidráulicas iniciales de los medios geológicos que se mencionan a continuación:

1. Medio permeable/medianamente permeable (Fm. Cuesta del cura, Fm. Las Joyas, Fm. La Peña, Fm. Cupido y Riolita Panalillo) (Capa 1,2,3,4 y 5)
2. Medio con muy baja permeabilidad (relleno sedimentario de arcillas) (Capa 1,2,3,4 y 5)
3. Medio permeable/medianamente permeable (Rocas ígneas) (Capa 1,2,3,4 y 5)
4. Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados) (Capa 1,2,3,4, y 5)
5. Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados con arcillas) (Capa 1,2,3,4, y 5)
6. Medio medianamente permeable/baja permeabilidad (Fm. Caracol, Fm. Taraises, Fm. Indidura) (Capa 1,2,3,4 y 5)

Tabla 13. Propiedades hidráulicas iniciales de los medios geológicos.

Zona	Conductividad		
	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
1	7.25E-4	7.25E-4	7.25E-5
2	4.6E-9	4.6E-9	4.6E-10
3	5.15E-4	5.15E-4	5.15E-3
4	5.82E-3	5.82E-3	5.82E-4
5	4.75E-3	4.75E-3	4.75E-3
6	4.05E-6	4.05E-6	5.6E-7

Zona	Almacenamiento			
	Ss (1/m)	Sy	Porosidad Efectiva	Porosidad Total
1	0.0007	0.18	0.3	0.35
2	0.0007	0.22	0.25	0.20
3	0.0007	0.17	0.26	0.35
4	0.0007	0.27	0.3	0.45
5	0.0007	0.23	0.3	0.45
6	0.0007	0.028	0.038	0.30

3.8 Régimen de bombeo

El régimen de bombeo de cada pozo se distribuyó diariamente con base en su concesión anual reportada en la base de datos del REPDA. Para determinar el bombeo anual se tomó la decisión de mantener la extracción constante para los años de la calibración, es decir, se extrajo la misma cantidad anual hasta el año 2019. Con base en esto, se decidió que los pozos trabajarían el año completo mediante el ajuste del caudal diario, obteniendo finalmente el agua extraída por cada pozo según el censo disponible.

En el anexo 3 se presenta el esquema inicial de bombeo establecido y utilizado para el proceso de calibración.

3.9 Pozos de observación

Los pozos de observación constituyen estaciones dedicadas exclusivamente al monitoreo, y se diseñan para detectar cambios potenciales del flujo y de la calidad del agua, sus parámetros de diseño incluyen profundidad de niveles y parámetros de calidad, entre otros (Tuinhof *et al.*, 2006).

Con el fin de realizar el proceso de calibración mediante el uso de los pozos de observación y comparando los niveles observados con los calculados por el sistema, se seleccionaron pozos y norias distribuidos en todo el acuífero y se les asignaron los valores de elevación del nivel estático correspondientes al año 2017 y 2019, medidos en campo en las campañas de monitoreo. Se utilizaron un total de 61 pozos de observación (Figura 45).

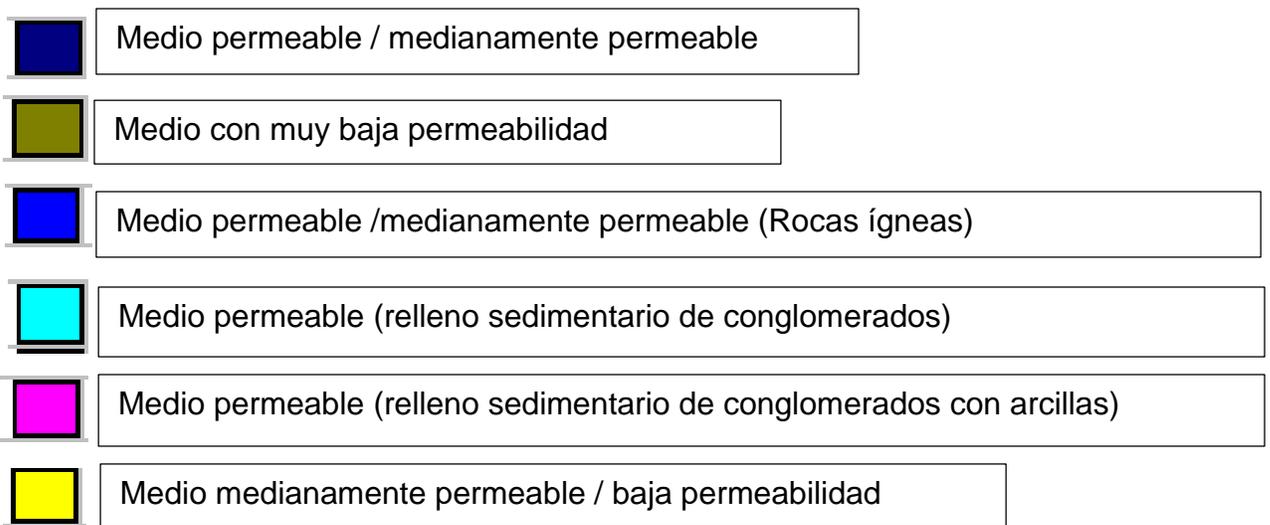
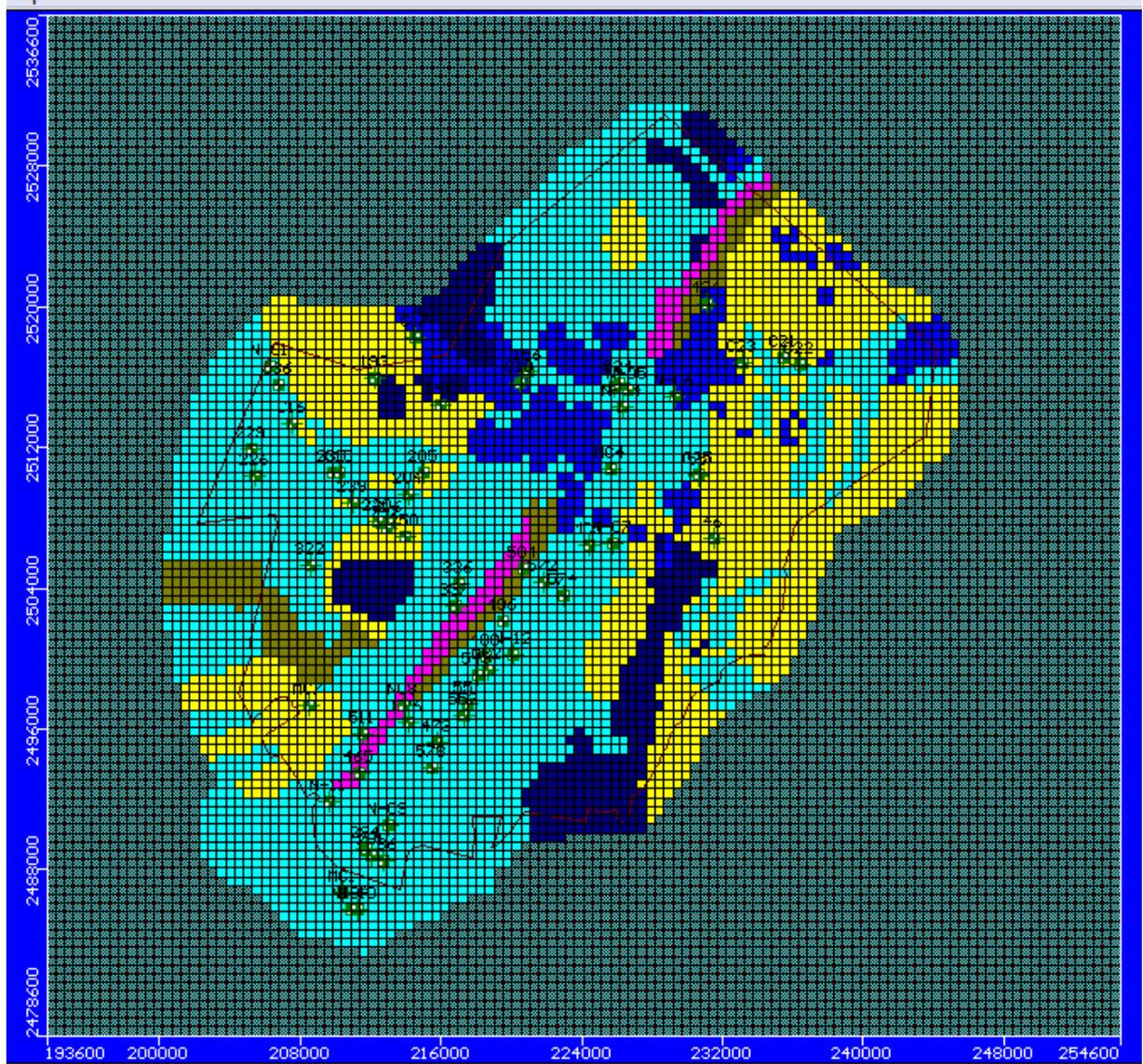


Figura 40. Distribución de los medios geológicos en capa superior (capa 1).

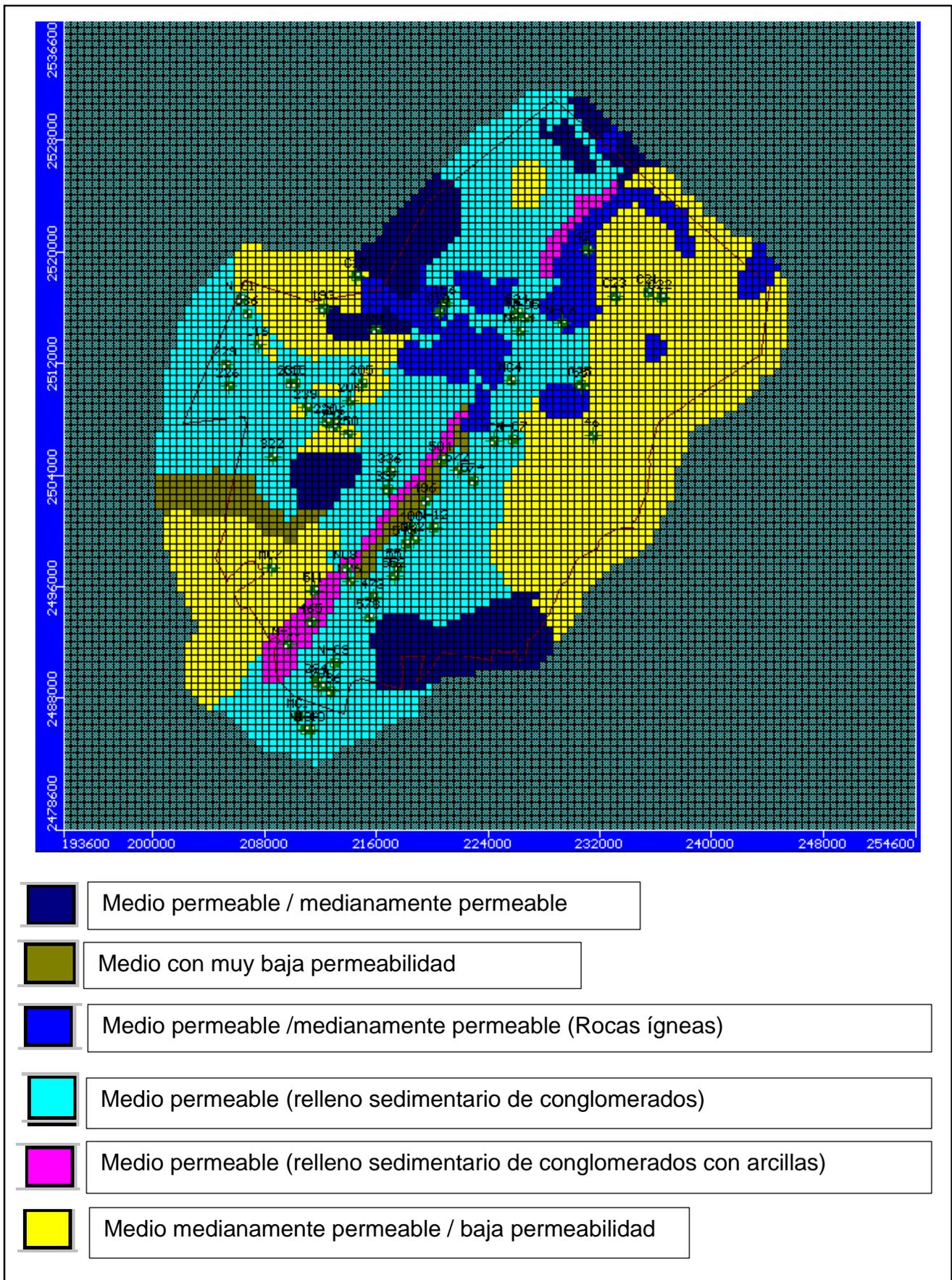
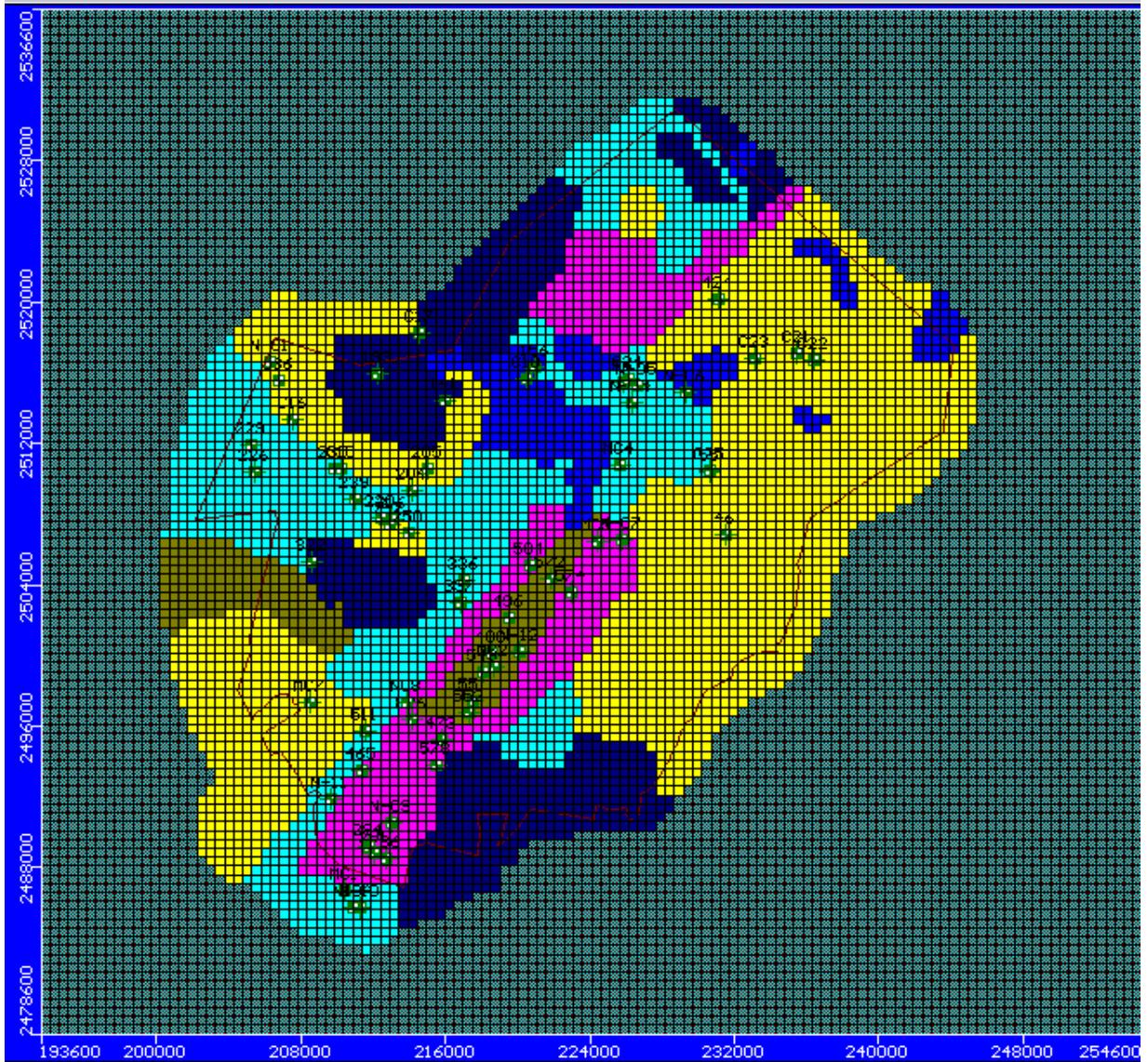
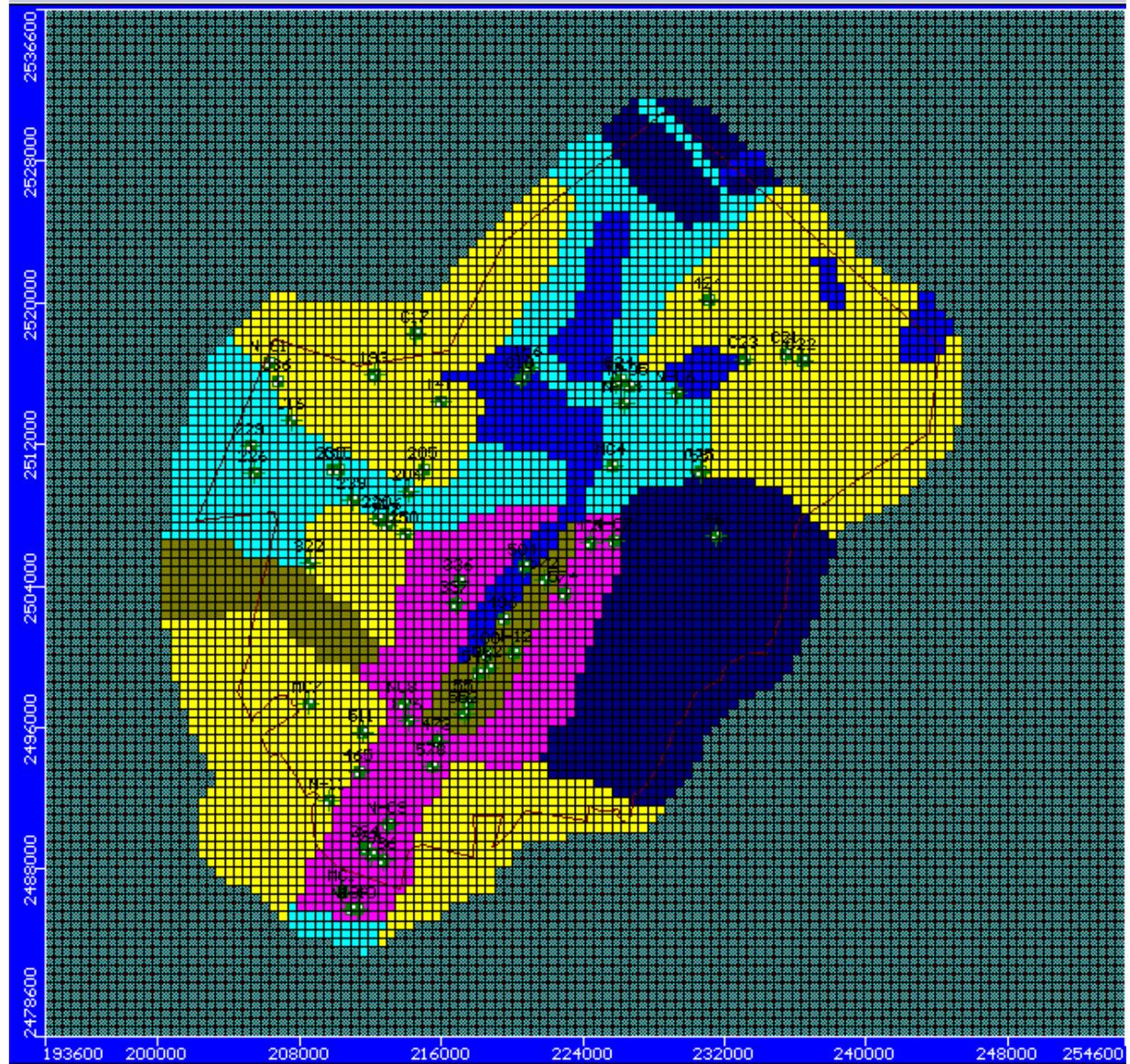


Figura 41. Distribución de los medios geológicos en la capa 2.



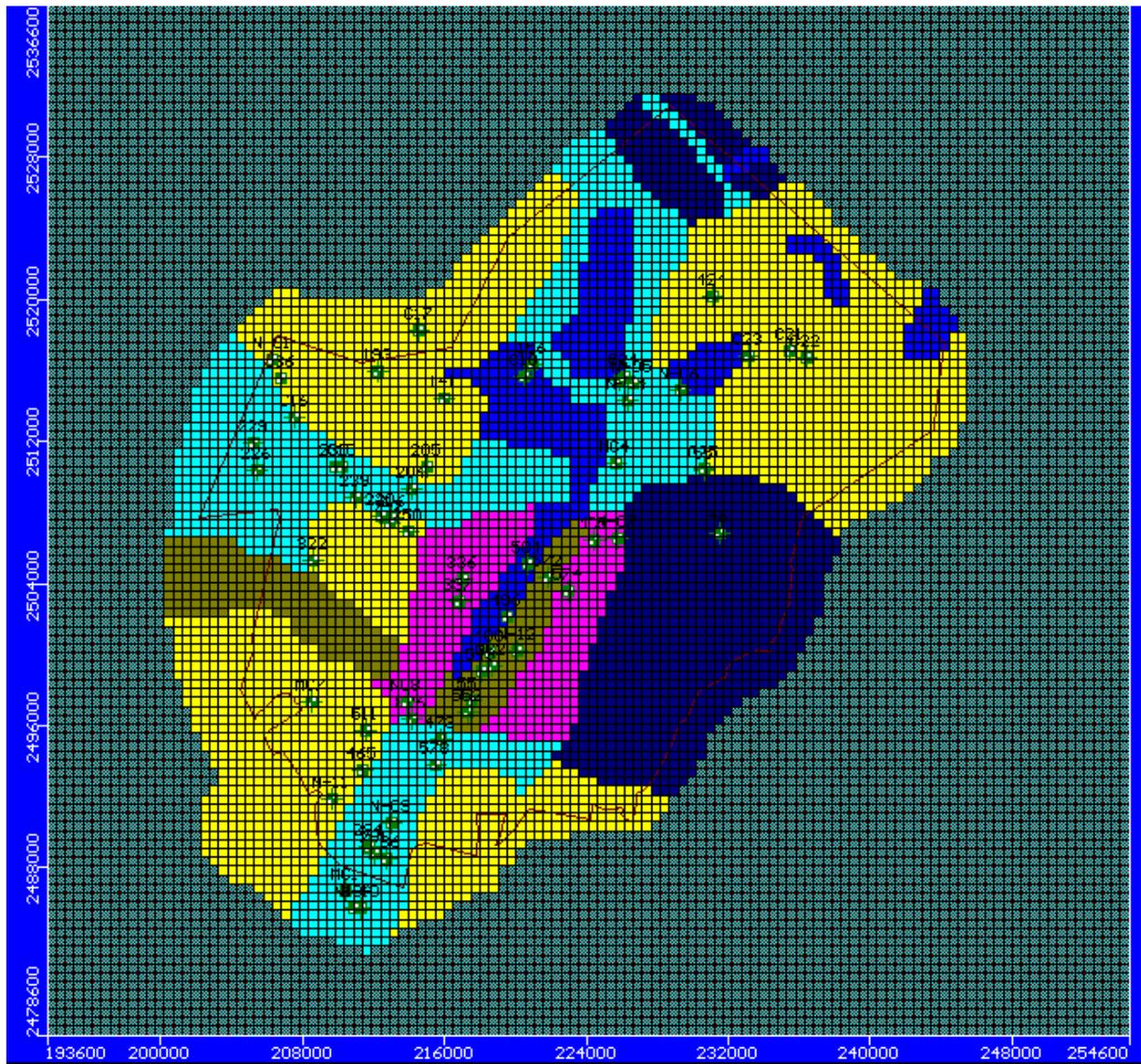
- Medio permeable / medianamente permeable
- Medio con muy baja permeabilidad
- Medio permeable /medianamente permeable (Rocas ígneas)
- Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados)
- Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados con arcillas)
- Medio medianamente permeable / baja permeabilidad

Figura 42. Distribución de los medios geológicos en la capa 3.



-  Medio permeable / medianamente permeable
-  Medio con muy baja permeabilidad
-  Medio permeable / medianamente permeable (Rocas ígneas)
-  Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados)
-  Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados con arcillas)
-  Medio medianamente permeable/ baja permeabilidad

Figura 43. Distribución de los medios geológicos en la capa 4.



- Medio permeable / medianamente permeable
- Medio con muy baja permeabilidad
- Medio permeable /medianamente permeable (Rocas ígneas)
- Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados)
- Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados con arcillas)
- Medio medianamente permeable / baja permeabilidad

Figura 44. Distribución de los medios geológicos en capa 5 (capa inferior).

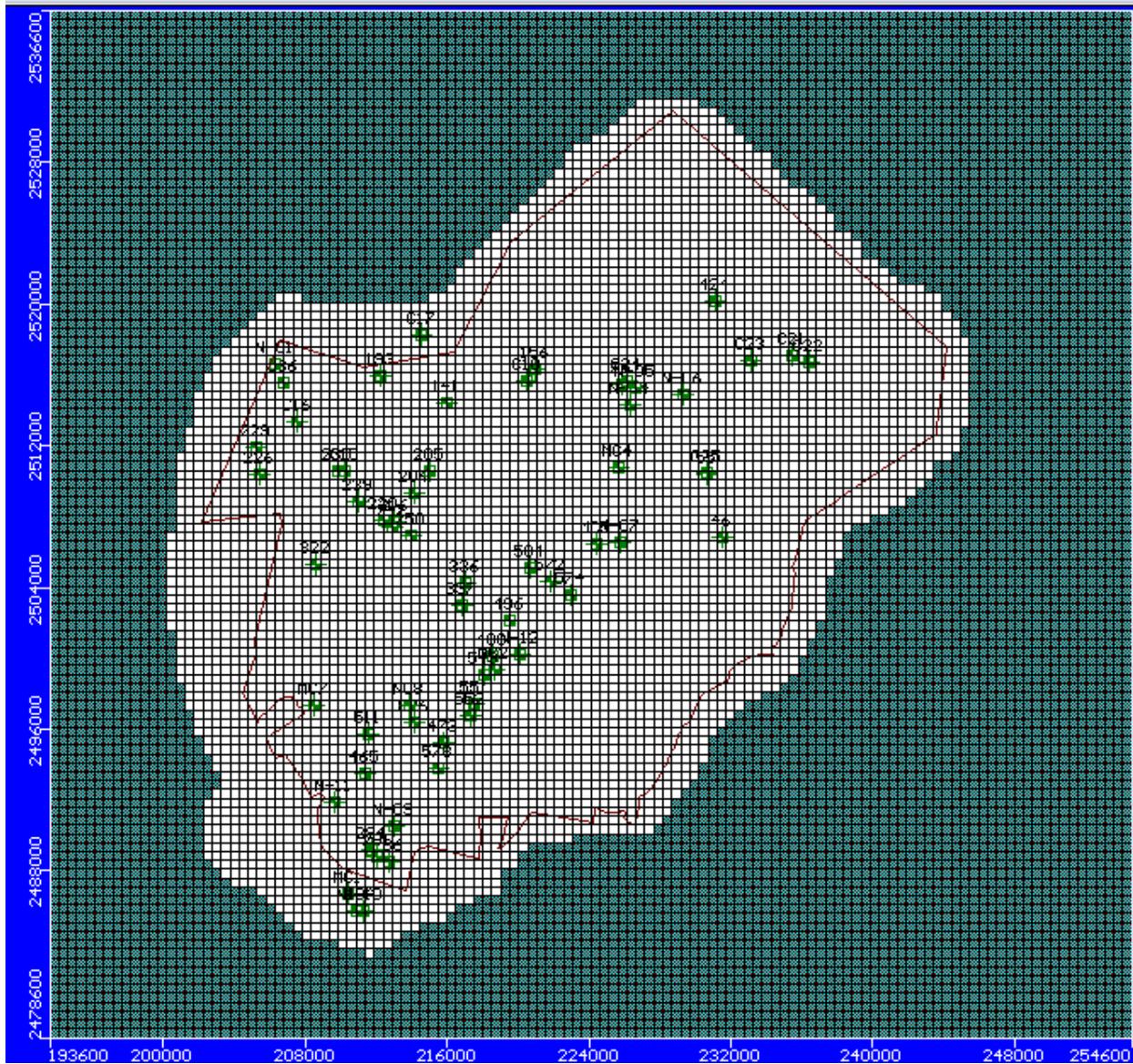


Figura 45. Distribución de los pozos de observación en VMF.

3.10 Entradas de flujo subterráneo

De acuerdo con el balance hidrológico planteado en el capítulo anterior, se infiere que existen entradas de agua subterránea. Por ello, se propuso una zona de entrada en todas las capas mediante la condición de frontera denominada “General Head Boundary”, cuya función específica es simular el flujo subterráneo en los límites de la zona de modelación (Figura 46).

La entrada de flujo subterráneo fue inferida con base en las líneas de flujo obtenidas mediante las configuraciones de elevaciones del nivel freático.

Para obtener un valor cercano a $98 \text{ Mm}^3/\text{año}$ se realizaron varios ensayos (prueba/error), mediante la asignación de diferentes valores de carga hidráulica y parámetros hidráulicos. Finalmente, con el esquema planteado de su ubicación se asignaron valores (Tabla 14) y se obtuvo un resultado considerable con relación al buscado, esto haciendo una comparación con los resultados en el balance de masa. Es importante mencionar que la ubicación de las cargas se asignó con base en las curvas de los niveles obtenidos por las cargas iniciales.

	Stop Time (days)	Boundary Distance (m)	Average K (m/s)	Face
A	2590	15	0.0000021	Norte-Sur

Tabla 14. Valores asignados para las condiciones de frontera para las entradas por flujo subterráneo.

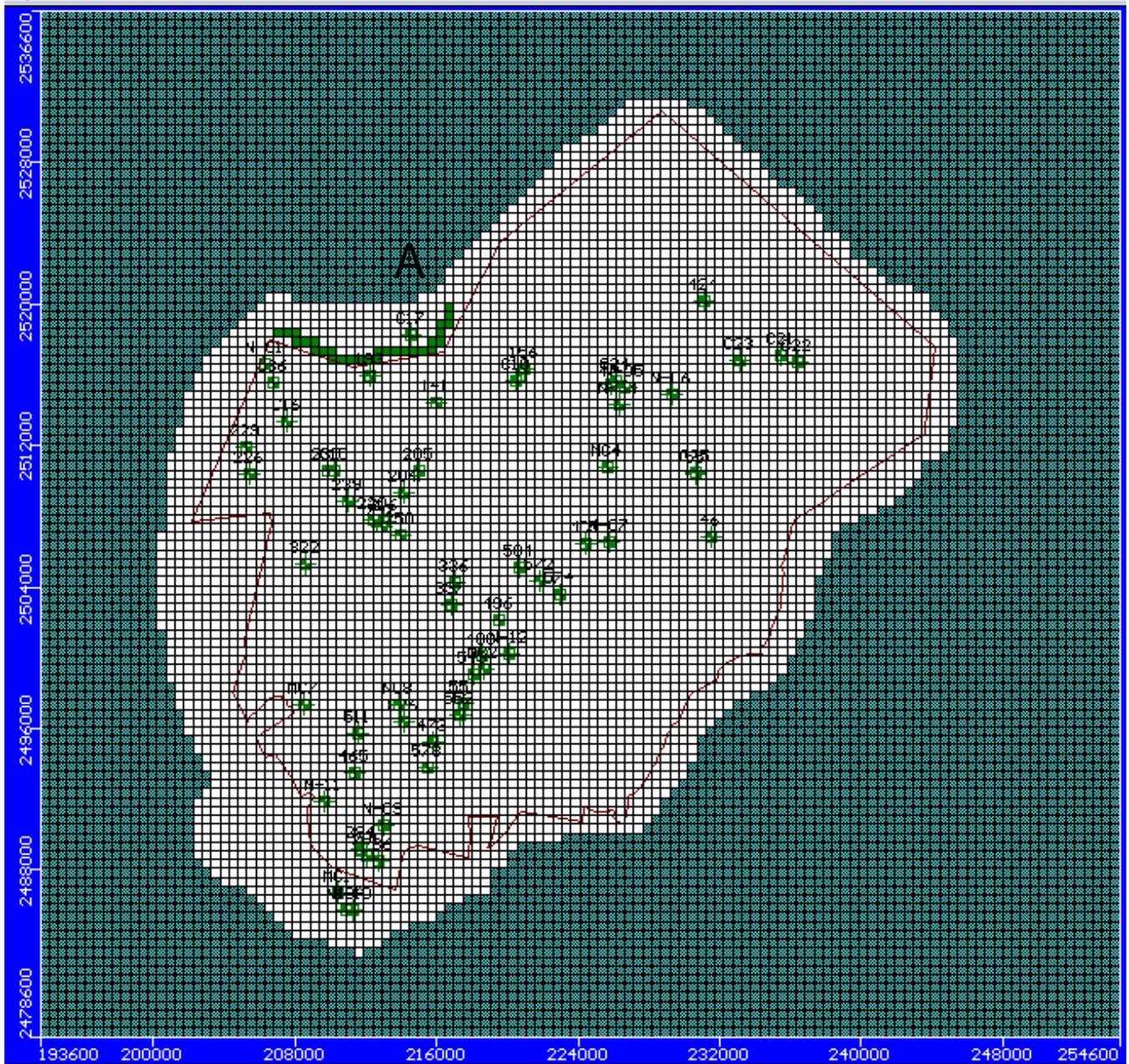


Figura 46. Propuesta de zona de entrada por flujo subterráneo.

3.11 Evapotranspiración

El sistema de cómputo utilizado puede simular los efectos de evapotranspiración a través de la expulsión del agua de la zona saturada del suelo. Para ello, el sistema requiere de un caudal de evapotranspiración (mm/año) y una profundidad de extinción, que es la distancia a partir de la superficie terrestre a la cual la evapotranspiración se considera nula, en este caso se le asignó un valor de 16 m. Además, se requiere la asignación del tiempo inicial y final del efecto modelado.

De acuerdo con la información recabada, se cuentan con 2 valores de evapotranspiración para todo el acuífero (Tabla 15), es decir, la zona central que es donde se encuentra el valle y donde se acumula la mayor cantidad de agua (Laguna de Salinas) y la zona restante del acuífero (Figura 47). La profundidad de extinción se infirió con respecto al tipo de vegetación presente en el acuífero. Como ya se mencionó anteriormente, en este caso, la evapotranspiración del modelo se está considerando para el balance subterráneo. Para asignar los valores dentro del modelo, se realizaron varias corridas del sistema, hasta lograr un valor cercano al registrado en la bibliografía.

Tabla 15. Valores propuestos en el modelo para la evapotranspiración.

<i>Zona</i>	<i>Evapotranspiración (mm/año)</i>	<i>Profundidad extinción (m)</i>
A	1100	5
B	1000	3

3.12 Cargas iniciales

Los valores de cargas iniciales para el proceso de calibración, correspondieron a los valores del nivel estático del año 2017. Fueron asignadas con base en las elevaciones del nivel estático obtenidas de los pozos de monitoreo y posteriormente, por medio de una función del sistema de cómputo se hizo una interpolación lineal tipo Krigging para obtener una configuración en toda el área del acuífero (Ver anexo 2).

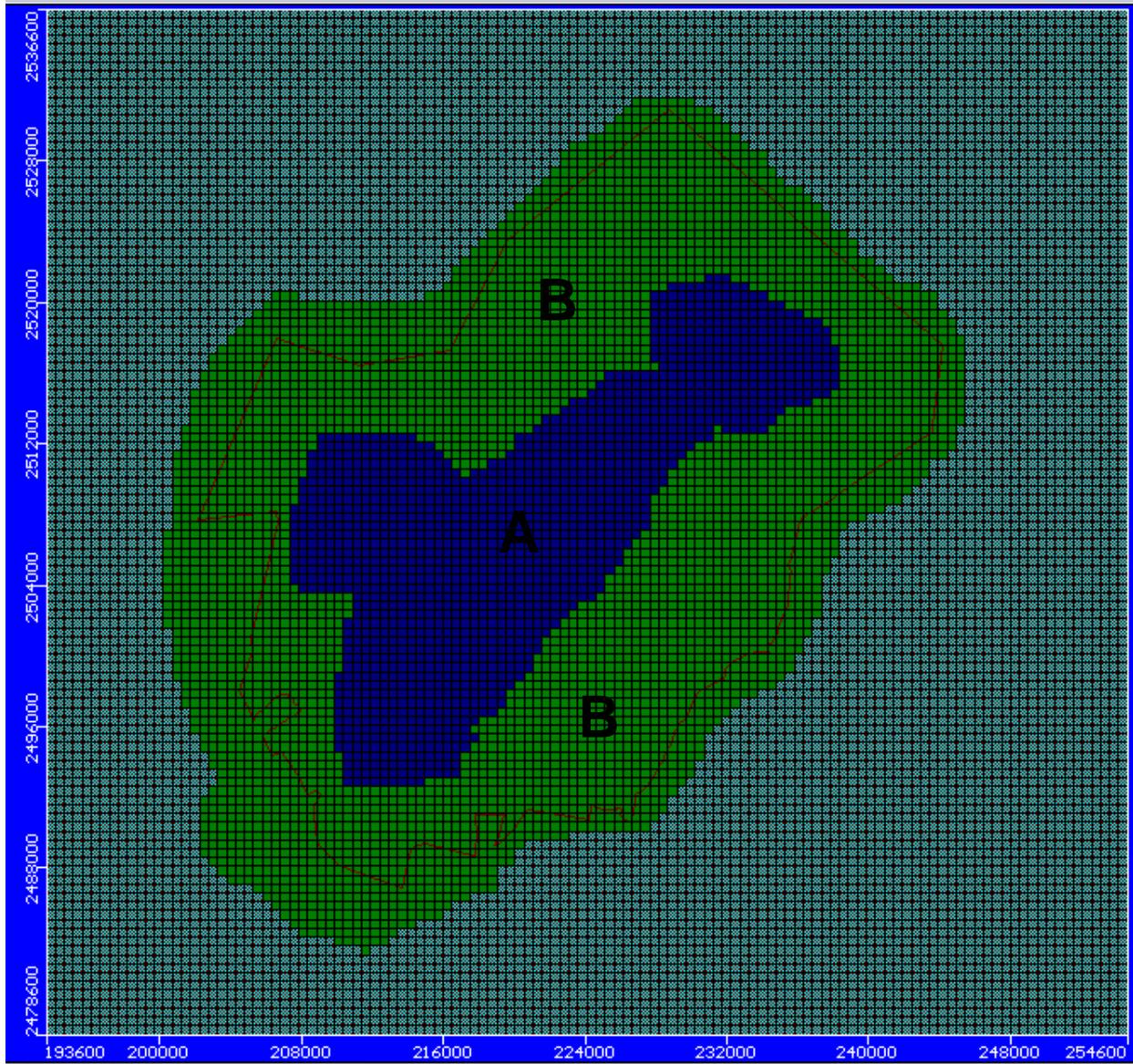


Figura 47. Áreas de evapotranspiración en el acuífero.

3.13 Calibración

El objetivo de la etapa de calibración fue definir el arreglo matemático que representara de manera más conveniente el comportamiento del acuífero con base en los registros históricos, intentando reproducir de manera integral, el comportamiento histórico de los fenómenos que suceden en el acuífero.

El proceso de calibración de un modelo de flujo de aguas subterráneas, tiene por objetivo demostrar que el sistema es capaz de reproducir de manera aproximada las cargas hidráulicas y flujo subterráneo a partir del registro histórico. Este proceso es realizado mediante la búsqueda de una serie de parámetros que definan de manera aproximada el funcionamiento del acuífero dentro de un rango de error preestablecido.

Partiendo de una situación histórica conocida, se tendrán como resultado diversas situaciones particulares del sistema que pueden ser comparadas con registros históricos, lo cual servirá para conocer la confiabilidad del modelo creado. Un modelo de flujo de aguas subterráneas es más representativo del sistema real cuando es capaz de reproducir, con la mayor proximidad, su funcionamiento, esto es, cuando es capaz de reproducir los estados del sistema, y las acciones sobre él con base en las leyes que los relacionan. La calidad de la modelación, está en función del ajuste de la descripción matemática en conjunto con la eficiencia del método matemático utilizado.

3.14 Calibración del modelo

3.14.1 Estado transitorio

El régimen transitorio se considera como condición inicial, posteriormente, la simulación se realiza calibrando algunos parámetros hidráulicos, para lo cual, los valores son modificados en cada corrida del modelo, manteniéndose dentro del rango de valores observados en las diferentes zonas del acuífero. Si los resultados del modelo no son satisfactorios, es necesario recalibrar algunos parámetros hasta disminuir las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los observados en campo.

Con base en los niveles estáticos obtenidos para el año 2017 y 2019, se inició un estado de bombeo transitorio durante un periodo de 2,590 días (7 años), con las características de bombeo, evapotranspiración y entradas y salidas por flujo del sistema.

Se realizó una primera calibración, la cual fue deficiente; a través de estos primeros resultados, se pudo observar en la visualización en planta del modelo, que gran parte de los pozos con mala calibración se localizaban entre pozos que tenían una calibración aceptable o en zonas con poca información; por tal motivo, se optó por continuar con la calibración manual.

El procedimiento de calibración manual estuvo sujeto a modificaciones de prueba y error, realizando ajustes principalmente en los parámetros referentes a conductividades hidráulicas y entradas por flujo subterráneo, para obtener de manera aproximada los datos obtenidos en el balance.

Se utilizaron dos fechas de calibración, una para el día 1,995 correspondiente al día 19 de junio del 2017 y la segunda para el 2,590, correspondiente al 04 febrero del 2019, días en los que se midieron los niveles estáticos en los pozos de observación.

En las siguientes graficas de calibración se presentan los datos observados en comparación con los calculados por el sistema en los días 1995 y 2590, en el cuál, el valor del NRMS (raíz media cuadrática del error) es un porcentaje que indica el error entre la diferencia del valor medido en campo con el calculado en el programa, y se vio modificado al manipular los valores de los parámetros calibrados, como lo son las conductividades hidráulicas, el rendimiento específico, la evapotranspiración y la entrada por flujo subterráneo (Figura 48 y 49).

Otra consideración importante dentro del proceso de calibración, fue el balance de masa, es decir, el balance de las cantidades de agua manejadas durante cada uno de los años considerados en la calibración. Es importante mencionar que los balances de masa estimados de acuerdo con la información recabada, así como los obtenidos mediante el proceso de calibración, representan estimaciones que dan una idea de las unidades manejadas dentro del sistema, sin embargo, no representan cantidades exactas.

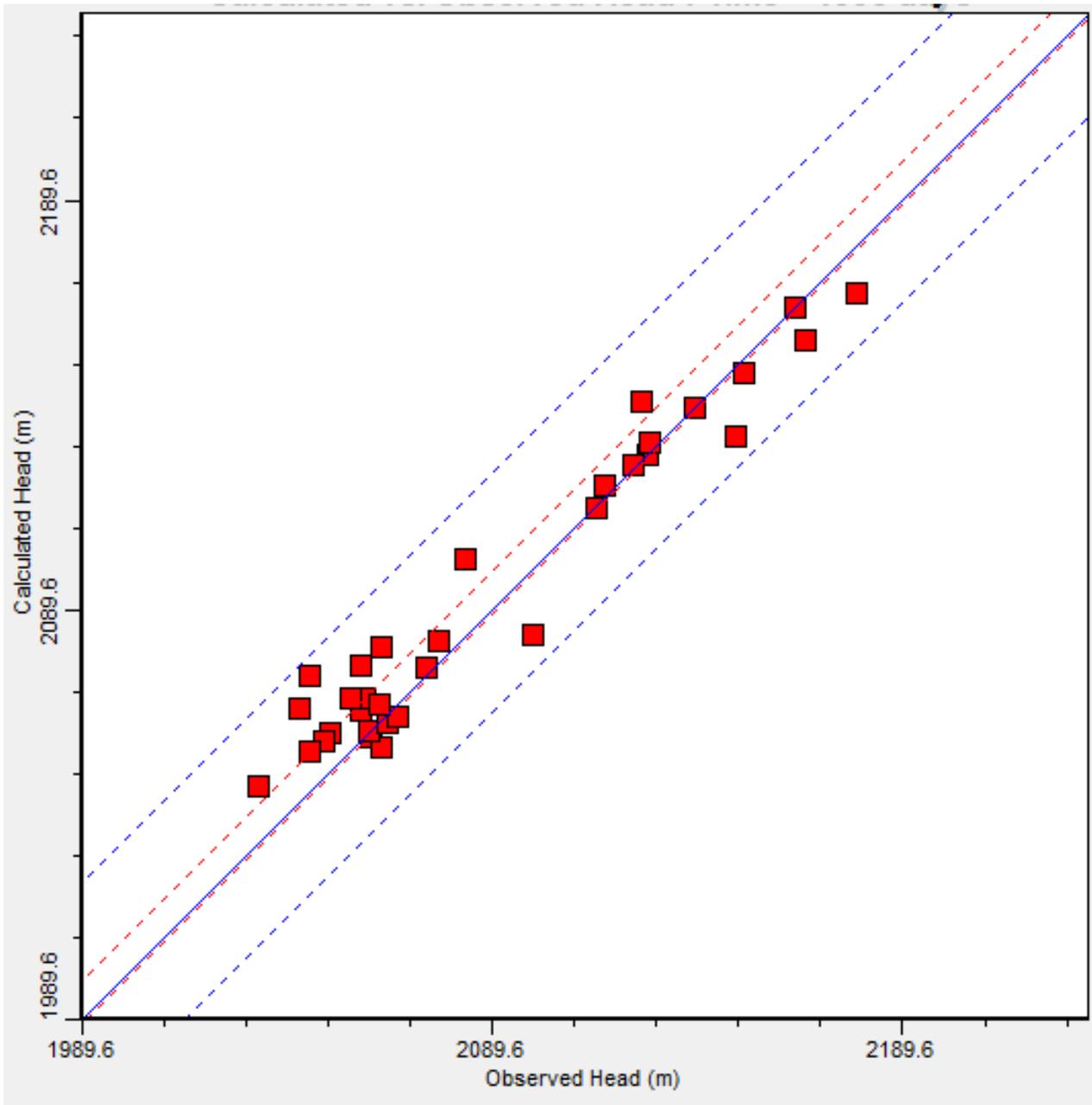


Figura 48. Cargas observadas vs Cargas calculadas (2017).

Numero de Pozos: 33

Error Estándar de la Estimación: 1.87 m

■ NE del Pozo en Capa 1

NRMS: 7.82%

- - - Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados

- - - Intervalo de confianza del 95% del sistema completo

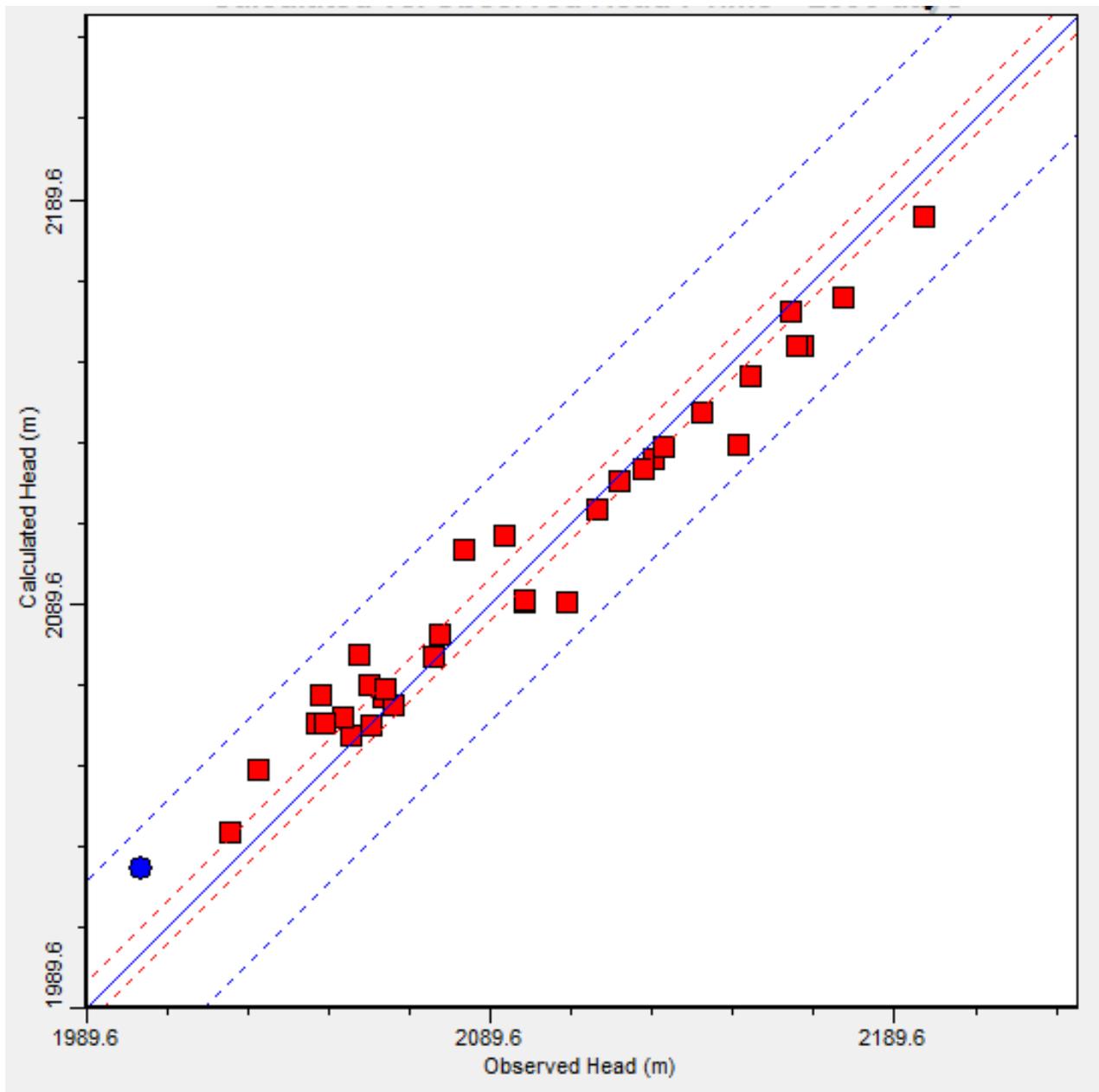


Figura 49. Cargas observadas vs Cargas calculadas (2019).

Numero de Pozos: 34

Error Estándar de la Estimación: 1.95 m

■ NE del Pozo en Capa 1

NRMS: 5.82 %

--- Intervalo de confianza del 95% con respecto a los pozos considerados

--- Intervalo de confianza del 95% del sistema completo

En la tabla 16 se presenta el balance de masa para el sistema calibrado final, esto es, el sistema calibrado de manera manual. Dicha tabla, presenta las cantidades de agua estimadas en el balance y las calculadas en el sistema, así como el porcentaje que representa el cálculo del sistema de cómputo en relación con el balance estimado para el último día de bombeo (2,590).

Tabla 16. Balance de Masa por el sistema calibrado.

Concepto	Balance		Calculado en VMF		VMF / Balance	
	<i>Mm³/año</i>		<i>Mm³/año</i>		%	
	Día 1995	Día 2590	Día 1995	Día 2590	Día 1995	Día 2590
Bombeo	128´190, 691	166´423,003	110´457,000	156´692,400	86	94
Evapotranspiración	422´103,735	547´994,323	455´359,300	673´621,200	108	122
Entrada de agua (flujo subterráneo)	539´097,215	699´880,595	548´564, 700	829´132,700	101	118

De acuerdo con el cálculo en el balance para poder llegar a la calibración del sistema, se tuvo un incremento de $134'535,790 \text{ Mm}^3$ en el bombeo para el periodo del 2012 al 2019.

El sistema calibrado quedó finalmente con los siguientes valores hidráulicos para cada uno de los medios geológicos (Tabla 17).

Tabla 17. Propiedades hidráulicas de los medios geológicos (Calibrados).

Conductividad				
Zona	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	
1	4.78E-5	4.78E-5	4.78E-6	
2	5.6E-8	5.6E-8	5.6E-8	
3	4.6E-5	4.6E-5	4.6E-4	
4	5.3E-5	5.3E-5	5.3E-6	
5	5.11E-5	5.11E-5	5.11E-6	
6	2.139E-5	2.139E-5	2.139E-6	
Almacenamiento				
Zona	Ss (1/m)	Sy	Porosidad Efectiva	Porosidad Total
1	0.0007	0.1	0.15	0.2
2	0.0007	0.02	0.03	0.55
3	0.0007	0.001	0.01	0.10
4	0.0007	0.3	0.35	0.40
5	0.0007	0.27	0.32	0.38
6	0.0007	0.03	0.038	0.2

Descripción de la tabla 17:

1. Medio medianamente permeable/medianamente permeable (Fm. Cuesta del cura, Fm. Las Joyas, Fm. La Peña, Fm. Cupido y Riolita Panalillo) (Capa 1,2,3,4 y 5)
2. Medio con muy baja permeabilidad (relleno sedimentario de arcillas) (Capa 1,2,3,4 y 5)

3. Medio permeable/medianamente permeable (Rocas ígneas) (Capa 1,2,3,4 y 5)
4. Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados) (Capa 1,2,3,4, y 5)
5. Medio permeable (relleno sedimentario de conglomerados con arcillas) (Capa 1,2,3,4, y 5)
6. Medio medianamente permeable/poca permeabilidad (Fm. Caracol, Fm. Taraises, Fm. Indidura) (Capa 1,2,3,4 y 5)

Una vez calibrado el modelo se presenta en la Figura 50 las elevaciones del nivel freático obtenidos con las mediciones en campo y en comparación con las estimadas por el modelo calibrado, donde se puede observar la similitud entre ellas, además de las comparaciones de las gráficas de calibración mostradas anteriormente.

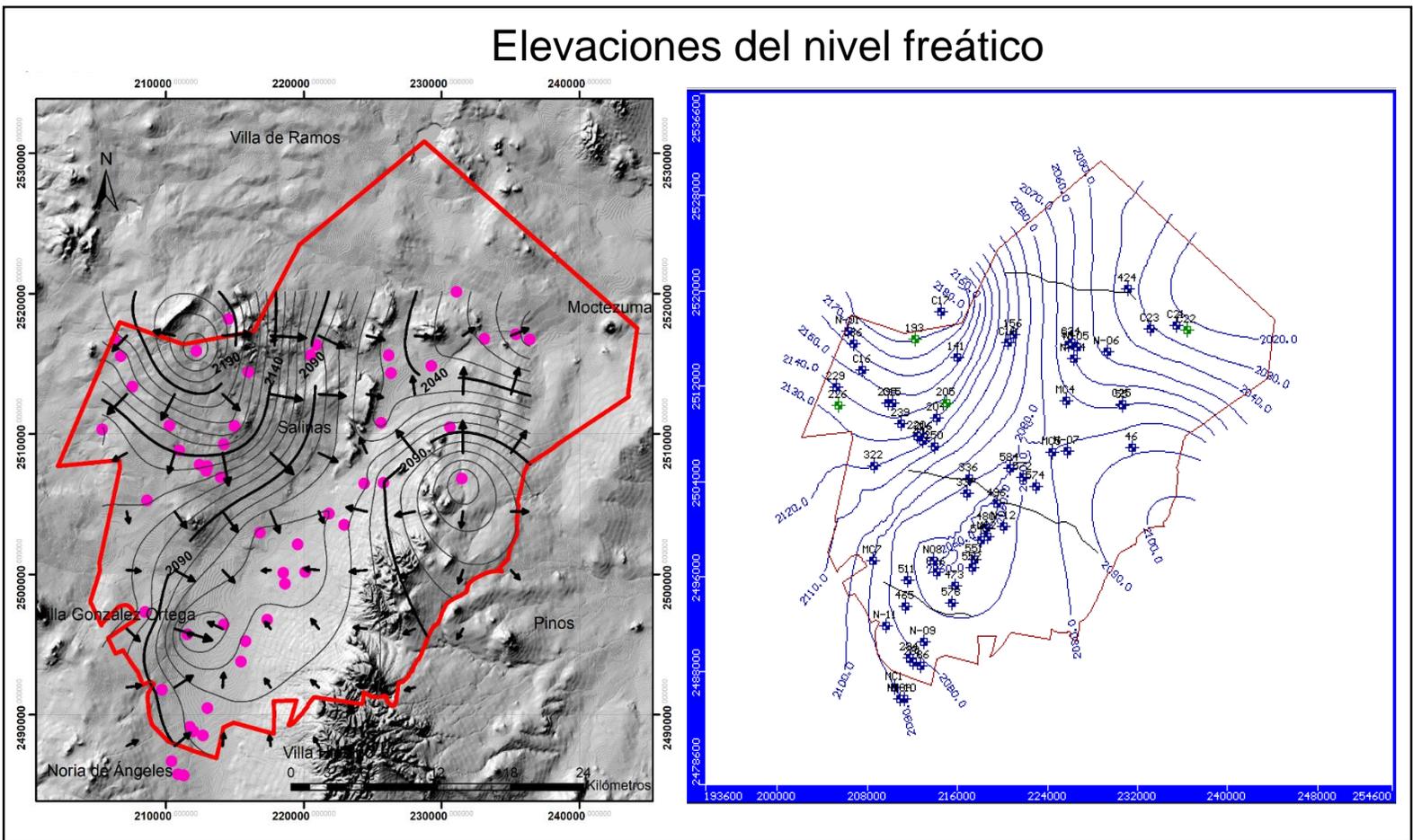


Figura 50. Elevaciones del nivel freático de campo comparadas con las elevaciones del modelo numérico

3.13.2 Análisis de sensibilidad

Una vez calibrado el modelo para el periodo de bombeo comprendido entre el año 2012-2019 en estado transitorio, se efectuaron distintas simulaciones para determinar la sensibilidad del modelo, con lo que fue posible medir la susceptibilidad del comportamiento del sistema ante cambios en parámetros como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento específico (S_s). Los cambios realizados afectaron cada una de las capas dentro de las cuales están comprendidos los distintos medios geológicos del modelo.

El método utilizado, consistió en modificar el valor final de la calibración para cada uno de los parámetros y comparar los resultados modificados con respecto a los de la calibración final. Los parámetros de conductividad hidráulica fueron modificados en 10%, 40% y 50% por arriba del valor calibrado; finalmente para el almacenamiento específico fueron modificados en 30% y 50% por debajo del valor calibrado.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes modificaciones, se puede analizar como la conductividad hidráulica y el almacenamiento específico tienen una gran influencia dentro de la sensibilidad del sistema, ya que en todos los casos el modelo reacciona a la manipulación de los datos. Figura 51.

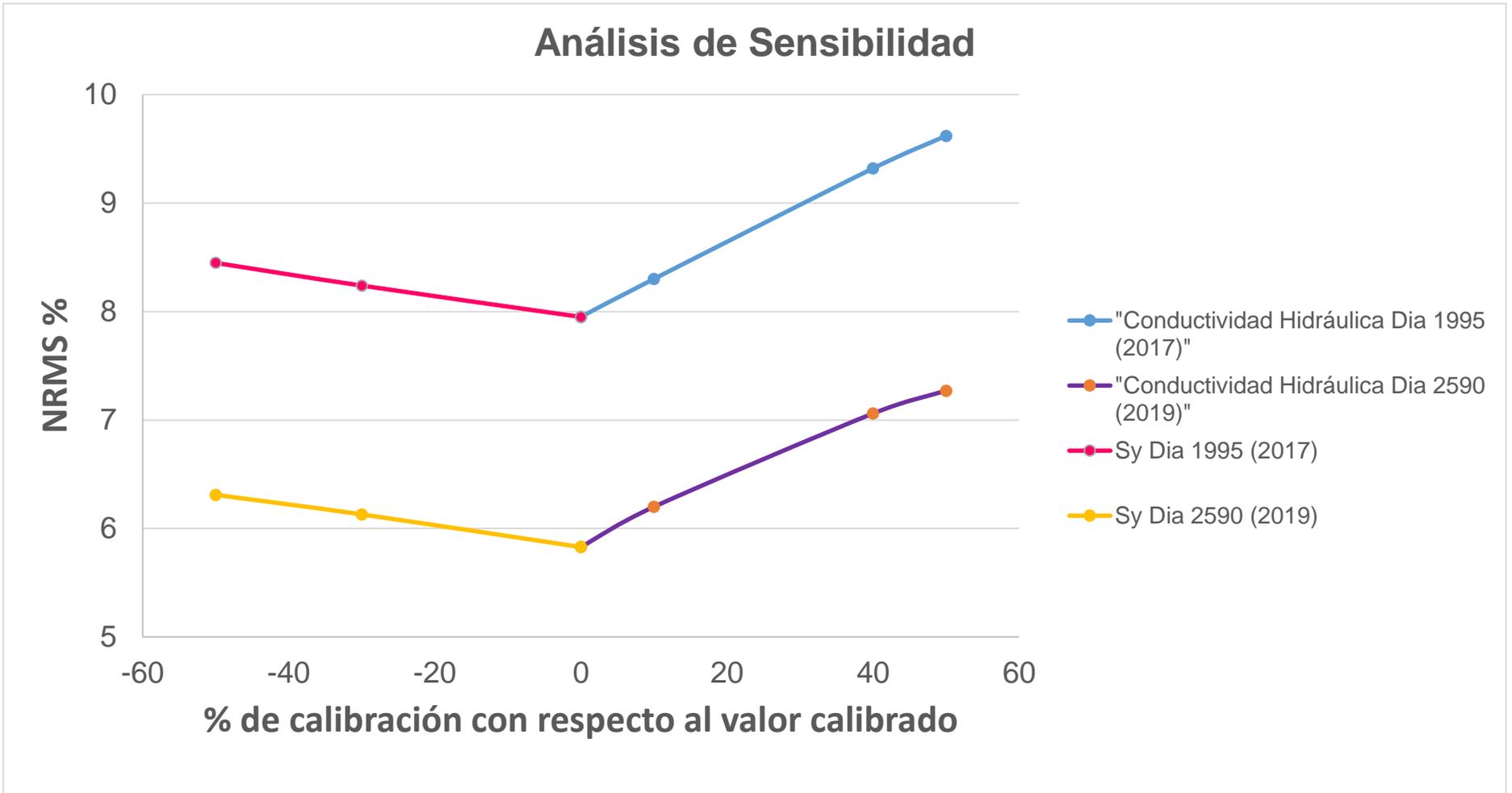


Figura 51. Gráfica de análisis de sensibilidad con los diferentes parámetros modificados.

4. Análisis e interpretación de resultados de los escenarios futuros

4.1 Simulación de escenarios futuros

La modelación numérica aplicada al estudio del funcionamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico en aguas subterráneas es una herramienta de apoyo fundamental para gestionar y aprovechar efectiva y eficientemente un acuífero, dado que permite predecir el comportamiento del sistema cuando éste es sometido a diferentes políticas de aprovechamiento. Es una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad para el estudio del comportamiento del flujo y transporte de solutos en aguas subterráneas. Una de las principales ventajas de los modelos de simulación hidrogeológica, radica en que posibilita la evaluación de múltiples escenarios de predicción, sometiendo el sistema a diferentes condiciones de estrés (recarga, extracciones, etc.), pudiéndose optimizar el uso y manejo del recurso aprovechado con una perspectiva de sustentabilidad (Durán, 2012).

Dados los conjuntos de elementos que conformaron el modelo de flujo de aguas subterráneas del acuífero, así como el proceso de calibración, surge la necesidad de conocer la respuesta del acuífero ante posibles escenarios de aprovechamiento futuro, y/o cambios de patrones meteorológicos que se vean reflejados en precipitación y como consecuencia en la recarga de agua subterránea.

Mediante la simulación de escenarios futuros dentro de la modelación de aguas subterráneas, el interés se basa en conocer el comportamiento del sistema frente a distintas alternativas posibles de aprovechamiento, para conocer los efectos de las mismas, con las cuales se pueda sustentar, la toma de decisiones para establecer los métodos de gestión adecuados de acuerdo a los objetivos buscados.

En el caso de este proyecto, se desarrollaron 3 escenarios de aprovechamiento, en los cuales se pretendió predecir el estado del acuífero de Salinas de Hidalgo al año 2029, esto es, 10 años hacia el futuro, tomando en cuenta que el último día de calibración fue en febrero del 2019, regularmente, aunque no es una regla escrita, el periodo utilizado para la calibración, es el número máximo de años que

teóricamente pueden ser proyectados a futuro en la simulación de aguas subterráneas, para la obtención de resultados confiables.

4.2 Escenario 1: condiciones actuales

Con base en la información obtenida mediante CONAGUA (2019), se trabajó con los 1,007 pozos de bombeo correspondientes al acuífero administrativo de Salinas.

El desarrollo de simulación de los sistemas de flujo de dicho escenario consistió en realizar una predicción a futuro de 10 años (día 6,590) con base en las condiciones de extracción por bombeo del último año modelado (día 2,590).

Para ello, se utilizó el modelo resultante del proceso de calibración correspondiente a la cantidad de extracción del año 2019; esto se dio para cada uno de los pozos durante los 10 años modelados, es decir, se mantuvo el mismo caudal de extracción final para los años del escenario futuro.

4.3 Escenario 2: incremento gradual de extracción por bombeo

Para este escenario, se tomaron en cuenta la misma cantidad de pozos que para el escenario 1, sin embargo, se realizó una modificación en la extracción final únicamente a los pozos utilizados para uso y consumo humano, diferentes usos y uso doméstico, dando así un total de 203 pozos.

Dicha modificación consistió en aumentar el caudal de extracción un 8% anual, con base en el porcentaje de incremento anual poblacional (en el periodo 1990 al 2015 según los datos reportados en INEGI 2019) a los 203 pozos antes mencionados. El caudal para el día de la calibración final (2,590) corresponde a $166 \text{ Mm}^3/\text{año}$, obteniendo así un resultado de extracción adicional para los 203 pozos de $49 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

4.4 Escenario 3: decremento de entrada de flujo de agua subterránea

El escenario 3, consistió en la disminución del 58% de entrada de flujo subterráneo al acuífero, con respecto a la entrada que se tenía inicialmente con base en el modelo calibrado.

El ajuste se realizó manteniendo la misma ubicación de la entrada del flujo, pero modificando la conductividad hidráulica a partir del día 2,590 que es la fecha final de calibración al año 2019.

La entrada de agua por flujo subterráneo para el día 2,590 corresponde a 2,429 $Mm^3/año$, manteniendo a todos los pozos con el mismo bombeo durante los 10 años modelados como se mencionó en el escenario 1.

Continuando con el mismo bombeo para el periodo modelado, se aplicaron modificaciones mediante la condición de frontera a través del “General Head Boundary” para el día 6,590 obteniendo como extracción final 1,520 $Mm^3/año$, dando como resultado una disminución del 58% en la entrada de flujo de agua subterránea.

Cabe mencionar que las cargas iniciales para los 3 escenarios fueron las asignadas con base en los niveles estáticos del año 2017. El modelo quedó conformado por la cantidad de días de la modelación a futuro correspondiente a 10 años (6,570 días).

4.5 Resultados de escenarios futuros

A continuación, se presentan los resultados para los 3 escenarios futuros modelados con un periodo de 10 años (2019-2029).

Con el desarrollo de los escenarios futuros se pretendió mostrar la predicción de las condiciones futuras ante situaciones específicas (en este caso regímenes de bombeo y entrada de flujo subterráneo), que es posible plasmar ante cualquier idea de aprovechamiento o situación en un modelo de simulación y, conocer los efectos que podría provocar, convirtiéndose dicho modelo en una importante herramienta para la gestión de las aguas subterráneas.

4.5.1 Escenario 1: condiciones actuales (2019)

En la figura 52 se presenta el resultado de dicho escenario 1.

Este planteamiento fue diseñado con un esquema de aprovechamiento de uso constante (con base en las condiciones de extracción del año 2019) durante 10 años a futuro. Es un escenario poco factible, ya que las necesidades de una sociedad van aumentando día a día y, como consecuencia, repercute en el aumento de consumo de agua, aunado a que en la zona sur del área de estudio hay una importante actividad agrícola.

Los resultados de este sistema de aprovechamiento, presentan que manteniendo un esquema de bombeo igual al del año 2019 y sin cambios durante 10 años, los niveles de agua en algunas zonas se mantienen constantes, es decir, aparentemente no presentan ningún cambio en términos de abatimiento.

En la zona S (Figura 52, recuadro A), que es donde se encuentran la mayor parte de aprovechamientos importantes en términos de extracción, presenta áreas tanto de abatimiento como de recuperación, los abatimientos van desde 1 hasta 3 m en los límites del acuífero con el estado de Zacatecas y el área de recuperación asciende hasta los 4 m en la parte Sur- Centro del acuífero. Estos niveles de

recuperación, si bien son altos, podrían interpretarse como zonas de no abatimiento, más que de recuperación y coincide con el límite Sur de la laguna de Salinas. Este comportamiento de recuperación de niveles y de no abatimientos (abatimiento 0) se extiende por todo el valle del acuífero y que es el área de la laguna de Salinas.

Con respecto a la zona NE del acuífero (Figura 52, recuadro B), que es donde se concentran una menor cantidad de pozos (y los menores volúmenes de extracción), se presenta como una zona de estabilidad y algunas recuperaciones en la elevación del nivel freático, estas recuperaciones pueden interpretarse también, más que como una recuperación, una zona donde los niveles se mantienen a lo largo del tiempo; esto se puede confirmar, ya que, en los recorridos de campo se pudo observar que hay zonas que permanecen sin bombear por largas temporadas derivado de la inactividad agrícola debida posiblemente a problemas económicos en este sector y al poco aporte de agua en esa zona del acuífero.

En la parte Este (Figura 52, recuadro C), al igual que en la zona NE del acuífero, se concentran una menor cantidad de pozos (mayormente pozos de tipo papalote), además de tener zonas topográficamente altas. De acuerdo con los resultados del escenario, se presentan abatimientos de 2 hasta 6 m, lo cual puede ser derivado de la baja permeabilidad de la zona. Se debe tener cuidado con la interpretación debido al poco conocimiento de la información recolectada y generada en esta área, por lo que, se recomienda estudiar con mayor detalle la zona, en términos de tiempo y espacio.

Finalmente, en la parte Oeste del acuífero (Figura 52, recuadro D), se presenta otra zona con abatimientos importantes que van de 1 a 8 metros; sin embargo, se debe tener cuidado con la interpretación, ya que, en esta zona, de acuerdo con lo que se identificó en campo y gabinete, se presentan las entradas más importantes por flujo subterráneo y existen zonas con pozos que tienen una importante producción de agua y pozos que no, lo cual, habla de la heterogeneidad geológica en esta zona. Es decir, además de los abatimientos mencionados, puede haber zonas con recuperación, por lo cual, habría que realizar un estudio con mayor detalle (geológico e hidrogeológico) de esta zona en particular.

El comportamiento presentado en el actual escenario, parecer ser coherente de acuerdo con las condiciones planteadas y manejadas en el modelo, en comparación con el análisis de la información generada en campo y trabajada en gabinete, presentándose abatimientos en el nivel de agua en parte de la zona donde se concentran la mayor cantidad de pozos y recuperaciones en la zona de la laguna, misma que constituye la salida del agua a través de la evapotranspiración.

4.5.2 Escenario 2: incremento gradual de extracción por bombeo

Este planteamiento está diseñado con un esquema de aprovechamiento en el cual se implementó un aumento en el bombeo con base en las condiciones de extracción del año 2019 durante los 10 años de proyección futura. El aumento de bombeo se realizó únicamente para los pozos destinados para uso y consumo humano, por lo cual, se considera como un escenario más factible que el mencionado anteriormente, ya que representa un incremento en la extracción con base en la dinámica de crecimiento poblacional.

Los resultados de este sistema de aprovechamiento, presentan que los niveles de agua en algunas zonas se mantienen constantes, es decir, aparentemente no reflejan cambios en términos de abatimiento, mientras que en otras áreas se sugieren abatimientos o recuperaciones del nivel freático, tal como se describe a continuación.

En la zona S (Figura 53, recuadro A) que es donde se encuentran la mayor parte de aprovechamientos importantes en términos de extracción, presenta áreas tanto de abatimiento como de recuperación, los abatimientos van desde 1 hasta 4 m en los límites del acuífero con el estado de Zacatecas y el área de recuperación ascienda hasta los 4 m en la parte Sur- Centro del acuífero. Estos niveles de recuperación, si bien son altos, podrían interpretarse como zonas de no abatimiento, más que de recuperación y coincide con el límite Sur de la laguna de Salinas. Este

comportamiento de recuperación de niveles y de no abatimientos (abatimiento 0) se extiende por todo el valle del acuífero y que es el área de la laguna de Salinas. Con respecto a la zona NE (Figura 53, recuadro B) del acuífero, que es donde se concentran una menor cantidad de pozos (y los menores volúmenes de extracción), se presenta como una zona de estabilidad y algunas recuperaciones en la elevación del nivel freático; estas recuperaciones pueden interpretarse también, más que como una recuperación, una zona donde los niveles se mantienen a lo largo del tiempo; esto se puede confirmar, ya que, en los recorridos de campo se pudo observar que hay zonas que permanecen sin bombear por largas temporadas derivado de la inactividad agrícola debida posiblemente a problemas económicos en este sector y al poco aporte de agua en esa zona del acuífero. En comparación con los resultados del escenario 1 se pueden observar un desplazamiento de las recuperaciones que sugieren un menor incremento del nivel freático lo cual, puede deberse a que esta zona el uso más importante que se le da al agua es para uso y consumo de humano.

En la parte Este (figura 53, recuadro C), al igual que en la zona NE del acuífero, se concentran una menor cantidad de pozos (mayormente pozos de tipo papalote), además de tener zonas topográficamente altas. De acuerdo con los resultados del escenario, se presentan abatimientos de 2 hasta 6 m, lo cual puede ser derivado de la poca baja permeabilidad de la zona. Se debe tener cuidado con la interpretación debido al poco conocimiento de la información recolectada y generada en esta área, por lo que, se recomienda estudiar con mayor detalle la zona, en términos de tiempo y espacio.

Finalmente, en la parte Oeste del acuífero (figura 53, recuadro D), se presenta otra zona con abatimientos importantes que van de 1 a 8 metros; sin embargo, se debe tener cuidado con la interpretación, ya que, en esta zona, de acuerdo con lo que se identificó en campo y gabinete, se presentan las entradas más importantes por flujo subterráneo y existen zonas con pozos que tienen una importante producción de agua y pozos que no; lo cual, habla de la heterogeneidad geológica en esta zona. Es decir, además de los abatimientos mencionados, puede haber zonas con

recuperación, por lo cual, habría que realizar un estudio con mayor detalle (geológico e hidrogeológico) de esta zona en particular.

El comportamiento presentado en el actual escenario, parecer ser coherente de acuerdo con las condiciones planteadas y manejadas en el modelo, en comparación con el análisis de la información generada en campo y trabajada en gabinete, presentándose abatimientos en el nivel de agua en parte de la zona donde se concentran la mayor cantidad de pozos y recuperaciones en la zona de la laguna, misma que constituye la salida del agua a través de la evapotranspiración.

Parte de los resultados de la simulación de este escenario, son prácticamente iguales que los del escenario 1 en algunas zonas; esto puede deberse a que el esquema de extracción planteado en este escenario no difiere mucho de lo planteado en el esquema de aprovechamiento del escenario 1, puesto que las extracciones para uso y consumo humano no representan un alto porcentaje de aprovechamiento con respecto a otros usos como lo es en el sector agrícola. Además, se confirma que algunas zonas del acuífero deben de ser estudiadas a mayor detalle.

4.5.3 Escenario 3: decremento de entrada de flujo de agua subterránea

Este último planteamiento se diseñó con un esquema de aprovechamiento igual que el escenario 1, en conjunto con una disminución significativa en la entrada por flujo subterráneo.

Los resultados de este escenario, se muestran en la figura 54 y en la cual se puede observar que en la zona S (Figura 54, recuadro A) que es donde se encuentran la mayor parte de aprovechamientos importantes en términos de extracción, presenta áreas tanto de abatimiento como de recuperación; los abatimientos van desde 1 hasta 4 m en los límites del acuífero con el estado de Zacatecas, en comparación con los resultados de los escenarios 1 y 2, los abatimientos de este escenario se prolongan hacia la zona sur y el área de recuperación ascienda hasta los 4 m en la

parte Sur- Centro del acuífero. Estos niveles de recuperación, si bien son altos, podrían interpretarse como zonas de no abatimiento, más que de recuperación y coincide con el límite Sur de la laguna de Salinas. Este comportamiento de recuperación de niveles y de no abatimientos (abatimiento 0) se extiende por todo el valle del acuífero y que es el área de la laguna de Salinas, aunque se debe mencionar que el área de recuperación es un poco menor en comparación con los escenarios 1 el cual presenta la misma extracción; en comparación con el escenario 2 se observa una mayor recuperación, ya que, el escenario 2 implica extracciones para uso y consumo humano en el área urbana de Salinas de Hidalgo.

Con respecto a la zona NE (Figura 54, recuadro B) del acuífero, que es donde se concentran una menor cantidad de pozos (y los menores volúmenes de extracción), se presenta como una zona de estabilidad y algunas recuperaciones en la elevación del nivel freático; estas recuperaciones pueden interpretarse también, más que como una recuperación, una zona donde los niveles se mantienen a lo largo del tiempo; esto se puede confirmar, ya que, en los recorridos de campo se pudo observar que hay zonas que permanecen sin bombear por largas temporadas derivado de la inactividad agrícola debida posiblemente a problemas económicos en este sector y al poco aporte de agua en esa zona del acuífero. En comparación con los resultados del escenario 1 se pueden observar un desplazamiento de las recuperaciones que sugieren un menor incremento del nivel freático en esta zona, lo cual, es un reflejo del decremento en la entrada de agua por flujo subterráneo.

En la parte Este (figura 54, recuadro C), al igual que en la zona NE del acuífero, se concentran una menor cantidad de pozos (mayormente pozos de tipo papalote), además de tener zonas topográficamente altas. De acuerdo con los resultados del escenario, se presentan abatimientos de 2 hasta 6 m, lo cual puede ser derivado de la poca baja permeabilidad de la zona. Se debe tener cuidado con la interpretación debido al poco conocimiento de la información recolectada y generada en esta área, por lo que, se recomienda estudiar con mayor detalle la zona, en términos de tiempo y espacio.

Finalmente, en la parte Oeste del acuífero (figura 54, recuadro D), se presenta otra zona con abatimientos importantes que van de 1 a 8 metros; sin embargo, se debe

tener cuidado con la interpretación, ya que, en esta zona, de acuerdo con lo que se identificó en campo y gabinete, se presentan las entradas más importantes por flujo subterráneo y existen zonas con pozos que tienen una importante producción de agua y pozos que no; lo cual, habla de la heterogeneidad geológica en esta zona. Es decir, además de los abatimientos mencionados, puede haber zonas con recuperación, por lo cual, habría que realizar un estudio con mayor detalle (geológico e hidrogeológico) de esta zona en particular. En comparación con los escenarios 1 y 2, se reflejan mayores abatimientos en la frontera del acuífero, precisamente donde se encuentra la condición de frontera de entrada por flujo subterráneo, debido a que se simuló un menor caudal de entrada.

El comportamiento presentado en el actual escenario, parecer ser coherente de acuerdo con las condiciones planteadas y manejadas en el modelo, en comparación con el análisis de la información generada en campo y trabajada en gabinete, presentándose abatimientos en el nivel de agua en parte de la zona donde se concentran la mayor cantidad de pozos y en las zonas de las entradas por flujo subterráneo y, recuperaciones en la zona de la laguna, misma que constituye la salida del agua a través de la evapotranspiración.

Parte de los resultados de la simulación de este escenario, son prácticamente iguales que los del escenario 1 en algunas zonas; esto puede deberse a que el esquema de extracción planteado en este escenario, es igual a lo planteado en el esquema de aprovechamiento del escenario 1. Además, se confirma que algunas zonas del acuífero deben de ser estudiadas a mayor detalle.

Con base en los resultados se puede confirmar que se necesita mejorar la calidad de la información mediante la mejora de datos con una mayor resolución para tener respuesta ante los estímulos con los esquemas planteados en los escenarios.

A continuación, en las tablas 18, 19 y 20 se presentan las cantidades de agua estimadas en el balance de masas y las calculadas en el sistema para los 3 escenarios, así como el porcentaje que representa el cálculo del sistema de cómputo en relación con el balance hídrico estimado, tanto para el día final del proceso de calibración, como para el día final en la simulación de los escenarios futuros.

ESCENARIO 1									
Día	BALANCE			CALCULADO EN VMF			BALANCE/ VMF		
	Bombeo	EVTR	Entrada flujo	Bombeo	EVTR	Entrada flujo	%		
2590	166,423,003	547,994,328	699,880,595	156,990,400	1,013,539,000	835,004,200	94	185	119
2920	187,627,479	617,816,000	789,054,571	176,973,100	1,159,817,000	963,391,700	94	188	122
3285	211,080,913	695,043,000	887,686,393	199,075,100	1,324,376,000	1,108,364,000	94	191	125
3650	234,534,348	772,270,000	986,318,214	221,177,100	1,491,486,000	1,255,837,000	94	193	127
4015	257,987,783	849,497,000	1,084,950,035	243,279,000	1,660,665,000	1,405,353,000	94	195	130
4380	281,441,218	926,724,000	1,183,581,857	265,381,000	1,831,525,000	1,556,565,000	94	198	132
4745	304,894,653	1,003,951,000	1,282,213,678	287,483,000	2,003,685,000	1,709,209,000	94	200	133
5110	328,348,088	1,081,178,000	1,380,845,500	309,585,000	2,176,804,000	1,863,081,000	94	201	135
5475	351,801,522	1,158,405,000	1,479,477,321	331,687,000	2,350,570,000	2,018,019,000	94	203	136
5840	375,254,957	1,235,632,000	1,578,109,142	353,789,000	2,524,786,000	2,173,896,000	94	204	138
6205	398,708,392	1,312,859,000	1,676,740,964	375,890,900	2,699,364,000	2,330,608,000	94	206	139
6570	422,161,827	1,390,086,000	1,775,372,785	397,992,900	2,874,197,000	2,488,072,000	94	207	140

Tabla 18. Balance de masas del primer escenario futuro proyectado al año 2029.

ESCENARIO 2									
Día	BALANCE			CALCULADO EN VMF			BALANCE/ VMF		
	Bombeo	EVTR	Entrada flujo	Bombeo	EVTR	Entrada flujo	%		
2590	145,443,337	547,994,328	699,880,595	156,990,400	1,013,539,000	835,004,200	108	185	119
2920	166,931,322	617,816,000	789,054,571	176,973,100	1,159,817,000	963,391,700	106	188	122
3285	187,664,691	695,043,000	887,686,393	199,299,900	1,324,371,000	1,108,365,000	106	191	125
3650	208,416,980	772,270,000	986,318,214	221,869,300	1,491,459,000	1,255,840,000	106	193	127
4015	229,188,344	849,497,000	1,084,950,035	244,700,900	1,660,585,000	1,405,360,000	107	195	130
4380	249,983,033	926,724,000	1,183,581,857	267,815,600	1,831,350,000	1,556,579,000	107	198	132
4745	270,803,138	1,003,951,000	1,282,213,678	291,236,000	2,003,367,000	1,709,235,000	108	200	133
5110	291,647,515	1,081,178,000	1,380,845,500	314,986,700	2,176,276,000	1,863,124,000	108	201	135
5475	312,519,696	1,158,405,000	1,479,477,321	339,093,900	2,349,761,000	2,018,085,000	109	203	136
5840	333,421,903	1,235,632,000	1,578,109,142	363,586,300	2,523,607,000	2,173,991,000	109	204	138
6205	354,356,540	1,312,859,000	1,676,740,964	388,494,700	2,697,708,000	2,330,741,000	110	205	139
6570	375,326,200	1,390,086,000	1,775,372,785	413,852,400	2,871,940,000	2,488,251,000	110	207	140

Tabla 19. Balance de masas del segundo escenario futuro proyectado al año 2029.

ESCENARIO 3									
Día	BALANCE			CALCULADO EN VMF			BALANCE/ VMF		
	Bombeo	EVTR	Entrada flujo	Bombeo	EVTR	Entrada flujo	%		
2590	166,423,003	547,994,328	699,880,595	156,990,400	1,013,539,000	835,004,200	94	185	119
2920	187,627,479	617,816,000	789,054,571	176,973,100	1,159,737,000	861,675,100	94	188	109
3285	211,080,913	695,043,000	887,686,393	199,075,100	1,323,882,000	905,476,200	94	190	102
3650	234,534,348	772,270,000	986,318,214	221,177,100	1,489,879,000	957,886,900	94	193	97
4015	257,987,783	849,497,000	1,084,950,035	243,279,000	1,657,053,000	1,016,787,000	94	195	94
4380	281,441,218	926,724,000	1,183,581,857	265,381,000	1,824,988,000	1,080,969,000	94	197	91
4745	304,894,653	1,003,951,000	1,282,213,678	287,483,000	1,993,333,000	1,149,590,000	94	199	90
5110	328,348,088	1,081,178,000	1,380,845,500	309,585,000	2,161,706,000	1,222,011,000	94	200	88
5475	351,801,522	1,158,405,000	1,479,477,321	331,687,000	2,329,799,000	1,297,723,000	94	201	88
5840	375,254,957	1,235,632,000	1,578,109,142	353,789,000	2,497,350,000	1,376,311,000	94	202	87
6205	398,708,392	1,312,859,000	1,676,740,964	375,890,900	2,664,202,000	1,457,434,000	94	203	87
6570	422,161,827	1,390,086,000	1,775,372,785	397,992,900	2,830,199,000	1,540,805,000	94	204	87

Tabla 20. Balance de masas del tercer escenario futuro proyectado al año 2029.



Escenario futuro 1



FACULTAD DE INGENIERÍA

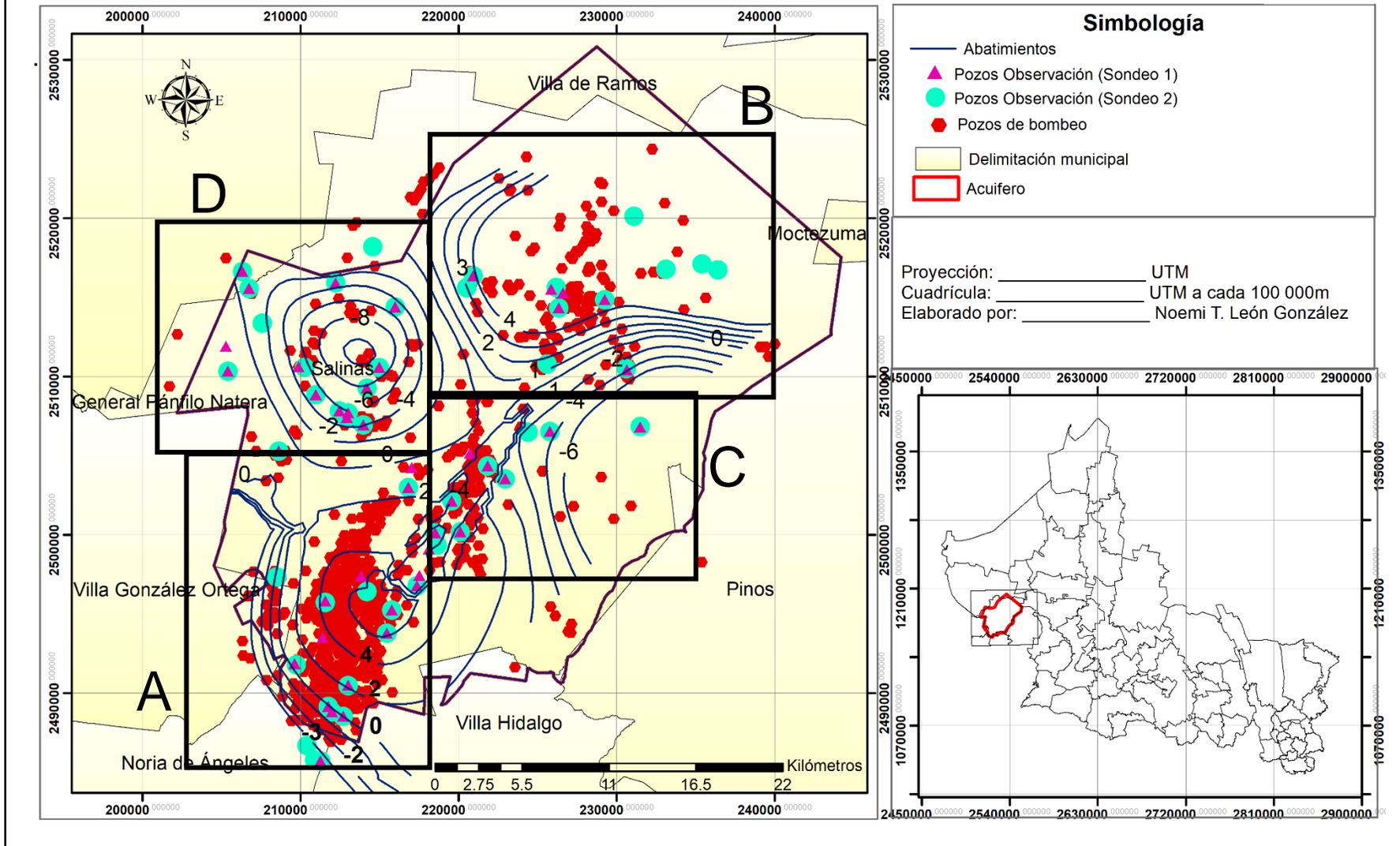


Figura 52. Resultados de elevaciones de nivel freático del escenario 1.



Escenario futuro 2

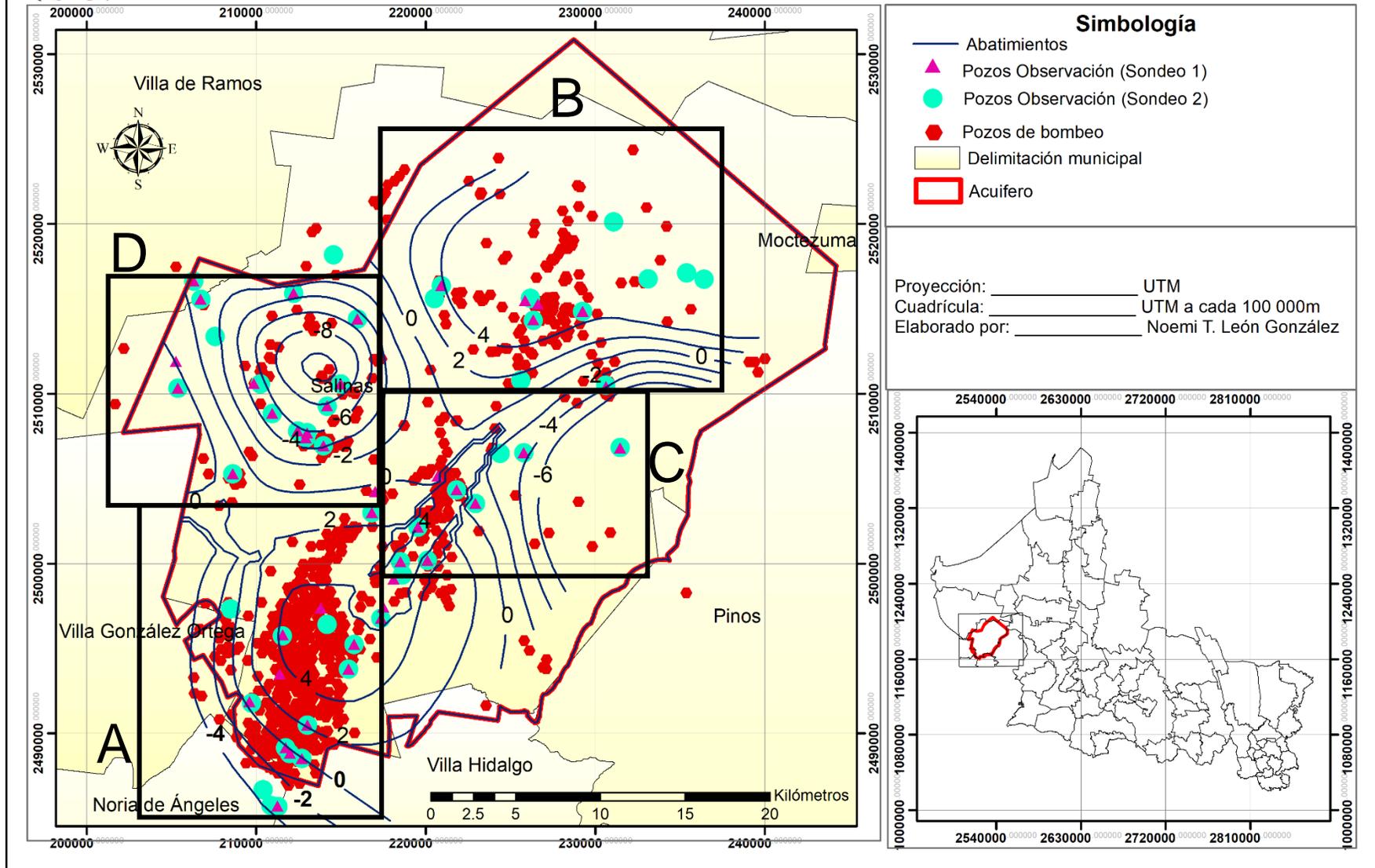


Figura 53. Resultados de elevaciones de nivel freático del escenario 2.



Escenario futuro 3

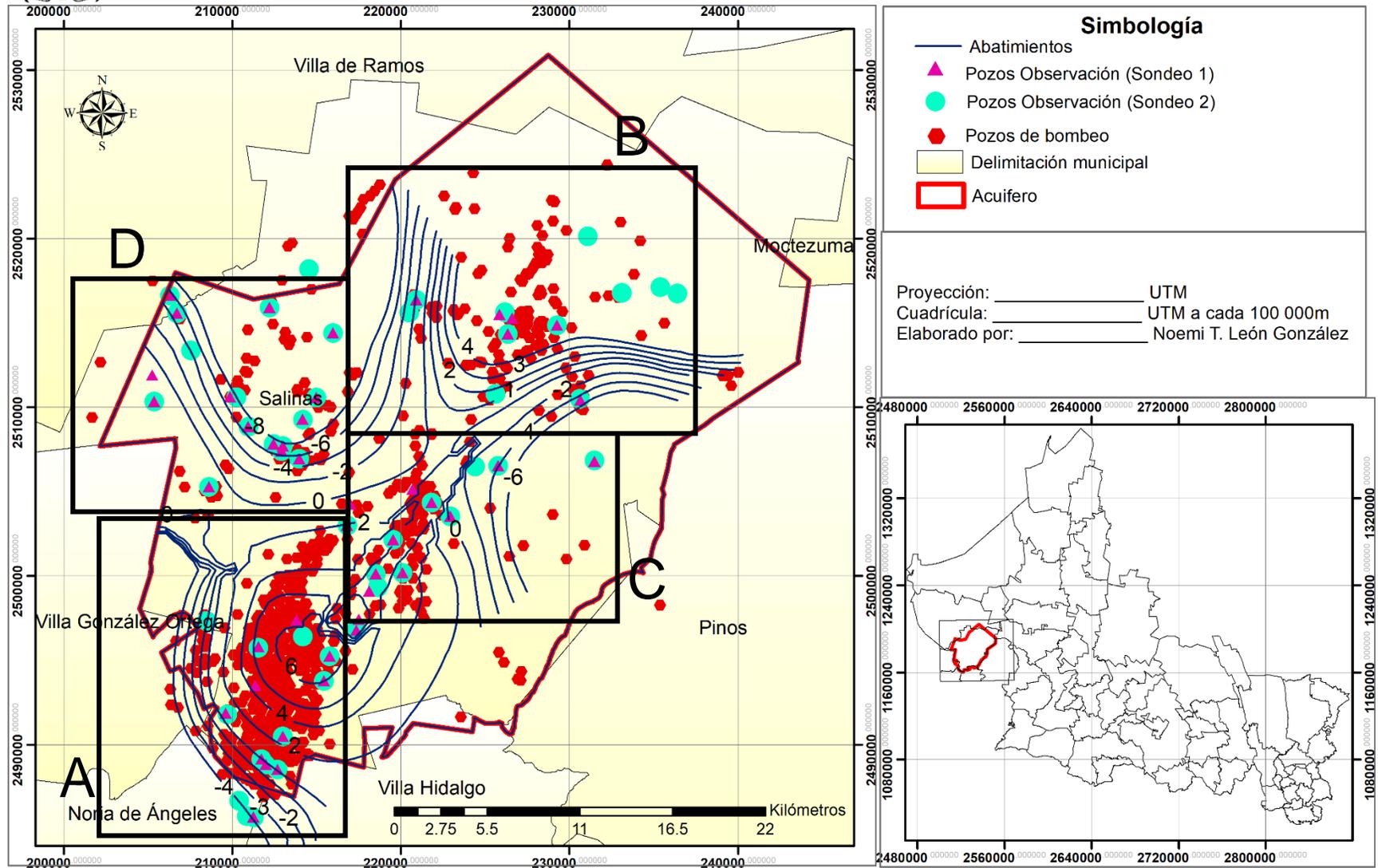


Figura 54. Resultados de elevaciones de nivel freático del escenario 3.

5. Propuesta de estrategias de gestión hídrica para el manejo del acuífero

Con base en los resultados y experiencias obtenidas durante el proceso del trabajo, se plantearon las siguientes propuestas de estrategias, las cuales hacen énfasis en lo que se considera una forma de apoyar en la mejora del manejo del acuífero con base en la información desarrollada. Con base en el trabajo realizado en campo y en la identificación de la mala calidad de la información disponible, se decidió proponer estrategias de gestión en dos rubros: 1. Estrategias para la generación de información de calidad y 2. Estrategias para el aprovechamiento sustentable del agua con base en los resultados de los escenarios futuros.

5.1 Propuestas de estrategias para la generación de información de calidad

Las estrategias que se plantean a continuación se proponen para la mejora del modelo como una herramienta de gestión y se debe trabajar en la calidad de la información hidrológica, geológica e hidrogeológica del área de estudio.

- Actualizar el censo de pozos y norias documentando la información como: profundidad del pozo, diámetro, caudal de extracción, tiempos de funcionamiento y construcción; esto se puede lograr por medio de entrevistas con los dueños o encargados de los pozos y así, poder cubrir la mayor parte del acuífero para llevar una mejor continuidad de los datos tanto en campo como en gabinete y así, tener un mejor conocimiento de la operación en el acuífero, y como consecuencia tener datos con mayor resolución para que puedan ser implementados en un modelo numérico.
- Establecer una red de monitoreo de profundidades de niveles estáticos en una mayor área del acuífero, que permita realizar mediciones continuamente de manera rápida y con información significativa.
- Instalar medidores totalizadores de flujo para definir con mayor detalle los caudales de extracción de los pozos, ya que no se tiene un control riguroso del bombeo, así como incluir los tiempos y tipos de uso a los que se les

destina el agua; por ejemplo, si es para uso agrícola, incluir tipos de cultivo, áreas irrigadas, temporadas de cultivo, etc.

- Generar información con respecto a todo el acuífero, ya que en los estudios analizados se pudo observar que suelen estudiar zonas puntuales las cuales no representan en su totalidad los sistemas de flujo del acuífero.
- Realizar estudios de geofísica distribuidos con dirección N-S a las secciones presentadas en este estudio, con las cuales se pueda conocer el subsuelo con mayor certidumbre; así como también realizar secciones en las zonas donde se propuso la entrada por flujo subterráneo y en las zonas donde no se puede acceder fácilmente. Esto es importante para definir de manera más concisa el espesor y tipo de roca del relleno de las primeras capas que conforman al acuífero, así como incluir análisis de suelos para obtener parámetros que ayuden a tener un mejor resultado con respecto a la infiltración y al flujo del agua subterránea.
- Realizar pruebas de bombeo, incluyendo que sean aplicadas de forma distribuida en el acuífero, contemplando una mayor diversidad de medios geológicos para definir a detalle los parámetros hidráulicos.
- Actualizar y mejorar la información meteorológica como lo son precipitación, temperatura, evaporación, presión atmosférica, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa y absoluta para realizar balances hídricos con un mayor nivel de resolución.
- Actualizar de manera periódica y constante las bases de datos recabadas en los sistemas de información geográfica para que se logre tener un historial del acuífero.

- Realizar campañas de monitoreo de calidad del agua para cotejar la dirección de flujo, confirmar los resultados geofísicos y así poder monitorear la calidad del agua para los diferentes usos que se le da.

En general, las estrategias propuestas se orientan a una generación más amplia de información meteorológica, hídrica, geológica e hidrogeológica, de tal manera que se pueda manipular de una manera confiable en el trabajo en gabinete y pueda también implementarse fácilmente en el modelo numérico.

5.2 Estrategias para el aprovechamiento sustentable del agua con base en los resultados de los escenarios futuros

Es complicado establecer estrategias que puedan llevar a un desarrollo sustentable de los recursos hídricos de cualquier sistema con base en el planteamiento y el conocimiento de un escenario futuro. Se requiere también de una amplia combinación de estrategias, actividades, actitudes y cambios de costumbres en los aprovechamientos del agua subterránea, así como de una constante vigilancia en el cumplimiento de las mismas.

De acuerdo con el modelo numérico y los resultados de los escenarios futuros, para el primer escenario se maneja la misma extracción para los próximos 10 años de modelación a futuro, lo cual, en términos de aprovechamiento presenta abatimientos de hasta 8 metros en zonas donde se tiene poca información y son pocos los pozos que se pudieron analizar y, lo mismo sucede con la parte Este, ya que la información para esa zona también es escasa. De igual manera sucede para el escenario 2, ya que es muy similar a los resultados del escenario anterior, pero, la situación planteada es más factible, ya que solo se aumenta la extracción por bombeo en los pozos de uso y consumo humano (con base en el porcentaje del incremento poblacional), que si bien, no es un incremento con gran impacto, las necesidades de consumo de agua las personas van creciendo. Y finalmente para el escenario 3, las entradas de flujo son menores y es por ello, que se presentan zonas con mayor abatimiento, ya que la extracción es la misma pero la entrada se reduce, causando

bajas en los niveles estáticos del agua; escenario que podría ser factible ante un efecto del cambio climático donde disminuya la entrada por flujo subterráneo derivada de una disminución en la precipitación.

Para el cuidado de la conservación y manejo de una cantidad fija de extracción, se requieren algunas actividades que ayuden y aseguren el cumplimiento de ello, para esto se proponen algunas estrategias:

Campañas de concientización con las personas de la región para un uso responsable del agua.

Creación de un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) en Salinas de Hidalgo para un mejor cumplimiento y funcionamiento de las concesiones integrado por usuarios del agua subterránea en distintos sectores con el fin de promover algunos programas informativos y educativos de la importancia del aprovechamiento consciente y responsable del agua.

Es necesario la implementación de trabajos como el que se presenta, que puede ser la base de un estudio técnico justificativo, con el cual se puedan integrar todas las partes para un mejor funcionamiento de los recursos hídricos, en este caso, con respecto al agua subterránea, los cuales permitan realizar propuestas de alternativas de aprovechamiento.

Este trabajo comprendió una sucesión de actividades, desde la recopilación necesaria de información para entender el funcionamiento del Acuífero Administrativo de Salinas de Hidalgo, hasta la implementación de los mismos en un sistema de modelación numérica, finalizando con el desarrollo de escenarios futuros, que permitieron establecer algunas estrategias para el aprovechamiento sustentable del agua subterránea en la región.

De tal manera que quedó planteado y elaborado un modelo hidrogeológico del Acuífero Administrativo de Salinas de Hidalgo, el cual representa una herramienta que puede ser utilizada para la gestión en el aprovechamiento del agua subterránea con una perspectiva de sustentabilidad.

Conclusiones

El proceso de estudio estuvo comprendido de 4 fases importantes: 1) recopilación de información, 2) realización de balances hídricos históricos, 3) implementación y calibración del modelo numérico del acuífero de Salinas de Hidalgo y 4) el desarrollo de los escenarios futuros.

La recopilación de información fue un trabajo importante, ya que en el acuífero de Salinas de Hidalgo no hay estudios hidrogeológicos, hidrogeoquímicos o balances previos o registrados referentes al agua subterránea y al manejo de ella.

Una de las conclusiones a las que se llegó con base en el balance hidrológico realizado manualmente, es que el acuífero está siendo sometido a un aprovechamiento intensivo, ya que la cantidad de agua que está siendo extraída por bombeo en conjunto con la evapotranspiración es mayor a la que entra por flujo subterráneo en el acuífero administrativo; ya que, como se mencionó anteriormente, la cantidad de agua que se infiltra no constituye una recarga.

Además, cabe mencionar que, con base en la interpretación de los datos recopilados, no se identifica que haya una salida lateral por flujo subterráneo; sin embargo, las salidas que presenta el modelo numérico y por lo tanto implementado en el balance hidrológico, son únicamente por bombeo y evapotranspiración, la cual se acumula en la zona de descarga del valle y en la Laguna de Salinas, donde se infiere que todos los escurrimientos, superficiales y subterráneos, llegan hasta esa zona.

Con respecto a la calidad de agua de los pozos analizados en este estudio, se pudo determinar que, de los 35 pozos estudiados, 26 de ellos sobrepasan el límite máximo permisible para uso y consumo humano según la NOM-127-SSA1-1994 para el hierro, esto se puede inferir que sea porque el acuífero está compuesto en

su mayoría por rocas sedimentarias, las cuales, la mayoría de ellas contienen hierro en diversos grados así como también, se puede inferir que este elemento se encuentre por la presencia de algunos depósitos de minerales de óxidos. Otro elemento muy importante y alarmante presente en el agua de algunos pozos es el arsénico, este puede llegar a ser muy tóxico para el organismo humano y puede causar efectos negativos en la salud de las personas. La presencia de este elemento es un poco preocupante ya que se encuentra en algunos pozos y norias que son utilizadas para abastecer a algunas comunidades y el agua es utilizada para uso y consumo humano, la presencia de arsénico se puede deber a las 3 zonas mineralizadas que se encuentran en el acuífero y las cuales contienen depósitos relacionados con arsénico, así como algunos minerales como la plata el oro y el cobre.

Finalmente, con el análisis de estos y algunos otros elementos, se puede concluir que, de los 35 pozos, 15 presentan mala calidad de agua, ya que, al menos hay un elemento, y en ocasiones hasta 3, presentes que sobrepasan el límite máximo permisible para uso y consumo humano (Anexo 4).

Una de las actividades importantes dentro de este estudio, fue la realización de la geofísica, ya que, por medio de los resultados de los sondeos eléctricos verticales, se pudo obtener con mayor detalle la geología del acuífero, sus espesores y así finalmente, poder determinar y agrupar en las diferentes unidades hidrogeológicas para su implementación dentro del modelo numérico.

Otra de las actividades que resultaron importantes fueron las pruebas de bombeo, con las cuales una de las conclusiones obtenidas es que los resultados de conductividad hidráulica en los medios geológicos en los que se realizaron las pruebas de bombeo para el pozo C1 si coincide con la bibliografía, pero en el caso de la Noria C7 no lo hace y esto puede deberse a que no se conocen los datos exactos del pozo y que hubo algunos problemas al realizar la prueba de bombeo, por lo tanto, los resultados arrojados pueden contener algunos errores significativos

que se ven reflejados al obtener las conductividades hidráulicas, por lo que, en este caso solo se utilizó el resultado de la prueba de bombeo del pozo C1.

Finalmente es importante la realización de las pruebas de bombeo ya que con base en los resultados se puede tener una idea de las conductividades y los medios geológicos que existen en el lugar y de ahí partir para proponer los valores iniciales en el modelo numérico. Se recomienda realizar más pruebas de bombeo con mayor duración de tiempo y en pozos situados en diferentes zonas o puntos estratégicos para que se pueda cubrir la mayor parte de la superficie del acuífero y así tener mayor información que ayude a conocer mejor los medios geológicos y definir más a detalle los parámetros hidráulicos.

La calibración del modelo numérico, constituyó una de las actividades más exigentes y demandantes, pero gracias a esto, fue posible obtener conclusiones de gran importancia.

Se infiere que con base en el modelo numérico, es probable que esté existiendo una extracción de bombeo mayor a la reportada por CONGAGUA en cada concesión por parte de los usuarios, ya que, en algunos casos se encontraban pozos con mala calibración dentro de una zona donde la calibración era óptima; esto puede deberse a la poca información, tanto geológica como hidrogeológica, y a los volúmenes de extracción que los usuarios están obteniendo de sus pozos, por ello, se recomienda realizar estudios más detallados en estas zonas para poder realizar una calibración con mayor precisión. Lo anterior no se implementó en el modelo, pero los resultados obtenidos sugieren esta posibilidad, es decir, no se simuló aspectos particulares del comportamiento del acuífero si no, que fueron modelados de manera regional.

Con respecto al desarrollo de los escenarios futuros, se trató de implementar escenarios que de acuerdo con el contexto de la región pudieran ser una posibilidad, aunque el escenario 3 es un tanto impredecible en este sentido. El escenario 1 plantea una extracción constante con respecto a los caudales de extracción del

último día de calibración (condiciones del año 2019); mientras que para el escenario 2, se plantea un incremento de la extracción únicamente en los pozos que son para uso y consumo humano, con respecto al porcentaje del incremento poblacional desde el año 1990 hasta el 2015; finalmente, el escenario 3 plantea una disminución en la entrada de agua por flujo subterráneo, la cual podría ser una posibilidad derivada de una disminución en la precipitación, en las zonas de recarga del acuífero y que están fuera del área del modelo implementado, como consecuencia de los efectos del cambio climático.

De acuerdo con los resultados del comportamiento del escenario 1, indican que ante el mantenimiento del esquema de bombeo tal como en el año 2019, al año 2029, se presentan abatimientos en la zona Sur que es donde se encuentra la mayor cantidad de pozos y los cuales permanecen encendidos por largas temporadas; para la zona Este y Oeste del acuífero también se presentan abatimientos de 6 y 8 m (0.6 – 0.8 m/ año), respectivamente; cabe mencionar que en la zona Oeste, se infiere la entrada por flujo subterráneo, por lo que los abatimientos generados por el modelo en esta zona, deben de analizarse y ser interpretados con reserva. Los niveles medidos en esta zona sugieren una heterogeneidad importante, lo cual podría explicar el comportamiento encontrado en los resultados del escenario, ya que la zona cuenta con pozos de bombeo con buena producción de agua y zonas con mala producción. Para la zona Este, la información es escasa y en su mayoría los aprovechamientos son de tipo papalote, por lo que se recomienda realizar un estudio más detallado en estas zonas. Para la zona centro y la zona del valle del acuífero, se presentan recuperaciones que, como se mencionó anteriormente, se interpretan como estabilidad de los niveles freáticos, ya que es la zona donde se infiere que los escurrimientos del agua se acumulan (Laguna de Salinas), lo que permite las salidas de agua por evapotranspiración. También, es importante mencionar que un escenario de este tipo es complicado debido al incremento poblacional y como consecuencia del desarrollo urbano, lo cual afecta en el incremento del consumo de agua.

Los resultados del escenario 2 (incremento de consumo de agua con relación al incremento poblacional) indican que, ante el incremento de los caudales de bombeo, al año 2029 para los pozos de uso y consumo humano, se tienen zonas de abatimiento de igual manera en la región de mayor extracción para uso agrícola y en la zona Este y Oeste; cabe mencionar que los resultados son similares al escenario 1, ya que los aprovechamientos de uso y consumo humano son pocos. Para la zona centro y del valle del acuífero, aparecen también zonas de estabilidad debido a la acumulación de agua en la laguna. Este escenario es una posibilidad real en términos del incremento en el consumo de agua debido al incremento poblacional y de actividades agrícolas e industriales en la región.

Para el escenario 3 (disminución de entrada de agua por flujo subterráneo) manteniendo el bombeo constante del último año de calibración hasta el 2029 (como el escenario 1), indica que, al disminuir la entrada en la zona Oeste, se presentan mayores abatimientos con respecto a los 2 escenarios anteriores, lo mismo sucede para la zona del valle, se puede apreciar un ligero cambio en los abatimientos, pero manteniendo estables los niveles en la zona del valle y de la Laguna de Salinas.

Los resultados de los escenarios deben ser revisados y confirmados con nueva información que se genere y la recalibración del modelo, para tener una mayor confiabilidad de las condiciones que se pueden presentar en el futuro ante diversos esquemas de aprovechamiento del agua subterránea y/o condiciones meteorológicas que se reflejen en el balance hídrico, como puede ser la entrada por flujo subterráneo.

Finalmente, los abatimientos en los 3 escenarios son similares, resultando entre 6 y 8 metros en 10 años, es decir, 0.60 a 0.80 m/año, los cuales, representan un comportamiento promedio esperado en los acuíferos con base en las extracciones de agua subterránea.

Cabe mencionar que el modelo presenta algunas limitaciones reflejadas en la resolución de efectos locales por lo que solo se puede interpretar en el comportamiento hidrodinámico regional y esto es debido a la falta de información y de estudios de diversa índole en la región, así como tener una red de distribución para los sondeos de los aprovechamientos, con lo cual se logre tener un historial continuo y en toda la extensión del acuífero.

No se planteó un escenario con los pozos de uso agrícola, debido a que se detectó en las campañas de medición de niveles, que dicha actividad no estaba desarrollándose de manera importante debido a algunos problemas económicos y a la falta de precipitación, lo cual fue confirmado mediante la conversación directa con algunos usuarios.

Finalmente, algunos efectos locales no se pueden considerar debido a que no hay alta resolución de información en la región, por lo cual, se recomienda seguir trabajando la zona de estudio generando información de geofísica, mediciones de la profundidad de los niveles estáticos, pruebas de bombeo, monitoreo de la calidad del agua y en general, generar de manera continua, temporal y espacial, información que conlleve a un mejor entendimiento del comportamiento hidrodinámico del acuífero de Salinas de Hidalgo, para poder mejorar los resultados obtenidos en este trabajo y en su momento poder plantear estrategias de aprovechamiento sustentable del agua subterránea, enfocadas en la operación del acuífero.

Referencias

Abderrahman, W., Elamin, A., Al-Harazin, I., Eqnaibi, B. 2007. Management of Groundwater in Urban Centers: A Case Study Greater Dammam Metropolitan Area. *Arabian Journal for Science & Engineering*, Jun2007, Vol. 32 Issue 1C, p49-63, 15p.

Arellano-Gil, J. 1988. "Geología de la porción septentrional de la Sierra de Peñón Blanco, estados de San Luis Potosí y Zacatecas". México, D.F., Univ. Nal. Autón. México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, (Inédita) 115 p.

Barajas-Nigoche, L., 2008, "Análisis de deformación en las localidades de la secuencia siliciclástica marina del triásico superior de la porción occidental del estado de San Luis Potosí". San Luis Potosí Facultad de Ingeniería, Instituto de Geología, tesis profesional.

Barboza-Gudiño, R., Tristán-González, M., Torres-Hernández, J. R., 1999, Tectonic Setting of pre-Oxfordian units from central and northeastern Mexico: A review, *Geological Society of America* , Special Paper 340, 197-210.

Barboza-Gudiño, R., Hoppe M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macias, P., 2004, "Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la población noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 21, No.003. pp.299-319

Bartolini, C., 1998. Stratigraphy, Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Mesozoic Nazas Formation , North-Central, Mexico, Department of Geological Sciences, The University of Texas at El Paso, Dissertation, 558 p.

Batista, J. 2001. Modelación Matemática de la Terraza del Río Sagua. Ingeniería Hidráulica y ambiental, 2001, Vol. 22 Issue 1, p21-25, %p.

Betancur, T., Palacio C., 2009. La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño).

Cardona, A., 2018. Manual de interpretación de afloros y pruebas de bombeo por métodos analíticos y numéricos.

Castañeda, M., 2019. Ejecución de pruebas de bombeo (may). <https://doi.org/10.13140/RG2.2.30613.37607>

Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. 2001. Sinopsis de los Estudios Hidrogeológicos y Modelos Matemáticos de los Acuíferos del Estado de Guanajuato. Estudios de Acuíferos. Versión Electrónica en Disco Compacto. 18 Estudios. CEAG. Guanajuato, Guanajuato, México.

Conagua. 2006. Capítulo 3 de El Ciclo Hidrológico. Estadísticas de Agua en México. Edición 2006. 33-70 pp. Disponible en Internet. Citado: 26 de marzo del 2007. Páginaweb: <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>

CONAGUA, 2007. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Pruebas de bombeo.

CONAGUA, 2011. Capítulo 8 Agua en el mundo. Estadísticas del agua en México, edición 2011.

CONAGUA, 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Salinas de Hidalgo, (2403), Estado de San Luis Potosí

Custodio, E., Llamas, M. 1996. Sección 16 de Modelos en Hidrología Subterránea. Hidrología Subterránea. Tomo II. Segunda Edición Corregida. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España, 1996. ISBN 84-282-0281-8 (Tomo II). 1571-1566 p. 96pp

Domenico, P.A. & Schwartz, F.w. ,1998, *Physical and chemical hydrogeology.* Wiley, 502 Pp.

Durán-Araiza, R. 2012. Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del acuífero del Salar de Atacama, II región de Antofagasta, Chile.

Eguiluz-de Antuñano, S., Aranda-García, M., Buitron-Sánchez, B. E. (2014). Las formaciones Gran Tesoro y Nazas: evolución de las secuencias Triásico Superior-Jurásico Inferior en México y su significado tectogenético. Bol. Soc. Geol. Mex. [online]. 2014, vol.66, n.3, pp.507-539

Freeze, R.A.& Cherry, J.A.,1979, *Groundwater.* Prentice-Hall, 604 pp.

Galicia-Ovalle, R., 2005, Estudio estratigráfico-estructural del área San Antonio del Rul, Mpio. De Moctezuma, SLP. Universidad Autonoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, tesis profesional.

Gadeon, M., Wemaere, I., Marivoet, J. 2007. Regional Groundwater Model of North-East Belgium. Journal of Hydrology, Mar2007, Vol. 335 Issue 1/2, p133-139, 7p.

Guvanasen, V., Wade, S. 2000. Simulation of Regional Ground Water and SALT Water Intrusión in Hernando Country, Florida. Ground Water. Vol. 38 Issue 5. p772. 12 pp.

Humphrey, W. E. 1949. "Geology of the Sierra de los Muertos areaMexico". Geol. Soc. America, Bull. v 60, pp 80-176.

INEGI, 2004, Guía para la interpretación de la cartografía.

Kirshen, P. 2002. Potential Impacts of Global Warming on Groundwater in Eastern Massachusetts. *Journal of Water Resources Planning & Management*, May/Jun2002, Vol. 128 Issue 3, p216, 11p.

Kruseman, G.P y de Ridder, N.A. 1994. Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, P.O. Box 45,6700 AA Wageningen, The Netherlands. Second Edition. Publication 47.

Labarthe, G. y Tristán, M. 1978. "Cartografía Geológica. Hoja San Luis Potosí". Univ. Autón. San Luis Potosí, Inst. Geol. Metalurgia. Folleto Técnico n 59, 28 p.

Labarthe, G., Tristán, M. y Aranda, J. 1982. "Revisión Estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí". Univ. Autón. San Luis Potosí, Inst. Geol. Metalurgia. Folleto Técnico n 85, 208 p.

Labarthe, G. y Aguillón R., A. 1986. "Cartografía Geológica 1:50,000. Hojas Salinas y Villa de Ramos, Estados de San Luis Potosí y Zacatecas". Univ. Autón. San Luis Potosí, Inst. Geol. Metalurgia. Folleto Técnico n 106, 52 p.

Lillo, J, 2008. Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural de las aguas. Documentos GEMM (Grupos de estudios de minería y medioambiente).

McPhee, J., Yeh, W. 2004. Multiobjective Optimization for Sustainable Groundwater Management in Semiarid Regions. *Journal of Water Resources Planning & Management*, Nov/Dec2004, Vol. 130 Issue 6, p490-497, 8p.

Moore, J, Zaporozec, A, Mercer, J. 2005. Capítulo 1 de El Agua Subterránea, un Recurso Vital. Una introducción al Agua Subterránea. Instituto de Geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico N° 128. San Luis Potosí, S.L.P, México 10-12 pp.

Obregón, V., Saavedra, I., Nava, M. 2006. Evaluación del Flujo de Agua Superficial y Subterránea en la Ciudad Universitaria de Caracas. *Tecnología y Construcción*. V. 22, N° 2.35-42 pp. ISSN 0798-9101.

Ordoñez, J, 2011. Cartilla técnica: Aguas subterráneas-acuíferos. Sociedad Geográfica de Lima.

Ortíz, R. 1996. Glosario Geohidrológico. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. México. Editorial Universitaria Potosina. 180 p. ISBN 968-7674-00-8.

Price, M. 2003. Capítulo 3 de Agua en Movimiento. Agua Subterránea. Ed. Limusa S.A.de C.V. 13-19 pp. ISBN 968-18-5560-4

Ramírez, R. 2000. Groundwater For Modeling of the Naivasha Basin, Kenya. *Minería y Geología*, 2000. Vol. 17 Issue 2, p15-21, 7p.

Rathod, K.S., & Rushton, K.R. 1991. Interpretation of pumping from two-zone layers aquifers using a numerical model.

Reyes, A, Quintero, M. 2009. Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora. Revista digital universitaria UNAM, 2009, Vol.10, N°8.

Rocha, -Escalante, H. (2009). Estrategias para el desarrollo sustentable de los sistemas de flujo en el acuífero de Rioverde, S.L.P

Rocha, -Escalante, H. (2016). Groundwater use in the Mérida-Progreso región, Yucatán, and its implications in the coastal área ecosystems requirements.

Rodriguez-León, L. (2012). Evolución geológica del campo volcánico Salinas–Villa de Ramos (Maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí

Rogers, C. L., Cserna de, Z., Talavera, E. y Ojeda, J. 1961. "Reconocimiento geológico y depósitos de fosfatos del norte de Zacatecas y áreas adyacentes de Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí. Cons. Rec. Nat. no Renovables, Bol. n 56,322 p.

Salazar, - Hurtado, R. F, 2019. Correlación geohidrológica y geofísica-electromagnética en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.

Sánchez, - Olivares, 2013. Interpretación de la geomorfología dentro de un estudio hidrogeológico utilizando sistemas de información geográfica, caso de estudio del acuífero Salinas de Hidalgo, S.L.P

Sanders, L. & s. J. Weathcraft ,1993, *Groundwater flow*. In: Maidment, D.R. (Ed.) Handbook of Hydrology. McGraw Hill.

Sahuaquillo, A, 2009. La importancia de las aguas subterráneas. Revista Académica Ciencias Exactas Físicas Naturales, Vol. 103, N°. 1, pp 97-114, 2009.

Schlumberger Water Services. 2007. Hydrogeologic Impact Análisis at Acton Quarry. Acton, Ontario. Case Study. Waterloo Hydrogeologic, Inc. A Schlumberger Company. Waterloo, ON, Canada. July 2007

Silva-Romo, G., Arellano-Gil, J., Mendoza-Rosales, C. C., (1993). El papel de la secuencia marina triásica en la evolución jurásica del norte de México. First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference.

Tristán, M. y Aguillón, R. A. 1982. "Estudio Geológico-minero del área Peñón Blanco, estados de San Luis Potosí y Zacatecas". Univ. Autón. San Luis Potosí, Inst. Geol. Metalurgia. Folleto Técnico n 76, 63 p.

Tristan-González, M., Torres-Hernández, R., 1994. "Geología de la sierra de Charcas, estado de San Luis Potosí". Univ Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol.11, No.2.

Tristán-González, M., 2008. "Evolución Tectono-volcánica durante el Paleógeno en la porción sur-oriente de la Mesa Central. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias posgrado en Ciencias de la Tierra.

Tokgos, M., Yilmaz, K., Yazicigil, H. 2002. Optimal Aquifer Dewatering Schemes for Excavation of Collector Line. *Journal of Water Resources Planning & Management*, Jul/Aug2002, Vol. 128 Issue 4, p248, 14p.

Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., 2006, *Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua.* Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Grupo Base de Gw.Mate.

Vallner, L. 2003. Hydrogeological Model of Estonia and its Applications. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology*, Sep2003, Vol. 52 Issue 3, p179-192, 14p.

Vásquez, M. 2005. Evaluación del Potencial Hidrogeológico del Acuífero La Bomba, Cuenca del Río Banano, Limón, Costa Rica. Tesis de Maestría.122pp.

Zavala-Monsiváis, A., 2000, Petrografía de Rocas Volcánicas pre-oxford ianas en la Parte Occidental de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Trabajo recepcional, 112 p.