

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

“MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
HIDRODINÁMICO DEL AGUA
SUBTERRÁNEA DE LA ZONA
COMPREDIDA ENTRE CARBÓ,
PESQUEIRA Y ZAMORA, SONORA”.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.

P R E S E N T A:

FCO. ARIEL MIRANDA RODRÍGUEZ



HERMOSILLO, SONORA A JUNIO DEL 2010



DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a con todo mi amor, primeramente a ti Dios que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa y a un hermoso hijo.

A mi padre con un profundo agradecimiento por el amor y cariño que en vida me ofreció, gracias papá muchas gracias, por ese ejemplo de hombre responsable y trabajador difícil de igualar (†).

A mi madre por brindarme su infinito amor, por su apoyo y comprensión, por luchar para que saliera adelante en mis estudios universitarios.

A mi esposa Noelia e hijo Ariel Isaac que los amo y que han sido un motor en mi vida, una fuerza y un gran impulso para que el camino a la meta que me he forjado sea fácil de llegar.

A mis hermanos por su comprensión y su amor fraternal que me han brindado su apoyo incondicional.

A mis maestros que tuvieron mucha paciencia y que creyeron en mí, especialmente al *Dr. Rafael Rodríguez Torres (El Chivito)* por todos sus consejos, maestro, compañero y amigo (†).



AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradecer a **CONACYT** por otorgarme su apoyo económico, el cual fue muy importante para finalizar mis estudios de maestría en la Universidad de Sonora.

Agradecer a mi director de tesis al MC. Ismael Minjarez Sosa y Co-Director Dr. Miguel Rangel Medina, a mis sinodales Dr. Rogelio Monreal Saavedra y al MC. José Alfredo Ochoa Granillo, a todos ellos por su valiosa y gran colaboración en el presente trabajo académico.

Agradezco al Geol. Mariano Morales por su contribución e interpretación de datos de geofísica, a la empresa IDEAS por su aportación con las bases de datos piezométricos, al MC. José Enrique Herrera Salazar por su ayuda en el balance hidrogeológico.

A todos mis compañeros que me brindaron no solo su amistad, sino también su experiencia y conocimientos: Geol. José Robles Pasos, Geol. Pedro Ygnacio Hernández Rábago, Geol. Heliodoro Morales Morales, Geol. Juan Miguel Zúñiga Hernández, MC. Martín Molinar Tabares, MC. José Arturo López Ibarra, MC. Lucas Antonio Oroz Ramos, MC. Jorge Omar Ortiz Esparza.



CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Etapas a desarrollar	2
2.- TRABAJOS PREVIOS	3
3.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	4
3.1. Localización	4
3.2. Vía de comunicación	5
4.- CLIMATOLOGÍA	5
4. 1 Temperatura media anual	8
4. 2 Precipitación media anual	9
4. 3 Evapotranspiración media anual	9
5.- EL MEDIO NATURAL DEL ACUÍFERO	10
5.1 Hidrografía	10
5.2 Acuíferos	13
5.3 Fisiografía	13
5.4 Geología	14
5.4.1 Estratigrafía	16
5.4.2 Estructuras	17
5.5 Unidades Geohidrológicas	19
5.6. Geología del Subsuelo	21
5.6.1 Gravimetría	24
5.6.2 Geometría del basamento	28
6.- MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	30
6.1 Modelo Geológico.	30
6.2 Modelo Hidrogeológico	31
7.- CENSO DE APROVECHAMIENTOS	32
7.7.1 Usos de Agua	32
7.2 Piezometría del área de estudio	35
7.2.1 Profundidad al Nivel Estático, 2007	36
7.2.2 Elevación del Nivel Estático, 2007	36
7.2.3 Evolución del Nivel Estático, 2006-2007	37



8.- BALANCE INTEGRAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	40
8.1 Parámetros hidráulicos	40
8.2 Cambio de almacenamiento	43
8.3 Recarga vertical	45
9.- MODELACIÓN MATEMÁTICA	46
10.- INTEGRACIÓN DE PARÁMETROS HIDRAÚLICOS	51
10.1 Condiciones de Fronteras	51
10.2 Diseño de la malla	52
10.3 Determinación de Capas	53
10.4 Conductividad Hidráulica	54
10.5 Recarga	56
10.6 Pozos de Bombeo	56
10.7 Pozos de observación	58
11.- RESULTADO DE PREDICCIÓN	59
11.1 Predicción 2015	59
11.2 Calibración	61
12.- DISCUSIÓN	64
13.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES	67
14.- RECOMENDACIONES	68
15.- REFERENCIAS CITADAS	69



CONTENIDO DE FIGURAS

3.1	Mapa de localización	5
4.1	Tipo de climas	7
4.2	Temperatura media anual	8
4.3	Precipitación media anual	9
4.4	Evapotranspiración media anual	9
5.1	Hidrología superficial	10
5.2	Regiones hidrológicas	11
5.3	Subregiones Hidrológicas	12
5.4	Cuencas hidrológicas	12
5.5	Límites de Acuíferos	13
5.6	Fisiografía	14
5.7	Geología	16
5.8	Columna estratigráfica	17
5.9	Mapa estructural	18
5.10	Unidades geohidrológicas	20
5.11	Ubicación de secciones geoeléctricas	21
5.12	Sección Carbó	23
5.13	Sección Pesqueira	23
5.14	Sección Zamora	24
5.15	Ubicación de secciones gravimétricas	25
5.16	Perfil Carbó	26
5.17	Perfil Pesqueira	27
5.18	Perfil San Pedro -Pesqueira	27
5.19	Perfil Tec de Monterrey	28
5.20	Esquema tectónico	28
5.21	Modelo de fosas	29
6.1	Modelo conceptual geológico	30
6.2	Modelo de unidades hidrogeológicas	31
7.1	Tipo de aprovechamientos	32
7.2	Censo general de aprovechamientos	33
7.3	Uso de aprovechamientos	34
7.4	Profundidad al nivel estático, 2007	35
7.5	Elevación del nivel estático, 2007	37
7.6	Tendencia de evolución	38
7.7	Evolución del nivel estático 2006-2007	39



8.1	Celdas de entrada de flujo	42
8.2	Cálculo del cambio de almacenamiento	44
8.3	Modelo del balance conceptual	45
9.1	Modelo conceptual Mod-Flow	47
9.2	Etapas principales de un modelo matemático	49
10.1	Condiciones de frontera	51
10.2	Malla del modelo	52
10.3	Capas para el modelo hidrodinámico	53
10.4	Pruebas de bombeo	55
10.5	Gráfica de bombeo constante	56
10.6	Pozos de bombeo	57
10.7	Pozos de observación	58
11.1	Predicción elevación del nivel estático 2015	59
11.2	Comparación de niveles estáticos 2007-2015	60
11.3	Celdas secas en el área de estudio	61
11.5	Pest en visual Mod-Flow	63
11.6	Puntos de calibración	63
12.1	Esquema de datos erróneos	65



RESUMEN

En el presente trabajo se llevó a cabo un modelo matemático visual con Mod-Flow, el cual tiene como objetivo rectificar el problema de abatimiento que presenta el área de estudio. El modelo de flujo predice el comportamiento al año 2015 a partir de las condiciones iniciales del año 2005 donde a los aprovechamientos se le asignó un bombeo de extracción con la situación más críticas, es decir extracción las 24 hrs durante los 365 días del año.

El modelo muestra como resultado un problema de abatimiento en la parte sur de la zona de interés, como consecuencia del volumen de extracción y la concentración de aprovechamientos el cual causa los descensos de los niveles estáticos, el cual causa un efecto de inversión en el flujo subterráneo afectando a su acuífero vecino Mesa del Seri-La Victoria.



1. INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se encuentra dentro de uno de los acuíferos más importante del estado Sonora, el acuífero Río Zanjón. En el área de estudio se siembra la vid que convierte al Estado de Sonora en uno de los líderes a nivel nacional en la producción de uva, alcanzando el 58% de la producción estatal.

El área de interés abarca 4 municipios importantes que son: Opodepe, Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo. Dentro del marco de estudio se encuentran 5 poblados principales como: Carbó, Estación Pesqueira, San Miguel de Horcasitas, Estación Zamora y San Pedro el Saucito.

La zona de estudio se encuentra dentro de la zona de veda publicada en el Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación del 2 de junio de 1967, para la apertura de nuevos aprovechamientos de aguas subterráneas. Esta disposición fue ratificada en el Decreto con fecha 19 de septiembre de 1978. Se han desarrollado varios estudios por diferentes instituciones y empresas privadas para calcular la disponibilidad del acuífero y dar un mejor manejo al sobrebombeo que se lleva hoy en día, así como el comportamiento de las zonas de abatimiento piezométrico que presenta dicha área.

El rasgo hidrológico más notable en el área de estudio es el río Sonora, originado en la sierra de Cananea, el cual recorre 317 kilómetros hasta la presa Rodolfo Félix Valdez (El Molinito). Aguas abajo de este sitio, recibe recarga de los principales ríos tributarios por la margen derecha, el río San Miguel y el río Zanjón, para terminar su recorrido en la presa Abelardo L. Rodríguez.

La zona de este acuífero queda dentro de la jurisdicción de los Distritos de Desarrollo Rural No 142.-Ures y 144 – Hermosillo , el mayor usuario de este acuífero es del tipo agrícola y pecuario, que actualmente se bombea $85 \text{ Hm}^3/\text{año}$, esta cantidad de extracción ha provocado descensos en los niveles de agua subterránea y la extinción de los niveles freáticos, por lo tanto es importante predecir el comportamiento del flujo y controlar las grandes extracciones de agua para sustentar tanto la siembra de la uva como la vida misma, así como el acuífero del río Zanjón.



1.1 OBJETIVOS

El presente trabajo pretende resolver el comportamiento de un área de bombeo delimitado por un acuífero intermontano a partir de un modelo hidrológico matemático con Visual Mod-Flow versión 4.2 con Win-Pest observando su comportamiento piezométrico así como sus condiciones de frontera, extracción de bombeo, tipo de litología y unidades hidrogeológicas que afectan al área de estudio. Es objetivo fundamental el conocer los movimientos del agua subterránea y el medio que la contiene, para predecir el comportamiento para años futuros, así mismo prevenir zonas de abatimientos y reducir sus efectos a causa del sobrebombeo.

Como objetivos secundarios se contemplan:

- ✓ Determinar la geometría del área de estudio.
- ✓ Determinar un balance de aguas subterráneas.
- ✓ Determinar las condiciones actuales del acuífero.
- ✓ Crear la implementación de un modelo matemático de flujo hidráulico subterráneo con Mod-Flow y observar el comportamiento del agua subterránea en el área de estudio.
- ✓ Calibrar la información de las condiciones actuales y predecir el comportamiento del acuífero, conforme al resultado del mismo.
- ✓ Predecir los niveles del agua subterránea para diferentes tiempos.

1.2 ETAPAS A DESARROLLAR

- Compilación, integración, resumen y análisis crítico de estudios previos.
- Descripción del entorno fisiográfico y análisis geológico, climatológico e hidrológico.
- Interpretación de la geología del subsuelo con información geofísica y geológica existente y realización de estudios geofísicos complementarios.
- Compilación e integración del censo de aprovechamiento y piezometría.
- Definición de los parámetros hidráulicos a partir de pruebas de bombeo e información existente.
- Determinación de la geometría del acuífero.
- Determinación del Balance de aguas subterráneas para el área de estudio.
- Realización de un modelo hidrológico matemático.
- Conclusiones y Recomendaciones.



2. TRABAJOS PREVIOS

Existen estudios recientes con diferentes alcances y objetivos, realizados por diversas dependencias federales y estatales, pero se dificulta su acceso debido a que no son del dominio público o se encuentran en la ciudad de México.

La Cuenca del Río Zanjón ha sido estudiada con diversos fines y tipos de investigaciones desde 1977, enfocados al estudio de los aprovechamientos de sus acuíferos, ya que es una zona cercana a Hermosillo y que aporta una cantidad importante de agua potable y principalmente para uso agrícola.

El valle del Río del Zanjón y zonas aledañas conforman una región con estudios desde diferentes puntos de vista y escalas, no son muchos, pero los existentes son las bases de conformar el marco físico de referencia. A continuación se expone en orden cronológico los resúmenes de los estudios recopilados y que guardan una relación directa con la geología y el agua subterránea del área de estudio.

Estudio climatológico de los valles de los ríos San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora. Este estudio fue realizado por la empresa Ariel Construcciones, S.A. de C.V. en 1970. Tuvo como objetivo conocer las condiciones climatológicas que imperaban entre otros en el valle del Zanjón, nivelación topográfica de brocales y levantamiento geológico superficial.

Se compiló la información climatológica de 49 estaciones, se elaboraron planos de isotermas, isoyetas, evaporación potencial de los años 1923 a 1969, aunque en algunas estaciones no había información completa. Se realizó un análisis detallado del clima. Se propuso la instalación de estaciones climatológicas automatizadas.

Otro estudio fue el de Integración Geohidrogeológica en el valle del Río Zanjón para suministro de agua en bloque a Hermosillo, Sonora. Fue realizado por la empresa Consultores en Agua Subterránea, S.A. de C.V. en 1987, este estudio fue base fundamental para integrar la información que se encuentra actualmente. Los objetivos de este estudio fueron: definir las condiciones geohidrológicas en la que se encontraba el acuífero del valle del Río Zanjón para 1987 y definir el volumen aprovechable adicional de agua subterránea, sin inducir efectos perjudiciales en el acuífero y proponer recomendaciones para la explotación futura del acuífero.



Un estudio más fue el de Actualización Geohidrológica del acuífero del valle del Río Zanja. Municipio de Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, Sonora. Estudio realizado por la empresa Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. DE C.V. en el año 2000. Este estudio tuvo como objetivo de conformar un marco geológico con base en la información disponible en una campaña de exploración geofísica complementaria, estimar los espesores de las rocas susceptibles a contener agua y determinar las estructuras que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea.

La Universidad de Sonora desarrolló un estudio para Comisión Estatal del Agua (CEA) en el año 2005, Estudio de Piezometría y Evolución de Niveles, En La Cuenca Media y Alta Del Río Sonora y Río Bacoachi donde se creó un modelo matemático para el acuífero del Zanjón abarcando el área de estudio del presente trabajo, el modelo predice el abatimiento en la zona sur del área de estudio a la altura del poblado de Zamora. El bombeo oficial para este estudio se tomo REPDA proporcionado por CONAGUA (anteriormente CNA). Se utilizo un total de 514 aprovechamientos registrados para pozos de bombeo, con un volumen concesionado de 85,277.110 Mm³ para todo el acuífero.

La empresa IDEAS realizó un estudio para las oficinas administrativas (COTAS) del río Zanjón, en el cual se llevó un censo detallado de dicho acuífero, tomando datos de piezometría, caudales, datos constructivos de aprovechamientos, así como sus ubicaciones de éstos. El estudio se llevó a cabo a finales del año 2007 y principios del 2008, en el cual se considera el censo más minucioso y cuidadoso que se halla hecho hasta hoy, siendo una base muy sustentable para el presente estudio en cuantos datos piezométricos, caudales y datos de hidráulicos.

3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

3.1. Localización

El área de estudio se localiza al norte de la ciudad de Hermosillo abarcando principalmente los municipios de Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, el límite de de estudio tiene una forma rectangular con una superficie de 3,664 Km² (Figura 3.1).

En esta área seleccionada para el modelo se localiza la mayoría de los aprovechamientos de agua subterránea del acuífero del Zanjón, donde se encuentran los mayores gastos de extracción, siendo ésta de mayor interés para llevar a cabo un modelo de simulación matemática del agua subterránea.

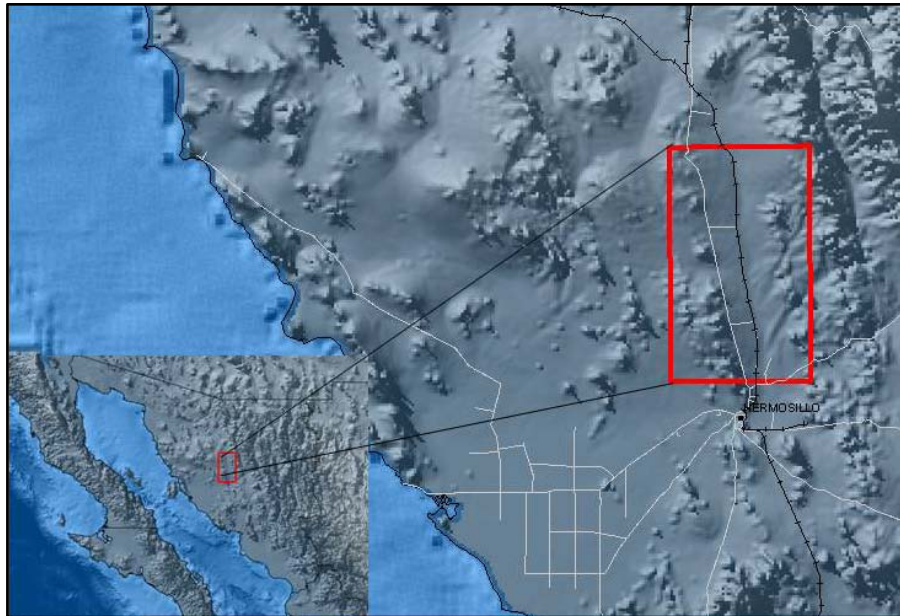


Figura 3.1.- Mapa de localización del área de estudio

3.2. Vía de comunicación

Las principales vías de comunicación al área de estudio es la carretera internacional No. 15 México - Nogales, que se ubica en la porción occidental de la zona de estudio y el ferrocarril del pacífico que corre en forma paralela a la carretera. Existen un sin número de accesos de área a través de caminos pavimentados, brechas y terracerías que conducen al área de estudio.

4.- CLIMATOLOGÍA

El área de estudio se caracteriza por su aridez, efecto que conlleva a una serie de resultantes que se manifiestan en el tipo de vegetación o en la falta de humedad de los suelos, esto debido a la escasa precipitación que existe en relación a los índices de evaporación, aunando una mala distribución de las corrientes superficiales perennes, cuyos cauces han sido modificados debido a las diferentes obras hidráulicas.



Las variables regionales del clima se determinan, en gran medida por la influencia de los vientos provenientes del noreste, mismos que hacen un recorrido continental; razón por la cual las nubes van perdiendo humedad al ir chocando contra los elementos orográficos existentes en su trayecto, siendo el último de ellos la Sierra Madre Occidental. Lo anterior provoca que su arribo a las llanuras sonorenses sea carente de humedad; por otro lado el mar no proporciona la humedad suficiente debido a las bajas temperaturas del agua durante el año, por lo que no se considera una evaporación considerable, como consecuencia, los climas predominantes en la cuenca del río Sonora son de carácter seco y semiseco en cuanto que a los húmedos y templados, están restringidos a las partes altas de las sierras.

Los climas, desérticos abarcan cerca del 46 % de la superficie de Sonora, y se caracterizan por su precipitación inferior a los 400 mm al año y su temperatura media anual de 18 a 25°C. Estos climas se consideran muy extremos, debido a su oscilación térmica, es decir, la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la del mes más frío es mayor a 14°C. Dentro de la cuenca del Río Sonora, se tienen tres variedades de este clima: Los climas predominantes en el área de estudio son del tipo muy seco, semicálido con invierno fresco ($BWhw(x^{\circ})$) y muy seco con invierno cálido ($BW(h^{\circ})hw(x^{\circ})$). Que se caracterizan por ser un clima muy seco cálido y con lluvias en verano. (Figura 4.1)

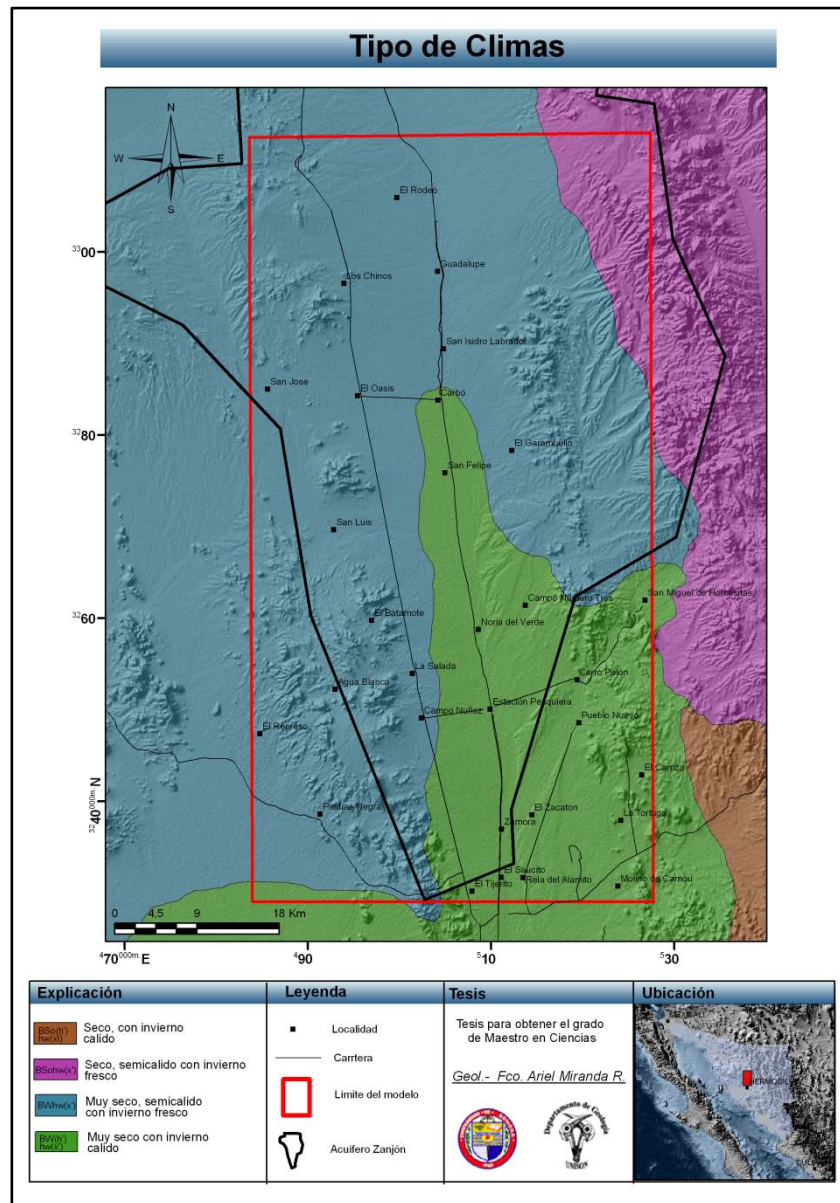


Figura 4.1.- Mapa que muestra los tipos de climas en el área de estudio.

Se analizó la información de 6 estaciones climatológicas las cuales se encuentran más cercanas al área de estudio, todas ellas administradas por Comisión Nacional del Agua (Tabla 1). Estas estaciones fueron utilizadas para el análisis climatológico. El período más lluvioso se presenta en el mes de julio y la lluvia invernal ocurre en los meses de enero, febrero y marzo.



La tabla 1 presenta las estaciones climatológicas con valores de temperatura, precipitación y evapotranspiración media anual de las seis estaciones circundantes al área de estudio, donde las estaciones Carbó y Pesqueira se encuentran sobre la zona de interés. La temperatura y la precipitación son los de más solidez en el registro para todas las estaciones, por ello los periodos de análisis varían en años debido a la falta de datos de meses o años en algunas estaciones, ya sea para uno o para los tres parámetros, pero en todos los casos se buscó realizar el análisis de 30 años, de 1962 a 2003.

Tabla 1. Valores del análisis de las estaciones climatológicas.

ESTACIÓN	X	Y	Precipitación	Temperatura	Evaporación	Evapotranspiración
Carbó	503493	3285058	358	22	2161	347
El Cajón	530407	3260169	434	22	2244	405
El Orégano	528562	3233296	377	25	2113	367
Pesqueira	510082	3249945	403	22	1808	381
Querobabi	497938	3324207	374	21	2377	358
Rayón	541540	3286612	490	21	1968	443

4.1 Temperatura Media Anual

Las temperaturas en las estaciones oscilan entre 21°C a 22°C de valor promedio de temperatura media anual con excepción de la estación del Orégano, que presenta un valor de 25°C como valor máximo. El valor mínimo lo representan las estaciones de Querobabi y Rayón con 21°C como muestra la figura 4.2. Por lo tanto el clima en el área de estudio es ideal para la siembra de la uva y otros tipos de cultivos.

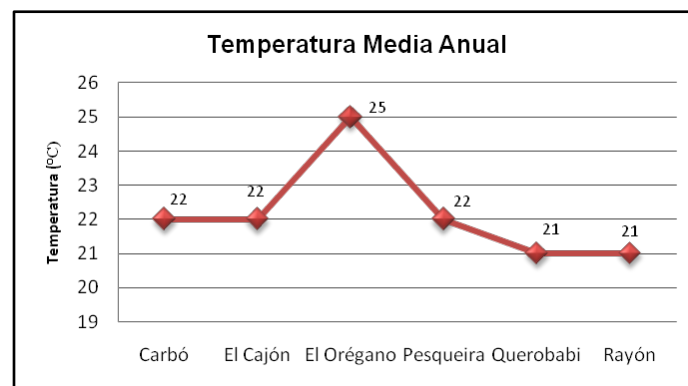


Figura 4.2. Distribución de Temperatura Media Anual.

4. 2 Precipitación media anual

El tipo de lluvias en el área de estudio es característica de invierno y verano, similar a la mayor parte de la región norte del país. En invierno la precipitación es frontal, debido a las masas de aire polar que intrusionan las masas de aire semitropical existente. En verano el tipo de lluvia es una conjugación de tipo orográfico y por convección, debido a su posición fisiográfica, así la lluvia es de carácter chubasco, de gran intensidad y corta duración. En el área de estudio se tiene una precipitación total anual de 358 mm como mínima en la estación Carbó y una máxima de 490 mm en la estación de Rayón. Las estaciones que se encuentran en el área o circundantes a ella, registra una precipitación media anual es de 406 mm. (Figura 4.3).

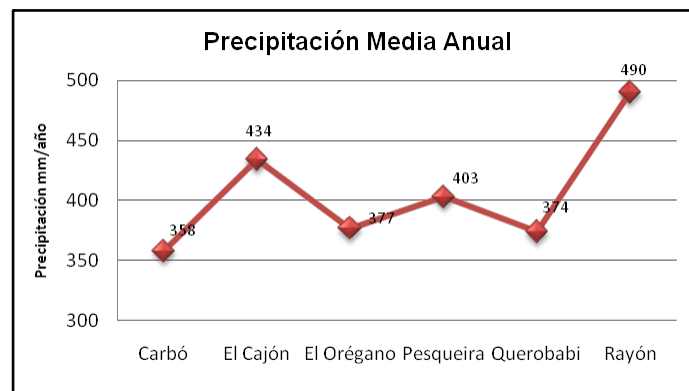


Figura 4.3. Precipitación media anual.

4. 3 Evapotranspiración media anual

El área de estudio presenta una Evapotranspiración promedio de 384 mm, mientras que el valor más alto lo presenta la estación Rayón con 443 mm y el valor más bajo con 347 mm en la estación Carbó (Figura 4.4).

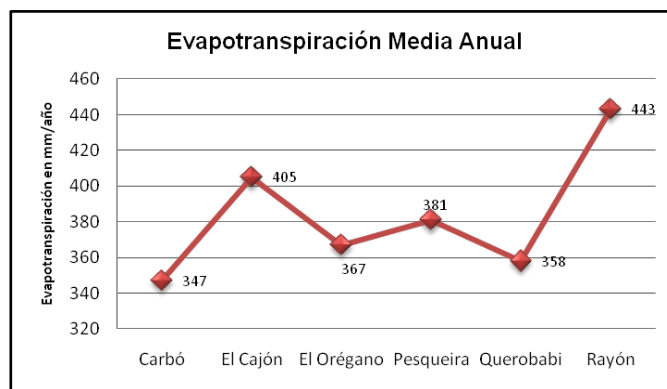


Figura 4.4. Evapotranspiración media anual.

5. EL MEDIO NATURAL DEL ACUÍFERO

5.1 Hidrografía

Las corrientes superficiales más importantes en el área de estudio, es el río El Zanjón y el río San Miguel de Horcasitas, tiene su origen en la porción Norte del estado de Sonora, con una dirección general de escurrimiento de Norte a Sur y de Noreste Suroeste a la altura del poblado de Zamora. La Figura 5.1 describe los principales ríos y arroyos que se encuentran en el área de estudio, donde todos los arroyos descargan y alimentan principalmente el Río Zanjón.

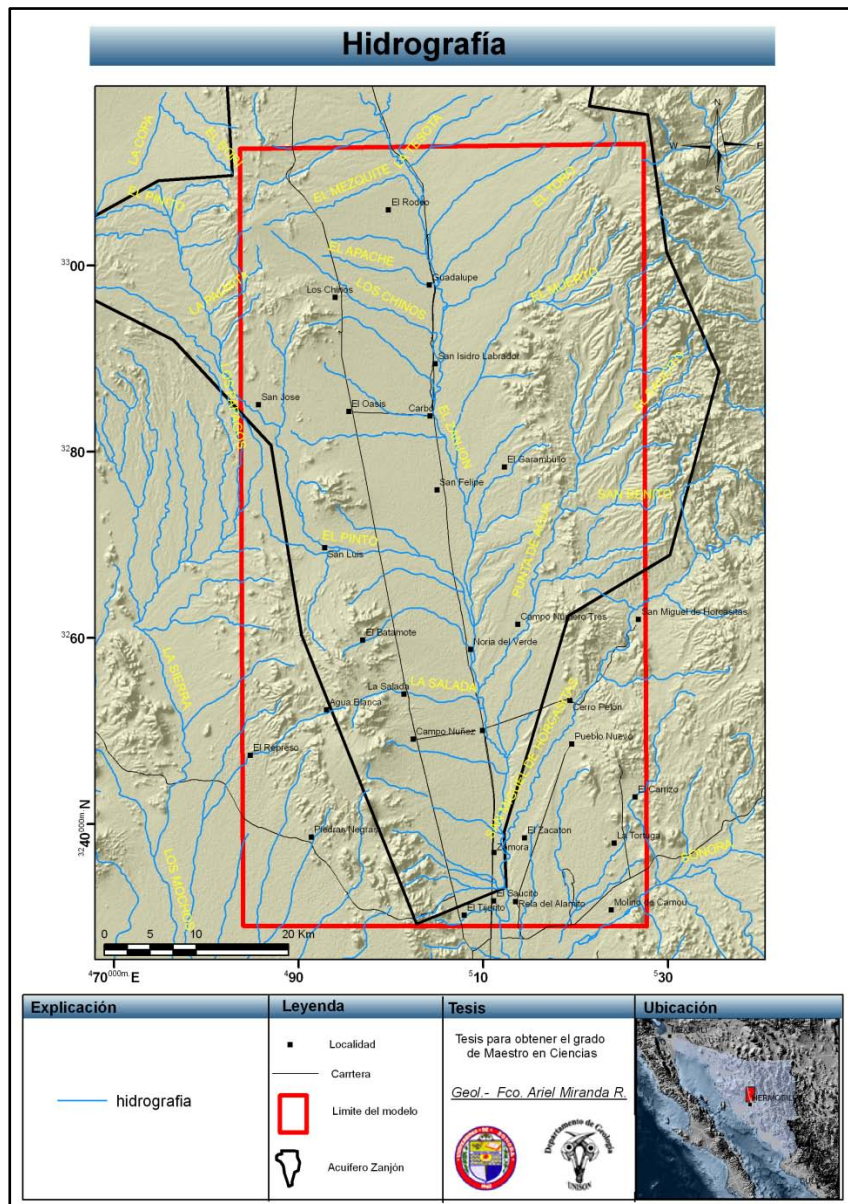


Figura 5.1.- Mapa que muestra la hidrología superficial.

El río Zanjón es producto de los escurrimientos originados en el flanco occidental de la sierra de la Madera, a partir del cerro Cucurpe. Los principales afluentes son el arroyo El Pinto que se le une por margen derecha a la altura de Carbó y el arroyo de Moreno por margen izquierda a 18 km aproximadamente aguas arriba de la estación Zamora. En su trayecto toca varios poblados, entre ellos están Querobabi, Carbó, Pesqueira y Estación Zamora, posteriormente se le une al río San Miguel, haciendo un recorrido total de 130.4 km hasta esta unión y después 22.3 km para desembocar a la Presa Abelardo Rodríguez L.

Dentro del sistema hidrográfico del estado de Sonora se encuentran seis regiones hidrológicas como lo describe la Figura 5.2, sin embargo el área de estudio se localiza dentro de la región con clave RH-9 (Sonora Sur) misma pertenece a las vertientes del océano pacífico.

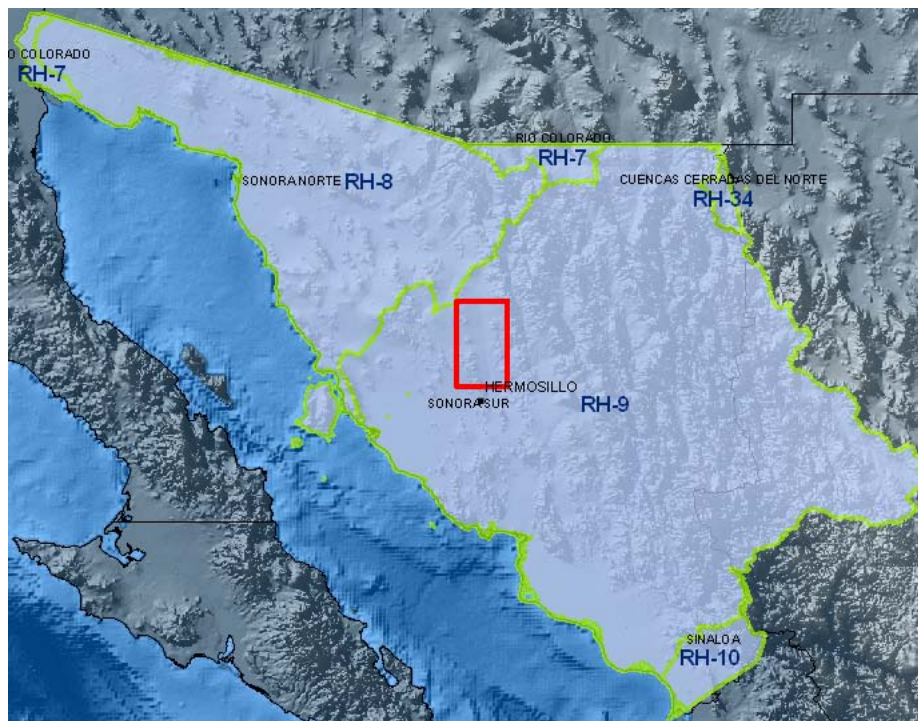


Figura 5.2.- Regiones Hidrológicas de Sonora.

El área de estudio se encuentra localizado dentro de la subregión hidrológica Río Sonora que se ubica en la RH-9 (Región Hidrológica Sonora Sur) que es la segunda subregión más grande antes que la subregión Río Yaqui (Figura 5.3).



Figura 5.3.- Subregiones Hidrológicas de Sonora.

La mayor parte del área de estudio se localiza dentro la cuenca Río Sonora, solo una pequeña parte al suroeste del área de estudio se ubica en la cuenca del Río Bacoachi (Fig. 5.4).

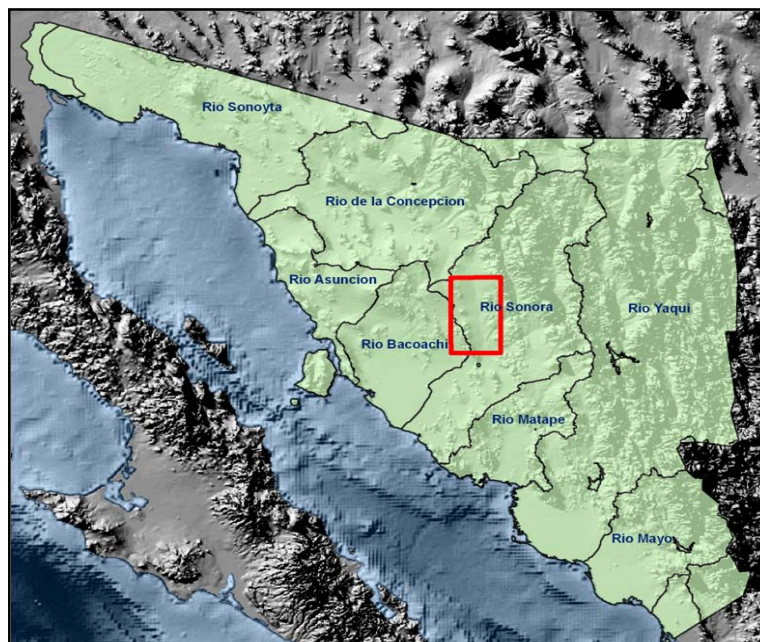


Figura 5.4.- Cuencas Hidrológicas de Sonora

5.2 Acuíferos

La parte central y más importante de la zona de estudio se ubica dentro del acuífero Zanjón según límites administrativos oficiales de CONAGUA. La parte sur del área de estudio incluye porciones del acuífero de la Costa de Hermosillo, Mesa del Seri - La Victoria, y Río San Miguel (Figura 5.5).



Figura 5.5.- Límites de Acuíferos en la zona de estudio.

5.3 Fisiografía

El área de estudio es común cuando se busca ubicarla en el marco Fisiográfico que haya sido denominada de diferente forma por diversos autores (Figura 5.6). En este trabajo se considera de tipo de bajada con lomerío, que es la que mas predomina en el área de estudio, posteriormente sierras escarpadas y lomerío con cañadas.

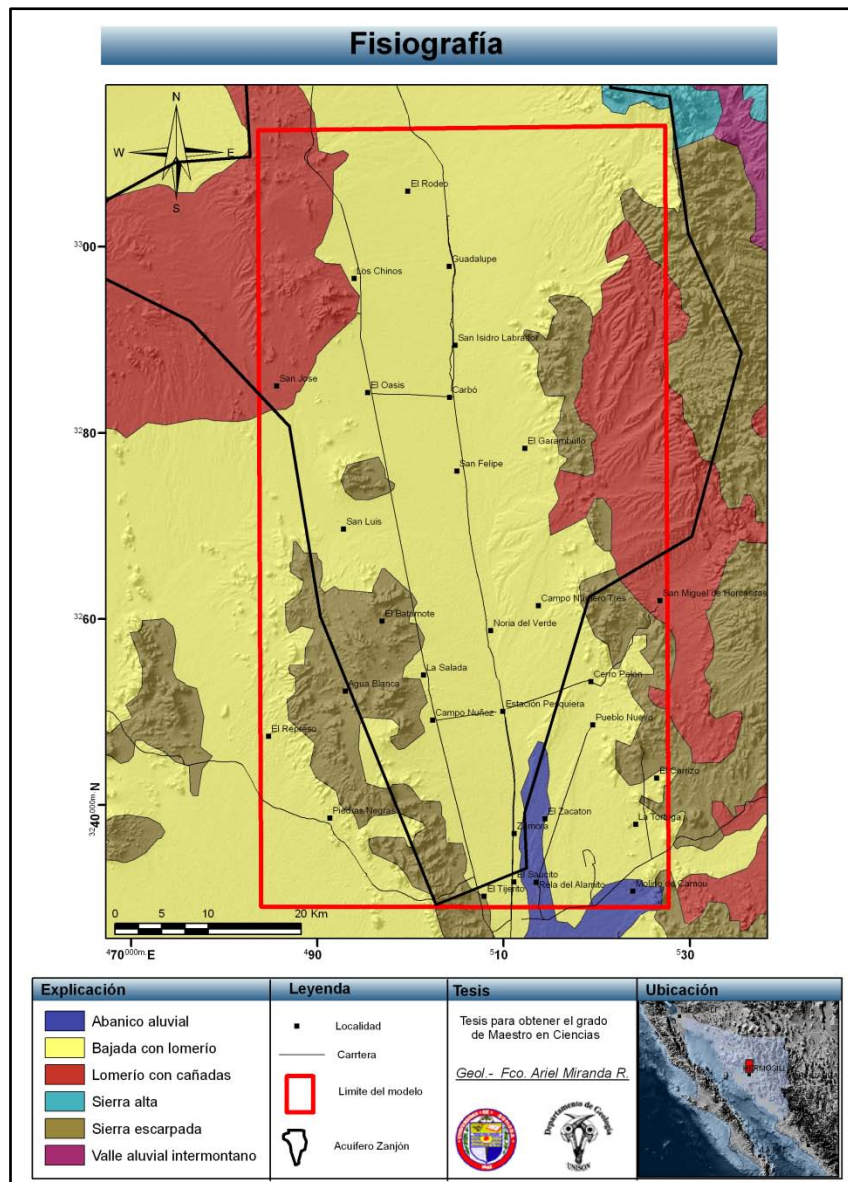


Figura 5.6.- Fisiografía del área de estudio.

5.4 Geología

El área de interés se encuentra sobre un valle alargado orientado NW–SE, como producto de la tectónica de el Bassin & Range sonorenses (De Cserna, 1988), el cual originó cerros aislados y grandes valles fallados y escalonados. La diferencia de altitud entre los valles del río Sonora, San Miguel y Zanjón siendo éste último más bajo, en donde se depositaron materiales ígneos y sedimentarios continentales producto de los eventos geológicos que han afectado a la zona del noroeste de México.



El área de estudio presenta una geología con edades que varían desde el Precámbrico al Reciente y una gran heterogeneidad litológica, predominando las rocas ígneas intrusivas que afloran en varias localidades al poniente de zona de estudio, destacando principalmente las rocas de tipo intrusivo del Cretácico de composición granito y granodiorita (ksTpaGr-Gd). Todas estas rocas forman parte del Batolito Laramídico de Sonora, por último en la parte central del área de estudio tenemos el aluvión del edad reciente (Qhoal) como depósito de relleno sedimentario.

Por otra parte tenemos también aflorando rocas del tipo Tobas Riolíticas-Riolitas del Terciario (ToTR-R) que se compone de una secuencia volcánica de composición riolítica, tipo fluidal depositada en las partes superiores de las sierras formando escarpes casi horizontales.

Por otra parte el Granito-Gneiss (Precámbrico medio PTm Gr-Gn) que se puede definir como un conjunto de rocas ígneo-metamórficas, que se encuentra aflorando en la parte norte del zona de estudio.

Una secuencia de Caliza-Arenisca (Precámbrico Superior PCz-Ar) se localiza en la parte SW del área de estudio, que consiste en intercalaciones de rocas detríticas-carbonatadas, representadas por areniscas y calizas en general.

Finalmente tenemos el Conglomerado Polimíctico (Cuaternario Pleistoceno QpTCgp) aflorando en gran parte del área de estudio las cuales son remanentes de depósitos de sedimentos de arenas gravas, conglomerados, compuestos de bloques, cantos, guijarros y clastos con gran variedad litológica.

La zona de estudio se encuentra localizada en un amplio valle en el que las unidades observadas en superficie son principalmente rocas ígneas intrusivas y extrusivas, depósitos detríticos continentales y depósitos aluviales, sin embargo se considera que en el subsuelo se encuentran secuencias de materiales diversos reportando edades desde el Paleozoico hasta el reciente que involucra un gran intervalo de tiempo (Guysa, 2000). La figura 5.7 se muestra la geología del área de estudio.

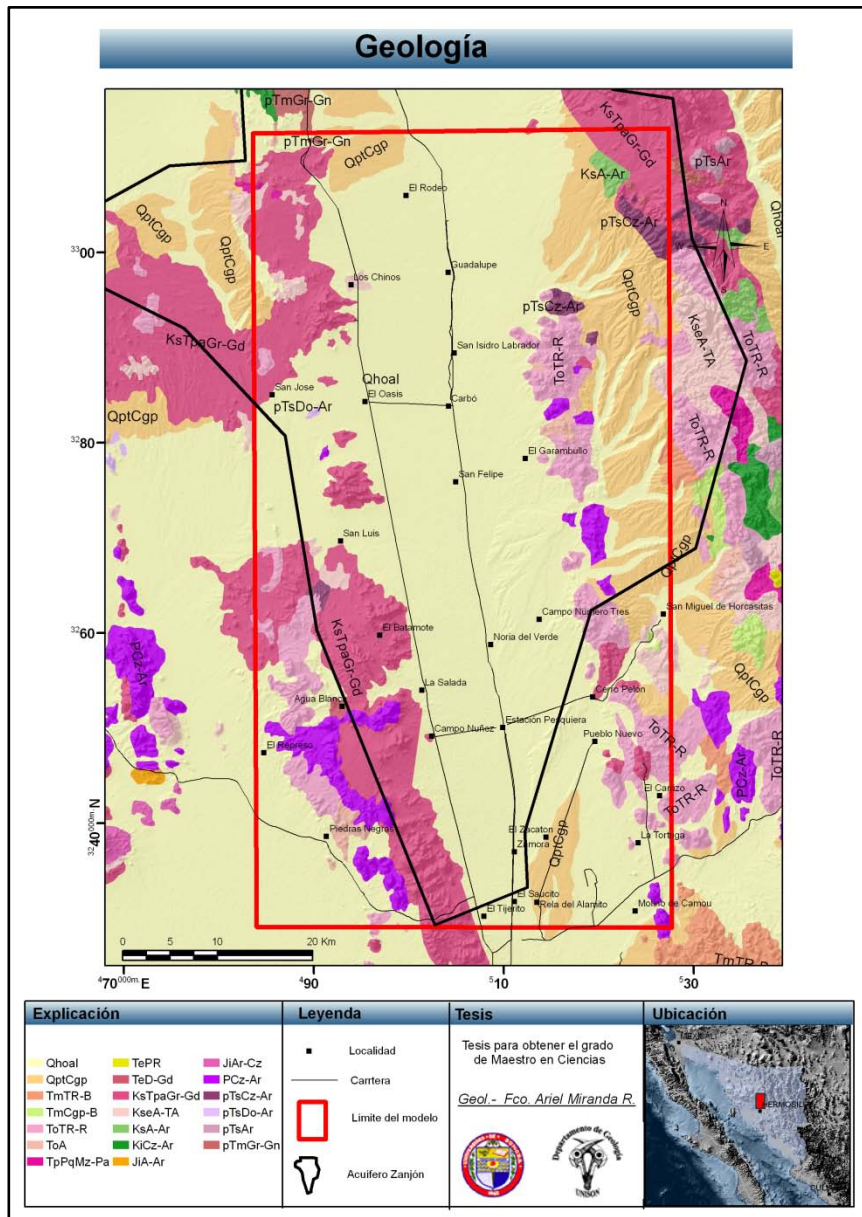


Figura 5.7.- Geología del área de estudio. Tomado del SGM (1998)

5.4.1 Estratigrafía

La zona de estudio se localiza en un amplio valle en el que las unidades observadas en la superficie son principalmente rocas ígneas intrusivas y extrusivas, así como depósitos detríticos continentales y depósitos aluviales.

La Figura 5.8 muestra la columna estratigráfica del área de estudio, donde se puede apreciar las diferentes unidades litológicas que comprende desde el Paleozoico Mississípico representado por Calizas con crinoides hasta los más recientes depósitos aluviales y eólicos.

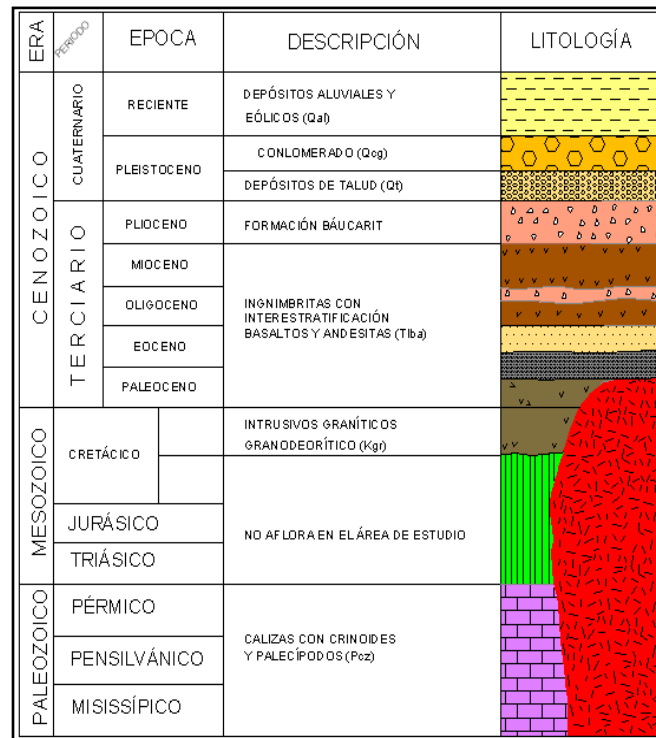


Figura 5.8. Columna Estratigráfica del área de estudio. (modificado de Guysa2000)

5.4.2 Estructuras

Gran parte de la morfología del área de estudio obedece a patrones geológico estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de aquí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de los principales ríos de la cuenca, se deben a grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) que siguen los ríos como zonas de debilidad (Figura 5.9).

Las marcas de drenaje de la subcuenca del Río Zanjón son principalmente de tipo subsecuente y consecuente, el segundo predomina en la cuenca con un sistema de drenaje enrejado. El drenaje enrejado es producto del afloramiento de rocas volcanosedimentarias, sedimentarias y volcánicas, de débiles a resistentes que forman fajas casi paralelas.

En la parte baja las marcas de drenaje son de tipo consecuente, producto únicamente de la topografía circundante. También podemos observar estructuras anulares de diferentes tamaños con lineamientos en la sierra muy cerca del poblado del Batamote y Agua Blanca.

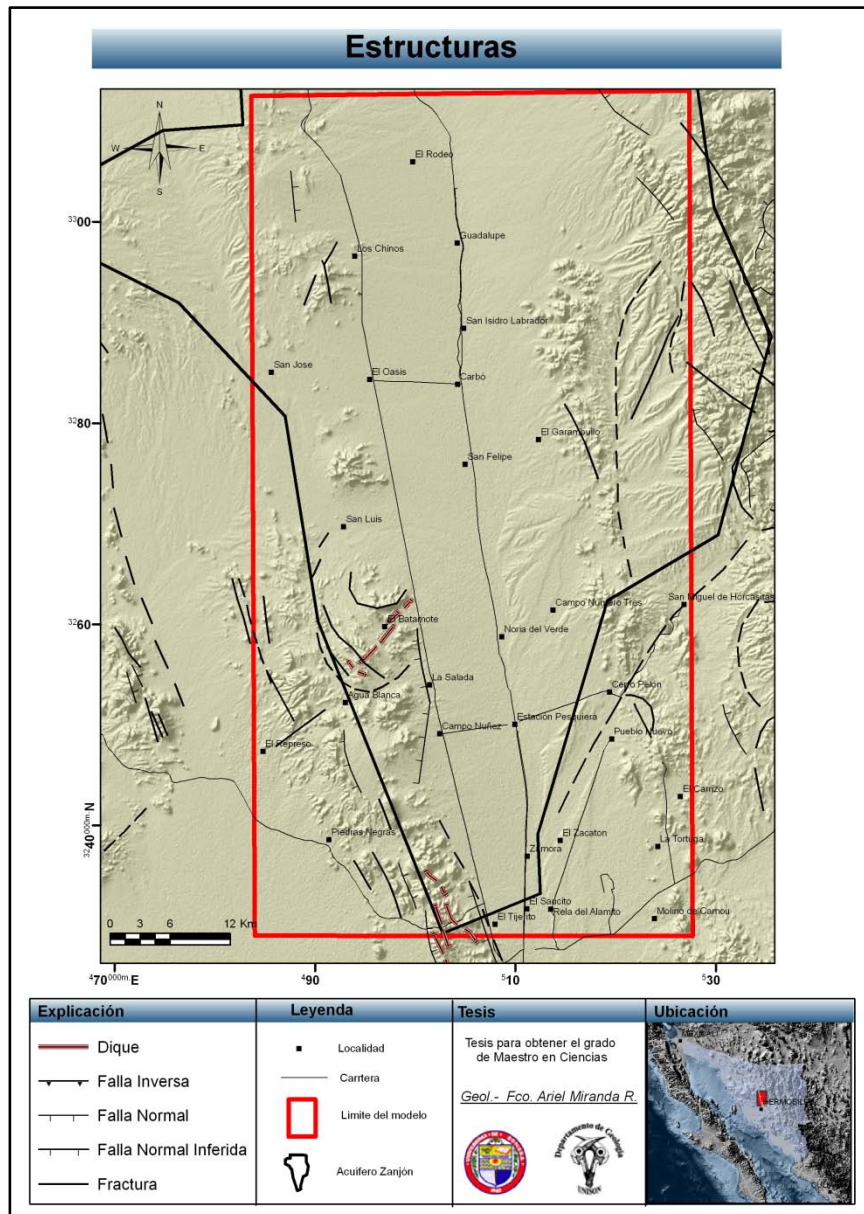


Figura 5.9- Mapa de estructural del área de estudio.

Estructuralmente la cuenca del Río Zanjón presenta un patrón regional, un sistema de fallas paralelas en dirección general NW-SE, el cual corresponde al tipo Basin and Range de fosas y pilares (horst-graben).



A mediados del Terciario (Mioceno temprano) sobreviene la tectónica distensiva, trayendo como consecuencia la apertura del Golfo de California y consecuentemente la formación de la provincia de sierras y valles paralelos (Basin and Range). El Basin and Range es el evento tectónico más importante, ya que produjo una serie de cuencas donde se depositaron sedimentos no consolidados de aluviones y terrazas aglomerático-conglomeráticas (King, 1939; Munch, Colleta y Angelier, 1983).

5.5 Unidades Geohidrológicas

Estas unidades se han definido considerando las posibilidades de las rocas de contener agua, tomando en cuenta las características físicas, litológicas y estructurales; además de la influencia en el comportamiento geohidrológico dentro de cada unidad. Según los materiales que constituyen las unidades expuestas en la superficie del área de estudio, se determinaron dos grupos: consolidados y no consolidados (Figura 5.10).

Material no consolidado con posibilidad alta

Esta unidad comprende la mayor superficie del valle en el área de estudio y se encuentra distribuida en la porción central, centro oriental, noreste y norte del área de estudio. Está constituida por conglomerados semiconsolidados del Terciario y Pliocuaternario, así como aluviones, depósitos eólicos y de piedemonte, acumulados en los valles de El Zanjón y San Miguel.

Material no consolidado con posibilidad media

Esta unidad aflora de manera dispersa en el área de estudio, principalmente en las laderas de las sierras, los materiales que lo constituyen son conglomerados del Terciario y Cuaternario, ocasionalmente intercalados con basaltos. Los fragmentos varían en tamaño desde cantos rodados hasta limos y arcillas que rellenan las depresiones de estos lugares, los materiales son de composición variable y en ocasiones cementados. Estos materiales presentan posibilidad media a alta y constituyen acuíferos de tipo libre.

Material no consolidado con posibilidad baja

Esta unidad se localiza en las laderas de las sierras, la cual se encuentra constituida por un conglomerado polimíctico, con fragmentos redondeados incluidos en una matriz arcillo-arenosa ligeramente cementada. Los clastos son derivados de rocas volcánicas ácidas, básicas y algunas sedimentarias sobreyacen en forma discordante a rocas riolíticas y tobas ácidas impermeables así como también a rocas intrusivas y sedimentarias.

Material consolidado con posibilidad baja

Unidad que comprende la mayor parte de la sierra del área de estudio, se constituye por rocas ígneas, sedimentarias, volcanosedimentarias y metamórficas que conforman la zona montañosa. Esta unidad muestran características no favorables para conformar acuíferos, debido a que la gran mayoría de los cuerpos rocosos son impermeables o de baja a baja - media permeabilidad; sin embargo, el fracturamiento intenso de poca profundidad que predomina en las sierras altas, da a lugar a un reducido grado de infiltración.

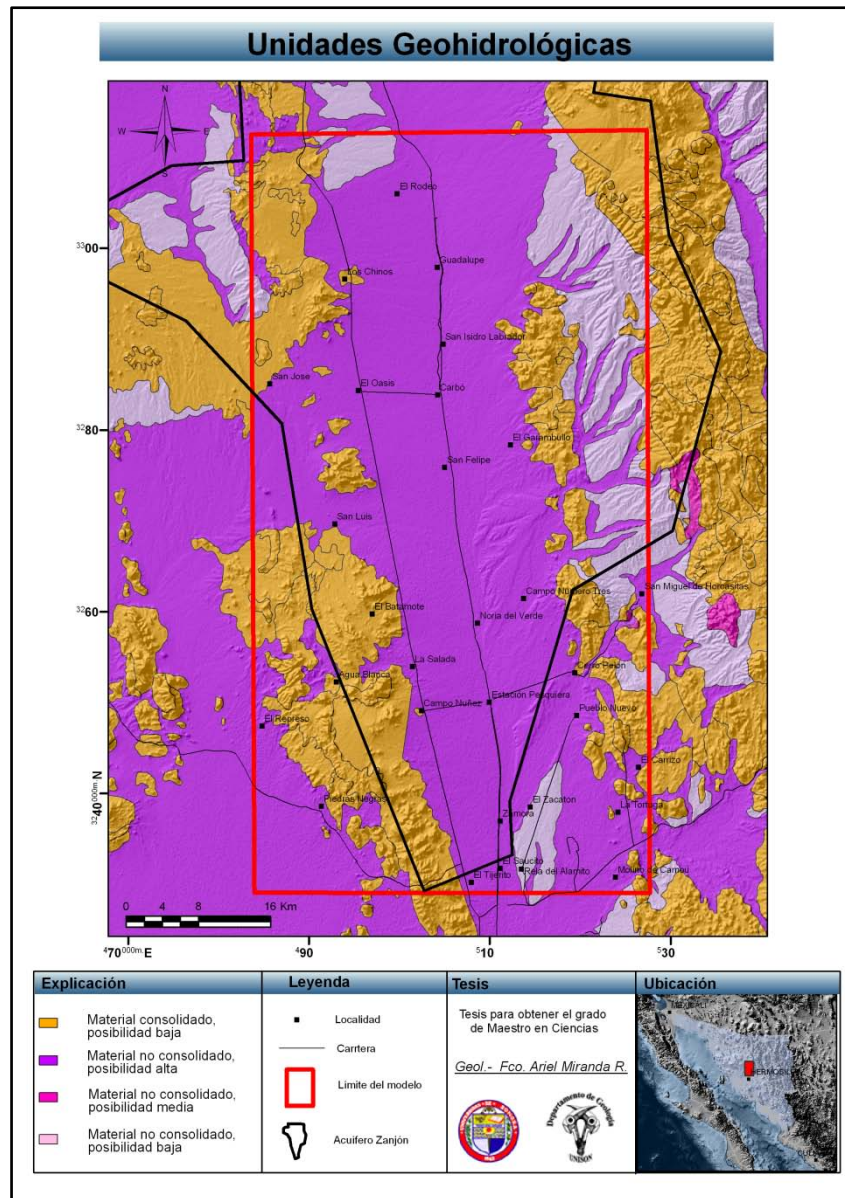


Figura 5.10.- Mapa de unidades geohidrológicas en el área de estudio.

5.6 Geología del Subsuelo

Se reinterpretaron 16 sondeos eléctricos verticales (SEV's) llevados a cabo en el área de estudio por Guysa en el año 2000, organizados en tres secciones. La primera sección se localiza al sur de Carbó donde se llevaron a cabo 8 sondeos eléctricos, la segunda sección se realizó en Pesqueira con 4 sondeos y por último la sección Zamora con 4 sondeos (Figura 5.11).

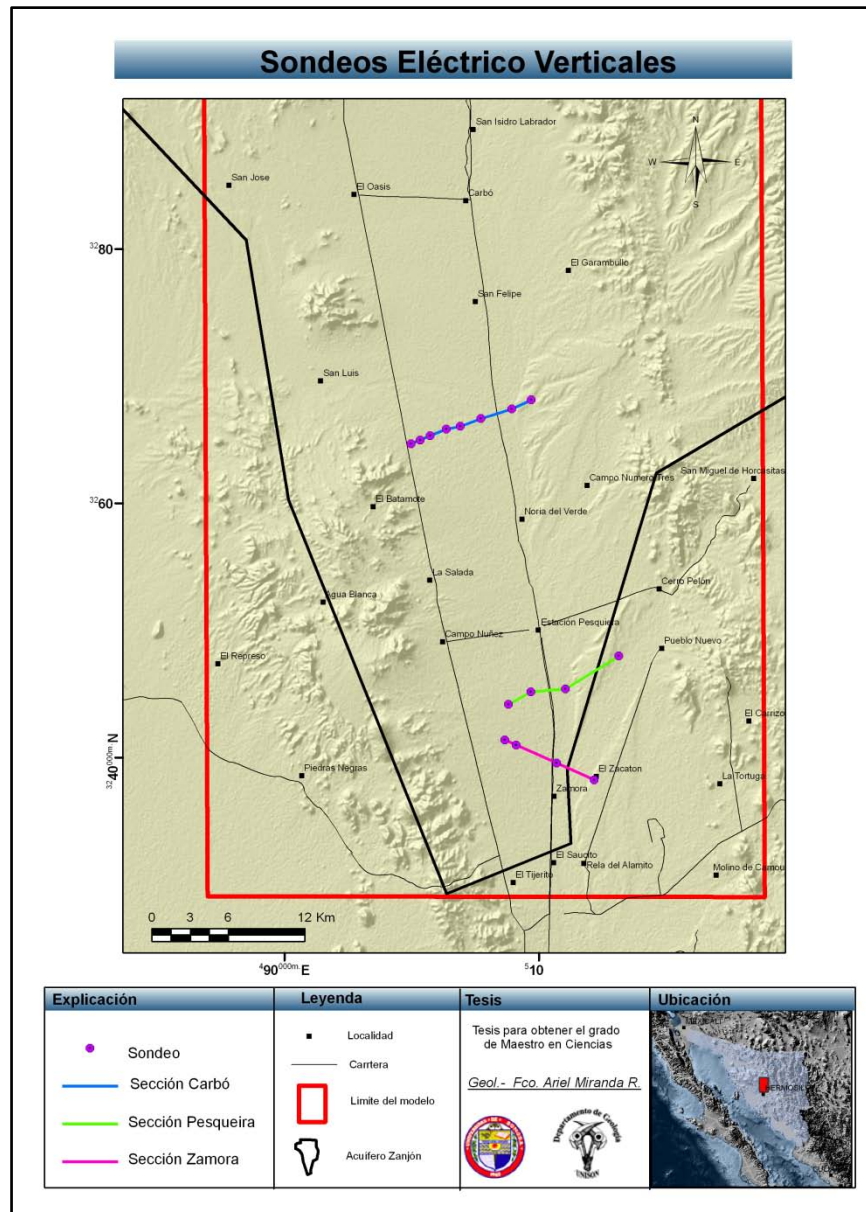


Figura 5.11.- Localización de secciones geoelectricas en el Acuífero Rio Zanjón.



Se reconocen al menos 5 unidades en las secciones analizadas las cuales están delimitadas por sus rangos en resistividad y tomando en cuenta el marco geológico de la zona en estudio.

- *Unidad 1:* Esta unidad se interpreta como la parte superficial del subsuelo la cual se encuentra seca y/o compacta, sus espesores varían de 5.5m a 63m.
- *Unidad 2:* Comprendida por paquetes de arena de media a gruesa con espesores que varían de 71 m a 360 m. Al sur de San Pedro se encuentra esta unidad intercalada con arena gruesa y grava con espesores de 33 m a 94m.
- *Unidad 3:* Dicha unidad se caracteriza por presentar variación en la granulometría que va de arcilla a arena arcillosa y a arena fina a media. Las arcillas se presentan con espesores variables pero puede llegar a tener hasta 170m de espesor en algunas partes del área de estudio. La arena arcillosa se encuentra en la mayor parte de las secciones con espesores que varían de 220m a 500m en algunas zonas. La arena fina-media tiene espesores de 157m a 464 m. Estos espesores de arena fina a media se observan más hacia la parte sur de Pesqueira en la zona de San Pedro.
- *Unidad 4:* Esta unidad se constituye por materiales de sedimentos semiconsolidados que se pueden relacionar con formaciones sedimentarias tipo Baucarit conforme a la geología regional, sin embargo, puede tratarse de una zona fracturada del basamento local. También puede tener ambigüedad de interpretación con la unidad anterior por lo que se tiene que considerar su posición en la columna, la localización de la sección y el marco geológico local para dar su asignación.
- *Unidad 5:* Esta unidad corresponde geológicamente con el basamento ígneo o metasedimentario de la región encontrándose a diferentes profundidades de 77m a 530m.

Sección Sur de Carbó

Esta sección se localiza a 17 km al sur del poblado de Carbó, tiene una orientación preferencial NE-SW y una longitud de 10 km formada por 4 unidades hidrogeológicas:

- *Unidad 1:* Constituida por suelo seco compacto, con espesores de 16m a 32m.
- *Unidad 2:* Compuesta por arena fina arcillosa con espesores variables que van de los 82m a los 562m. esta unidad se observa con un espesor de arcilla de 160m.
- *Unidad 3:* Compuesta por un paquete de arena media-gruesa con un espesor de 182m a 139m.
- *Unidad 4:* Constituida por el basamento ígneo intrusivo alterado y fracturado que se encuentra en esta sección de los 503m a los 562m de profundidad (Figura 5.12).

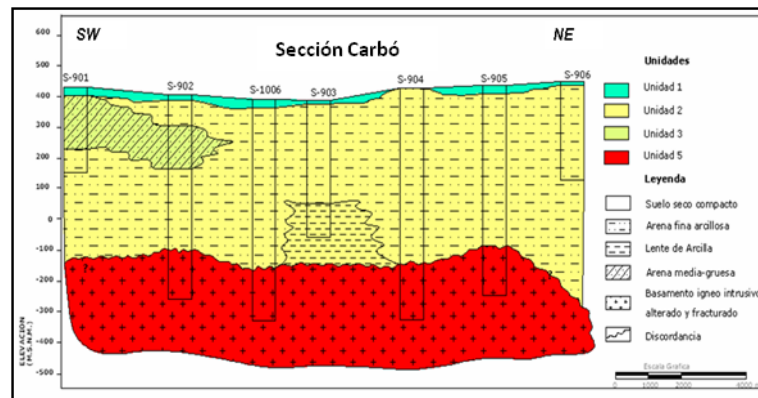


Figura 5.12.- Sección Sur de Carbó. Orientada SW-NE.

Sección Pesqueira

Esta sección se localiza 5km al sur del poblado de Pesqueira, tiene una orientación preferencial SW60°NE con una longitud de 9.30km y está formada por 5 unidades hidrogeológicas (Figura 5.12):

- *Unidad 1:* Constituida por suelo seco compacto, con espesores de 9m a 63m.
- *Unidad 2:* Compuesta por arena fina arcillosa con espesores variables que van de los 18m a los 350m; en esta unidad se observa un paquete de arcilla de 127m de espesor.
- *Unidad 3:* Compuesta por un paquete de arena media a gruesa con un espesor de 63 m.
- *Unidad 4:* Compuesta por arena gruesa a grava (semiconsolidada de tipo conglomerático) con espesores de 109 a 145 m.
- *Unidad 5:* Constituida por el basamento ígneo intrusivo alterado y fracturado.

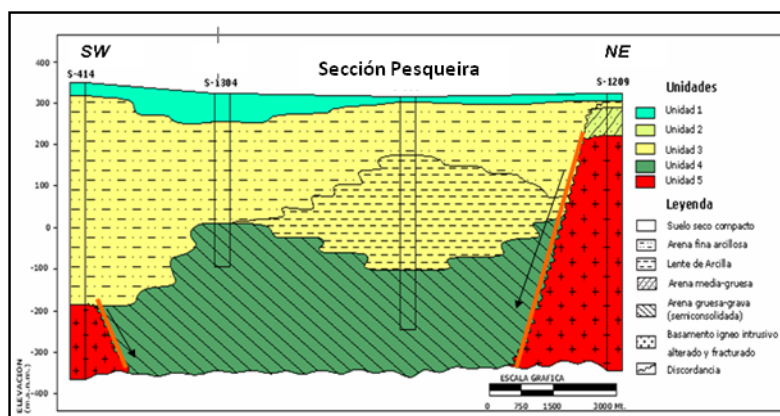


Figura 5.13.- Sección Pesqueira. Orientada SW-NE.

Sección Zamora

Esta sección se localiza en las inmediaciones del poblado Zamora, tiene una orientación preferencial NW-SE con una longitud de 7.7 km, está formada por 5 unidades hidrogeológicas (Figura 5.14):

- *Unidad 1:* Constituida por suelo seco compacto, con espesores de 23m a 54m.
- *Unidad 2:* Compuesta por arena fina arcillosa con espesores variables que van de los 57m a los 273 m; en esta unidad se observa un gran espesor de 110m de arcilla.
- *Unidad 3:* Compuesta por un paquete de arena media-gruesa con un gran espesor de 700 m.
- *Unidad 4:* Compuesta por arena gruesa a grava (semiconsolidada de tipo conglomeratico) con espesores de 81 a 173m.
- *Unidad 5:* Constituida por el basamento igneo intrusivo alterado y fracturado que se encuentra en esta sección en el SEV, S-413 a una profundidad de 176m.

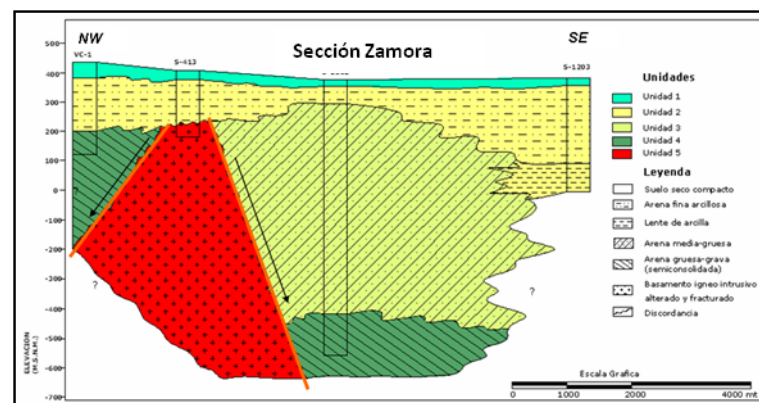


Figura 5.14.- Sección Zamora. Orientada NW-SE.

5.6.1 Gravimetría

A partir de estudios previos se reinterpretaron cuatro perfiles de gravimetría con un total de 121 sondeos gravimétricos. Los perfiles se localizan en diferentes puntos dentro del área de estudio donde en su mayoría están orientados E-W con la excepción del perfil San Pedro – Pesqueira con orientación casi perpendicular al río Zanjón como se aprecia en la Figura 5.15.

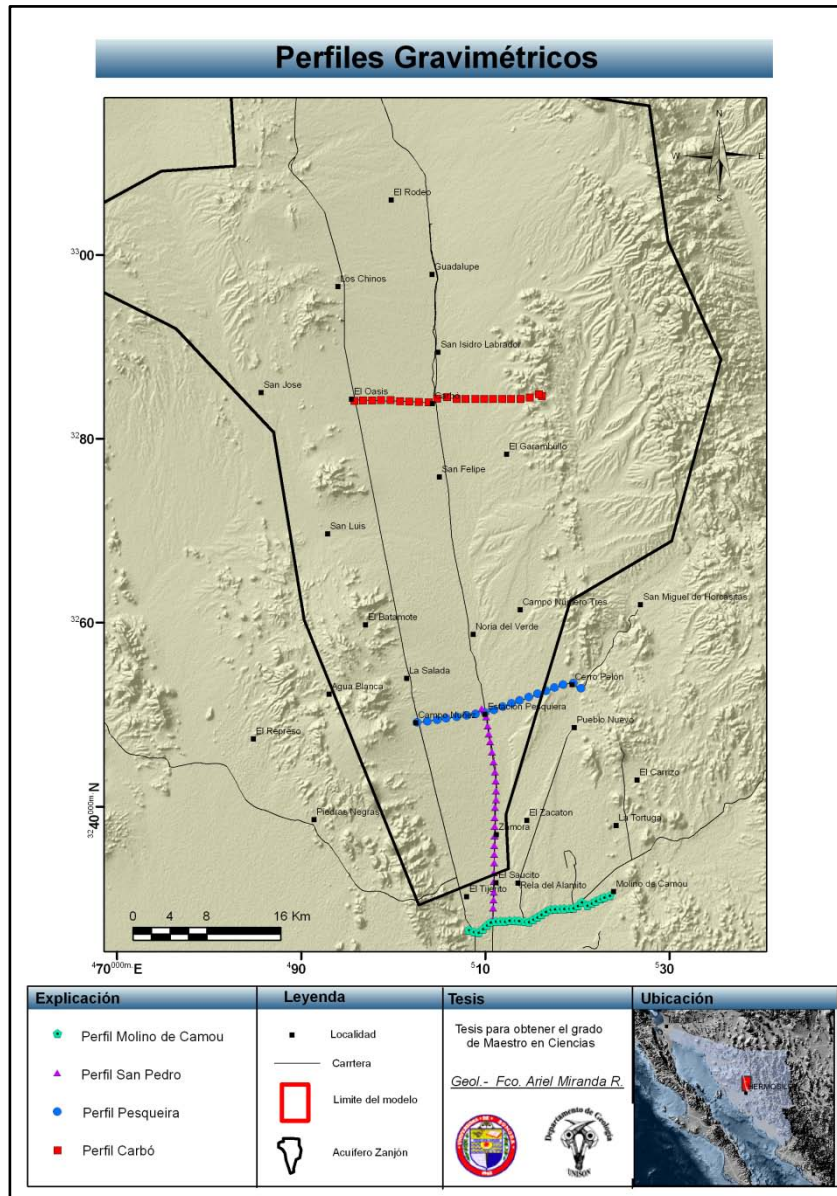


Figura 5.15.- Ubicación de las secciones gravimétricas en el área de estudio.

Es primordial el análisis de la geología del subsuelo, para definir la geometría, estructuras y profundidad del basamento dentro del área de estudio, que permita definir las condiciones de frontera, así como las características físicas de los materiales y las diferentes profundidades de las fosas que conforman el sistema en el área de estudio.

Perfil Gravimétrico Carbó

Comienza en el pueblo El Oasis pasando por el poblado de Carbó con un total de 22 sondeos y un rumbo general de E - W con una distancia de 20 km aprox. En la reinterpretación gravimétrica se advierte una fosa con una profundidad máxima aproximada de 820 m. (Figura. 5.16), donde las arenas finas arcillosas son el principal relleno de esta fosa y algunos lentes de arenas gruesas.

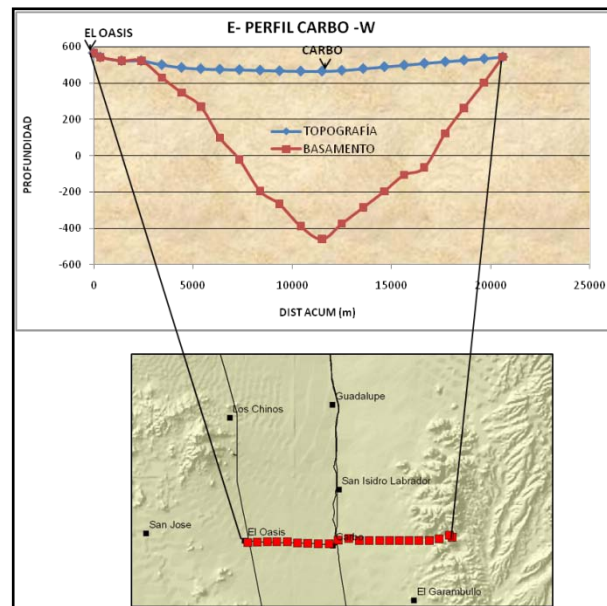


Figura 5.16.- Perfil gravimétrico de Carbó

Perfil Gravimétrico Pesqueira

Se ubica rumbo al poblado Campo Nuñez cruzando por el poblado de Estación Pesqueira y finalizando en el poblado del Cerro Pelón recorriendo una distancia de 18.56 km y un total de 19 sondeos y dirección preferencial de W – E. La Figura 5.16 muestra como resultado una fosa con una profundidad de 700 m. aproximadamente según los resultados de los sondeos eléctricos verticales, los principales materiales de depósito para esta fosa serian arenas finas arcillosas, lentes de arcillas y arenas gruesas en las profundidades mayores.

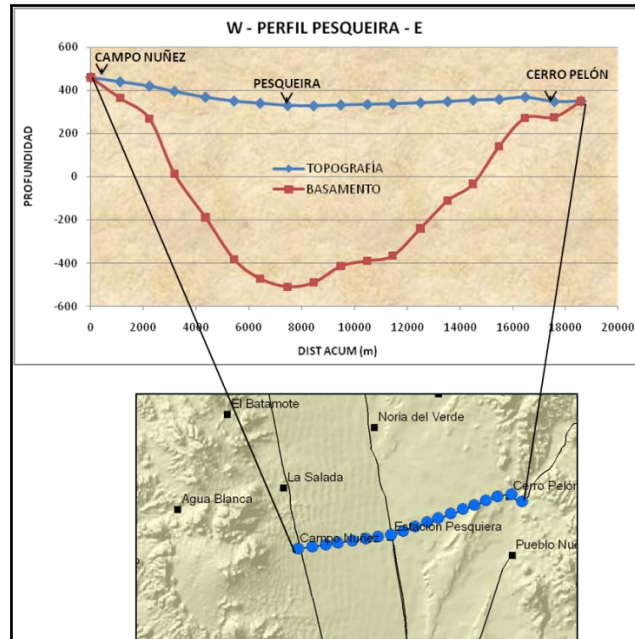


Figura 5.17.- Perfil gravimétrico Pesqueira.

Perfil Gravimétrico San Pedro- Pesqueira

Se localiza desde el poblado de San Pedro cruzando por el poblado de Zamora termina en el poblado de Pesqueira con una dirección preferencial de Sur – Norte. La sección cuenta 48 sondeos gravimétricos y abarcando un total de 23 Km. de longitud en línea recta. Se observa una fosa donde alcanza su máxima profundidad a la altura del poblado del Saucito con 680m (Figura 5.18).

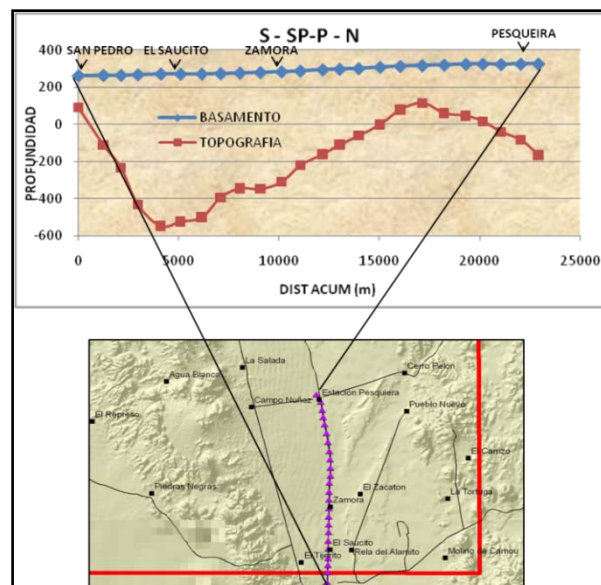


Figura 5.18.- Perfil gravimétrico San Pedro – Pesqueira.

Perfil Gravimétrico Tec de Monterrey –Molino de Camou

Este perfil se localiza al sur del área de estudio con un total de 32 sondeos y una distancia de 16 Km. aprox. con una dirección de W – E, partiendo desde el Tecnológico de Monterrey terminando en el poblado Molino de Camou. Se puede apreciar una fosa aproximadamente de 950 m de profundidad, representando la zona más profunda de los perfiles anteriores ya mencionados. (Figura 5.19)

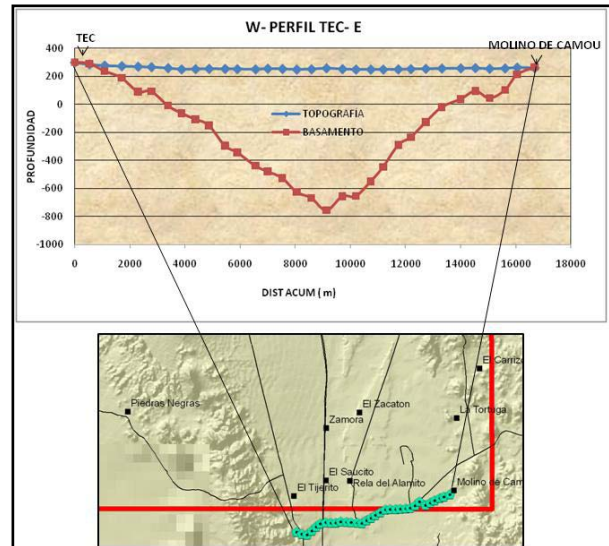


Figura 5.19.- Perfil gravimétrico Tec. de Monterrey-Molino de Camou.

5.6.2 Geometría del Basamento

El sistema de aguas subterráneas del área de estudio, se desarrolla en una estructura tectónica integrada por una fosa simétrica (host) rodeada de dos pilares tectónicos (grabens), el primero de ellos se ubica en la porción occidental y corresponde a una estructura batolítica de composición granodiorítica considerada como el basamento hidrogeológico del área. El segundo pilar se localiza en la porción oriental y representa un complejo volcánico extrusivo compuesto por rocas de composición ácida y básica principalmente (ignimbritas, basaltos y tobas) (Figura 5.20).

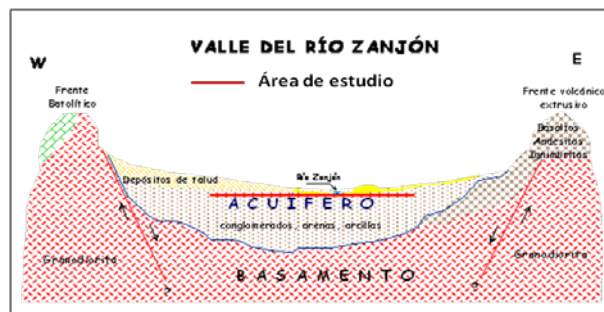


Figura 5.20.- Esquema tectónico que conforma la fosa del área de estudio.

A partir de los datos obtenidos de los perfiles gravimétricos, se realizó una interpolación de valores con los datos de profundidad del basamento, es decir para la obtención de la geometría del acuífero para el área de estudio se obtuvo el siguiente resultado: cuatro fosas principales con profundidades que van desde los 600 a las 900m como se aprecia en la Figura 5.21 Fosa Carbó, Fosa Pesqueira, Fosa Zamora y Fosa San Pedro, se puede observar una barrera natural entre las fosas Pesqueira y Zamora.

Estas fosas localizadas en el área de estudio de la cual se puede establecer que se trata de una depresión que contiene material sedimentario continental heterogéneo (conglomerados, gravas, arenas y arcillas) de consolidación variable. El espesor de este material también varía según el sitio que se trate, siendo menor en ambas márgenes del valle y alcanzando su máximo espesor al centro de las fosas en los poblados de Carbó, Pesqueira y Zamora.

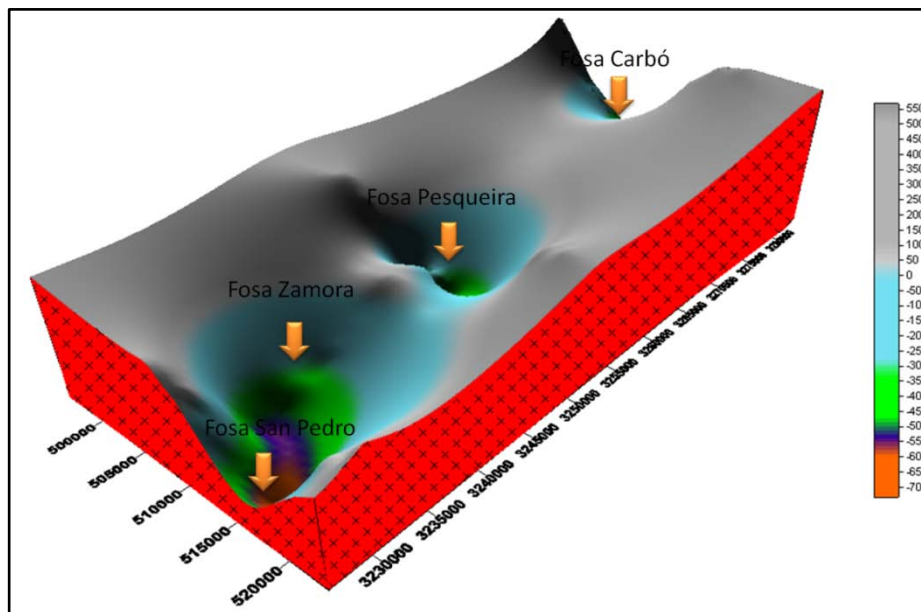


Figura 5.21.- Fosas en el área de estudio.

6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

6.1 Modelo Geológico

A partir de la reinterpretación geofísica y geología del área se obtuvo el modelo geológico, donde se observan cuatro unidades litológicas principales. La primera unidad litológica conformada por el suelo (aluvión), debajo de ésta tenemos la unidad de arenas finas arcillosas y por último la unidad más importante en el área de estudio es la que se conforma por arena media a gruesa, que presenta espesores de hasta 700m aproximadamente.

Se puede apreciar que entre la unidad de arena fina y arena media a gruesas se encuentran algunos lentes de material arcilloso que funcionan como barreras impermeables. En la capa de arenas medias a gruesas se presenta la mayor parte de los aprovechamientos subterráneos. Por debajo de estas unidades se encuentra otra unidad de arena gruesa a grava (semiconsolidado, Fm. Baucarit) la cual se considera una unidad de poca permeabilidad y por último tenemos el basamento intrusivo granítico (Figura 6.1).

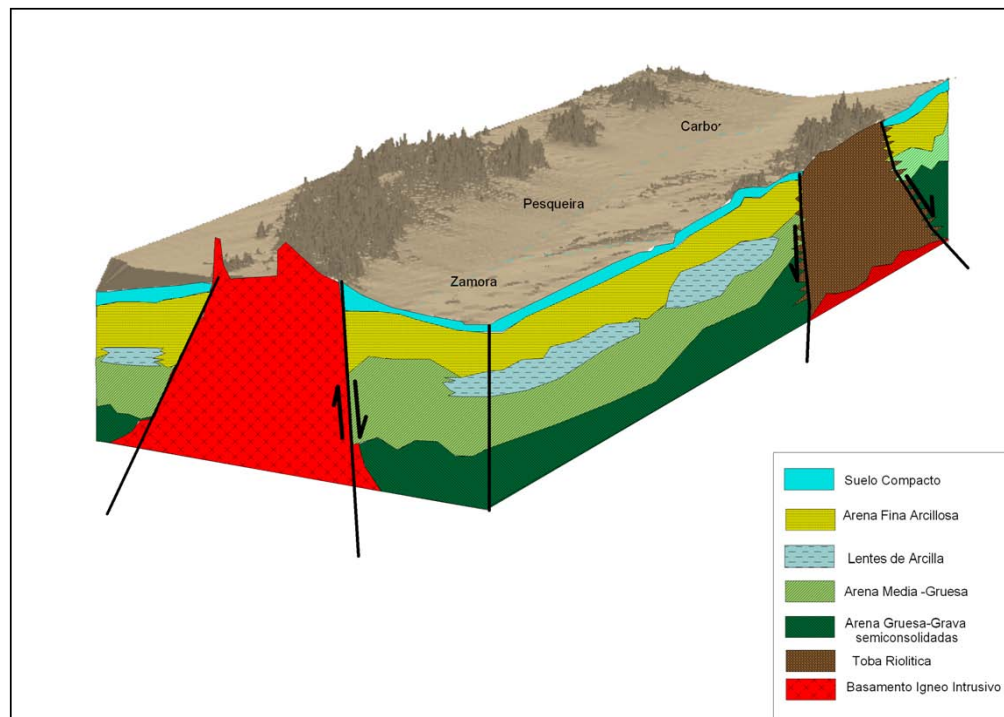


Figura 6.1.- Modelo geológico del área de estudio.

6.2 Modelo Hidrogeológico

De acuerdo con la información geológica y parámetros hidráulicos del acuífero se realizó un modelo de unidades geohidrológicas, donde obtenemos 5 unidades geohidrológicas en el área de estudio.

- La primera unidad hidrogeológica se conforma por arenas finas arcillosas en la parte superior del acuífero.
- La unidad dos que consiste de arenas media a gruesa, en esta se encuentra el mayor número de aprovechamientos, lo cual indica que es la principal unidad hidrogeológica portadora de agua subterránea para el acuífero.
- La tercera unidad se considera la formación Baucarit que se conforma por conglomerado polimíctico semiconsolidado.
- Por último tenemos las rocas ígneas que se conforman por toba riolítica y el basamento ígneo intrusivo. (Figura 6.2).

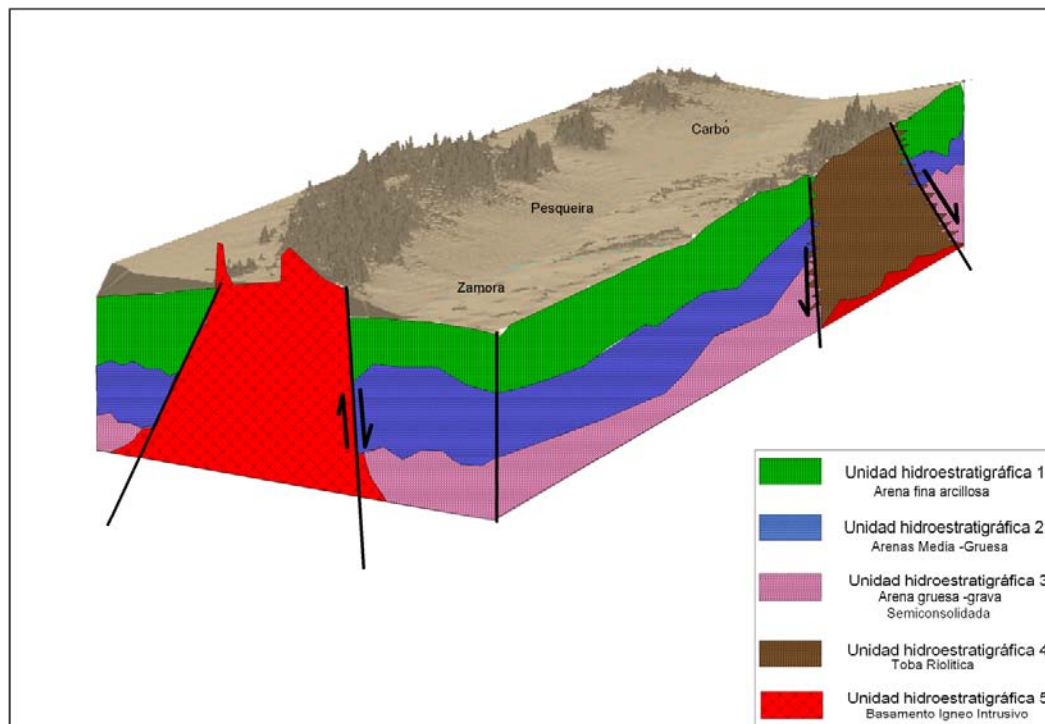


Figura 6.2.- Unidades hidrogeológicas del acuífero Zanjón.

7.-CENSO DE APROVECHAMIENTOS

La empresa IDEAS realizó un estudio de actualización piezométrica dentro del acuífero Zanjón en el año 2007 comprendiendo también el área de interés. En tal estudio se llevó a cabo un censo de aprovechamiento exhaustivo donde se censaron 633 aprovechamientos, de los cuales 519 se encuentran estrictamente dentro del límite del área de estudio, no está demás mencionar que el censo se llevó a cabo en diciembre 2007 y enero del 2008.

Se calcula que existen al menos 35 aprovechamientos más que se encuentran principalmente en pequeños ranchos ubicados en las partes altas del acuífero, en lugares donde no se tuvo acceso ni se tienen datos de censos anteriores. De los 519 aprovechamientos censados que se ubican dentro del área de estudio, de acuerdo a las características constructivas, se tienen 165 norias de diferentes profundidades así como 354 pozos perforados (Figura 7.1)

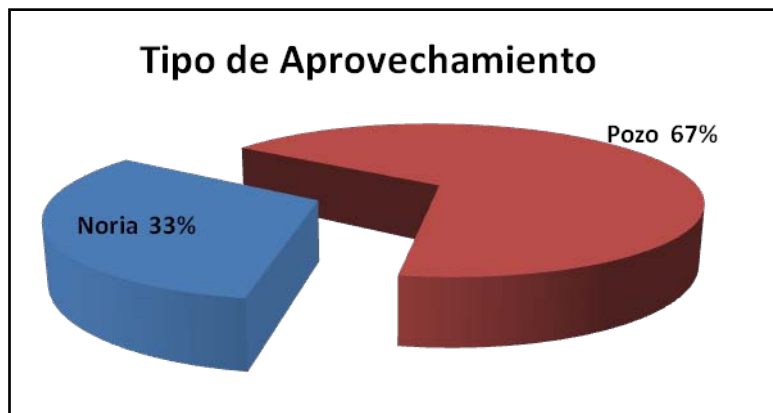


Figura 7.1.- Tipos de aprovechamientos subterráneos.

Los aprovechamientos censados en el área de estudio se encuentran a lo largo del margen del río Zanjón, ampliándose el número de concentración de pozos en la zona sur a la altura del poblado Nuñez y el poblado de Zamora. La distribución de aprovechamientos censados en el área de estudio se puede observar en el Figura 7.2, donde los puntos de color rojo representan los pozos perforados, mientras que los de color verde significan las norias.

El número de concentración de aprovechamientos en la porción sur, se puede deber a que la capa de arenas arcillosas se adelgaza, mientras que la capa de arenas-gruesas se engrosa hasta unos 700 m de espesor de acuerdo a la sección Zamora en el apartado de sódneos eléctricos.

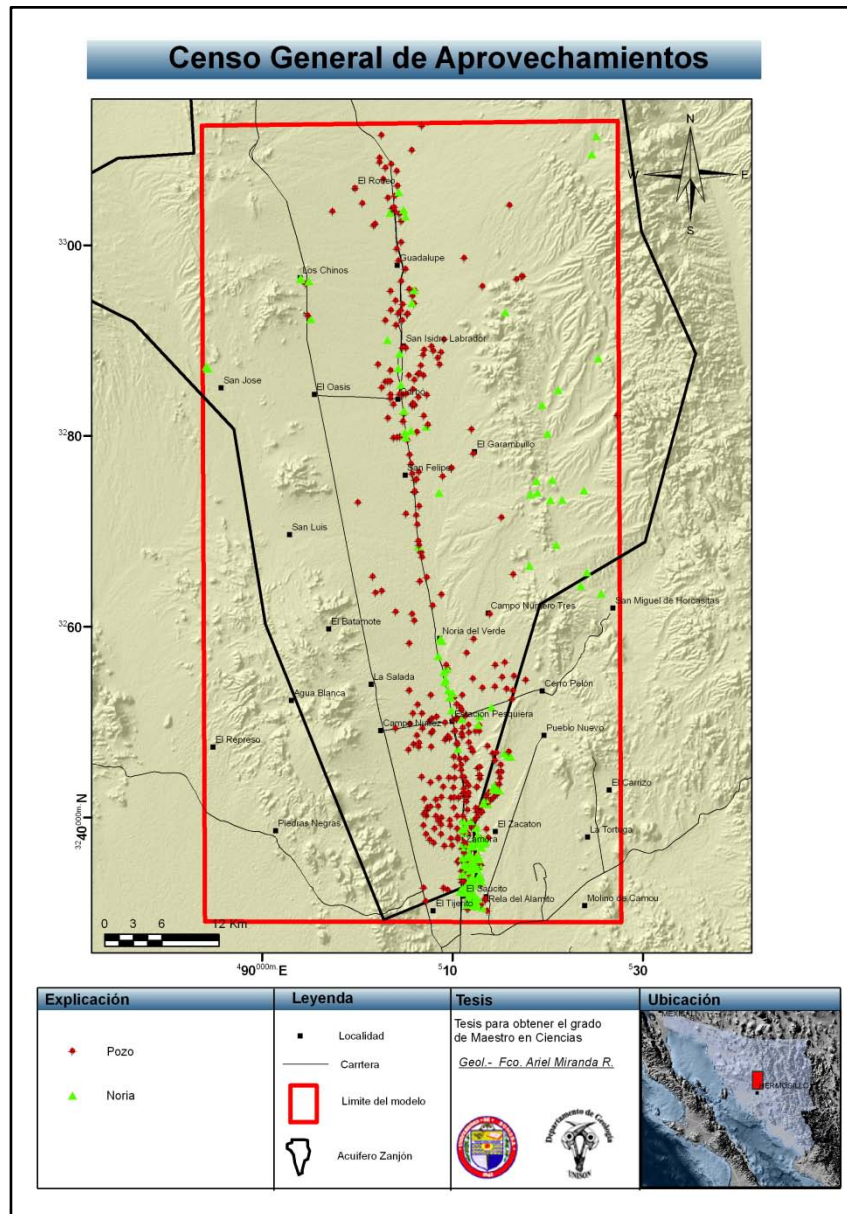


Figura 7.2- Censo general de aprovechamientos.

Es importante señalar que no se encontraron manantiales ni presas que pudieran afectar a la recarga o recargas remotas en el modelo. Por otra parte en la zona del poblado de Zamora de los 519 aprovechamientos censados mencionados anteriormente, 335 se localizan en esa área, es decir más del 60%, donde 119 son noria y 216 pozos perforados.

7.7.1 Usos de Agua

El agua que se extrae de los aprovechamientos subterráneos se tiene destinada en su mayoría para uso agrícola, pues el 37% de ellos tiene este uso con un total de 192. Los aprovechamientos inactivos es el segundo que predomina, con 166 (32% del total), seguido por el uso pecuario que cuenta con 118 (23%). El uso doméstico registra un total de 26 aprovechamientos con un 5% del total, posteriormente tenemos el uso público-urbano con un 10% y otros servicios como se muestra en la Figura 7.3

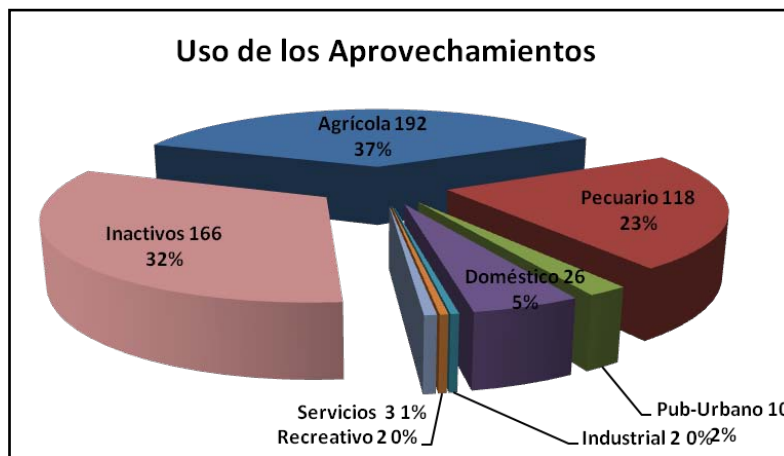


Figura 7.3.- Usos de los aprovechamientos subterráneos.

7.2 Piezometría del área de estudio

7.2.1 Profundidad al Nivel Estático, año 2007

Se tiene información de 234 aprovechamientos en donde midieron sus niveles piezométricos (IDEAS, 2007). Los niveles más someros se presentan en la parte norte del área de estudio con valores de 30 a 60 m de profundidad, mientras que los valores más profundos se ubican en la parte sur a la altura del poblado estación Pesqueira y Zamora con 90 hasta los 120 m de profundidad, como se muestra en la Figura 7.4

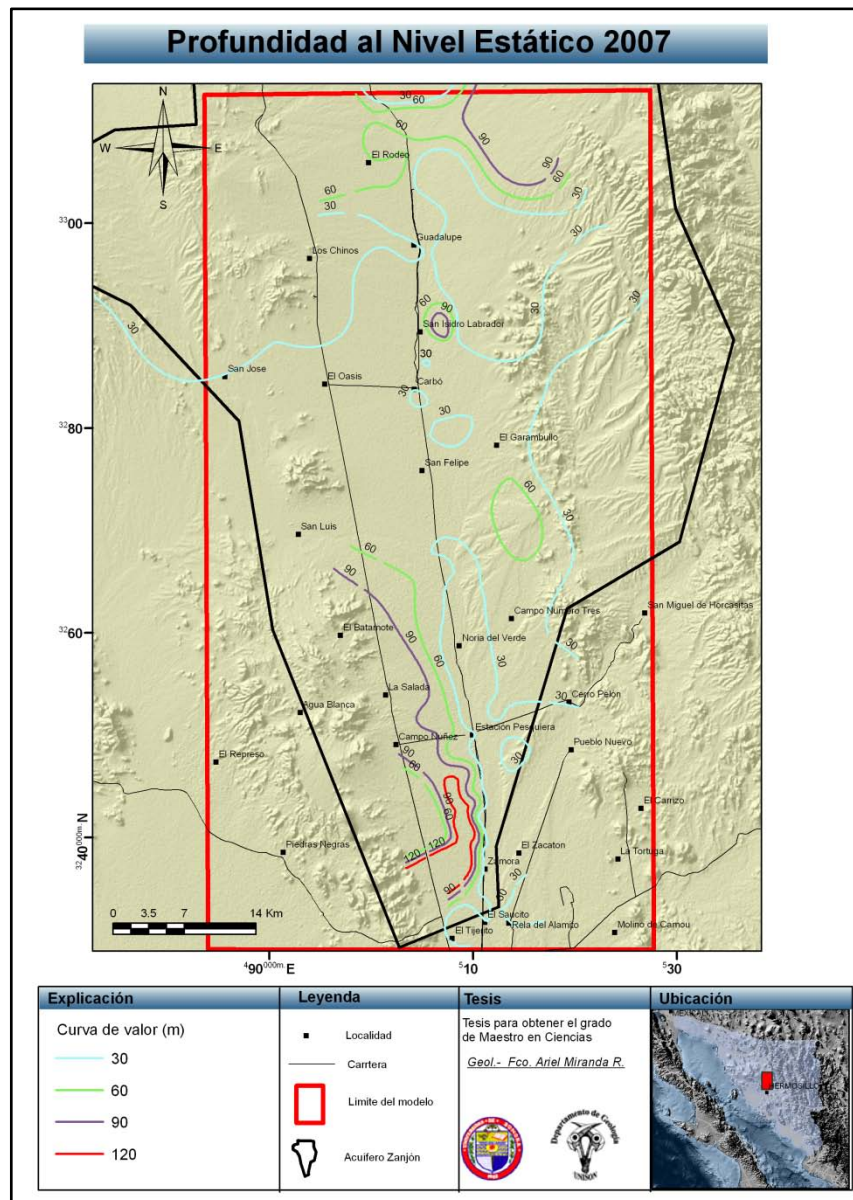


Figura 7.4.- Profundidad al Nivel Estático, año 2007.



7.2.2 Elevación del Nivel Estático, 2007

En este acuífero, la elevación del nivel estático en el año 2007 varió entre 200 y 750 msnm. Las elevaciones mayores se presentaron al norte del área de estudio con valores que van de 450 a 600 a la altura de los poblados Carbó y el Rodeo. Por otra parte los valores más bajos se registraron al sur del área estudio a la altura de Pesqueira y el poblado Zamora con 350 a 200 m.s.n.m., (Figura 7.5).

En términos generales la elevación tiende a ser mayor en las laderas principalmente en la porción norte, de manera que agua subterránea fluye hacia el cauce principal del río Zanjón de norte a sur.

Sin embargo en la porción sur del área de interés se puede ver claramente una zona de abatimiento a la altura del poblado de Zamora, esto se debe a que se tienen varios aprovechamientos con niveles profundos con fuertes extracciones para uso agrícola, por lo que a este último hecho se le atribuye la presencia de esta anomalía que actualmente invierte la dirección natural del flujo, esto significa que no se cuenta con salida hacia el sur de agua subterránea en el área de estudio.

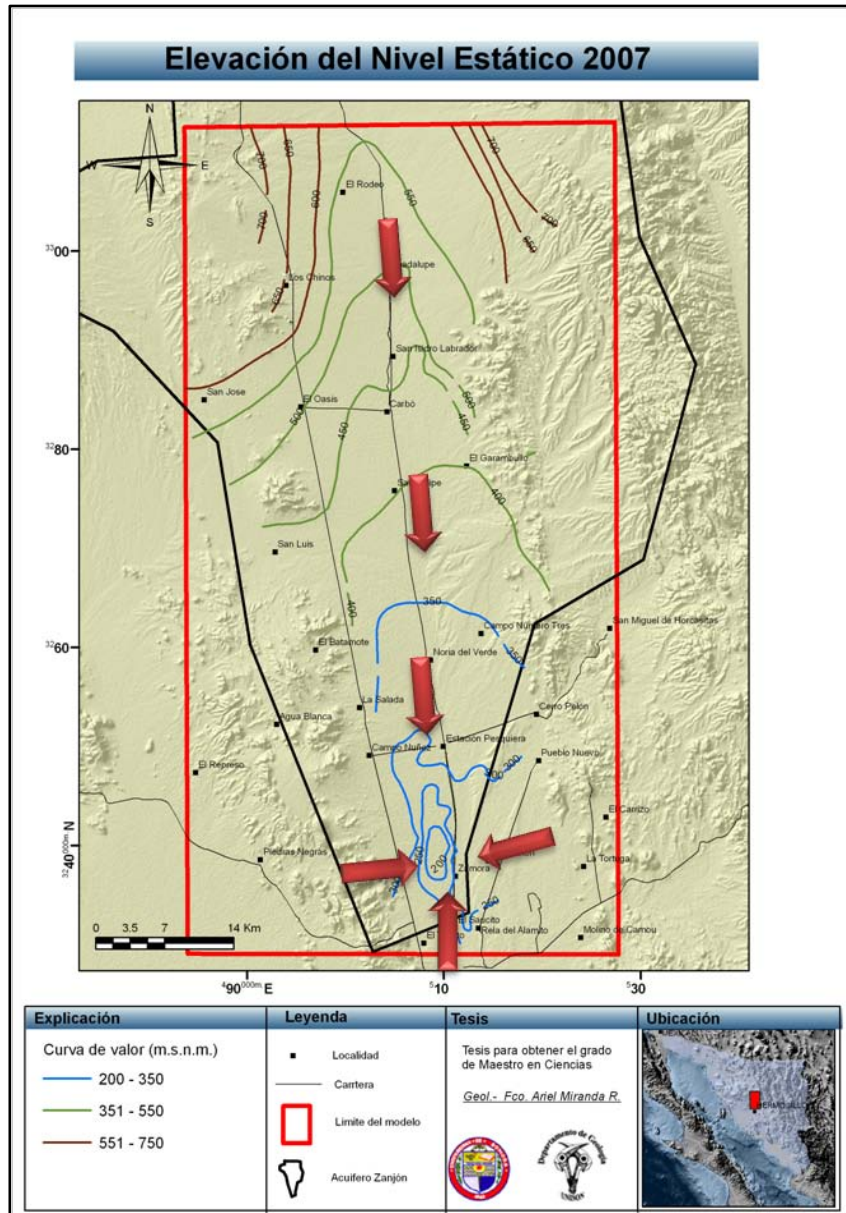


Figura 7.5.- Elevación del Nivel Estático y Dirección de Flujo Subterráneo, año 2007.

7.2.3 Evolución del Nivel Estático, 2006-2007

Para este período de evolución, se correlacionaron datos de 55 aprovechamientos que se pudieron medir en ambos años. A partir de ellos se generaron las curvas de isovalores donde el promedio aritmético de los datos de evolución considerados resultó de -0.25 m, y la mediana es de -0.75 m, por lo que predomina el abatimiento.

Se debe considerar que en el 2006 las mediciones se realizaron en el mes de octubre y en el 2007 en el mes de diciembre, pues la diferencia de dos meses podría influir negativamente en la evolución.

Los valores más fuertes de evolución negativa se localizan al sur del área de estudio a la altura del poblado de Zamora, donde tenemos valores de -1 hasta -6m, mientras que en el poblado de Pesqueira se registran valores de -1 a -3m. Sin embargo al sur del poblado de Pesqueira a unos 6 km de distancia aproximadamente, tenemos evoluciones positivas de hasta 2m y hasta 1m y zonas estables con valor 0.

Por otra parte en el poblado de Carbó se muestran valores de -1m registrando tendencias estables y con pocos problemas de abatimiento. En la figura 7.6, se muestra una gráfica sobre las evoluciones del área de estudio donde se puede observar claramente la tendencia negativa tanto en pozos perforados como en norias, decayendo a valores de hasta -5m y solo pocos aprovechamientos presentan valores de recuperación, éstos se localizan al norte del área de estudio donde tenemos la entrada del flujo del río Zanjón.

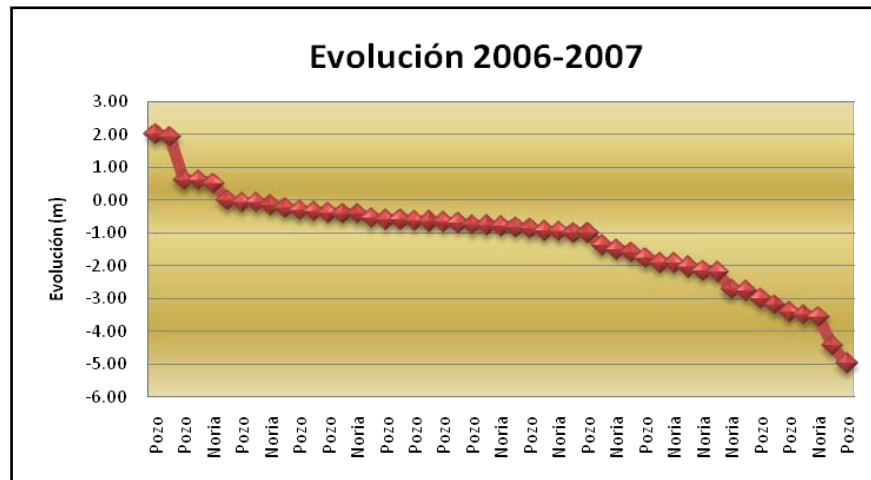


Figura 7.6.- Indica valores de tendencia de evolución.

Las curvas de valores de la evolución piezométrica para el año 2006-2007, a partir de los datos de interpolación, donde en la misma figura se muestra una ampliación de la zona de mayor concentración de curvas y las zonas con mayor abatimiento (Figura 7.7).

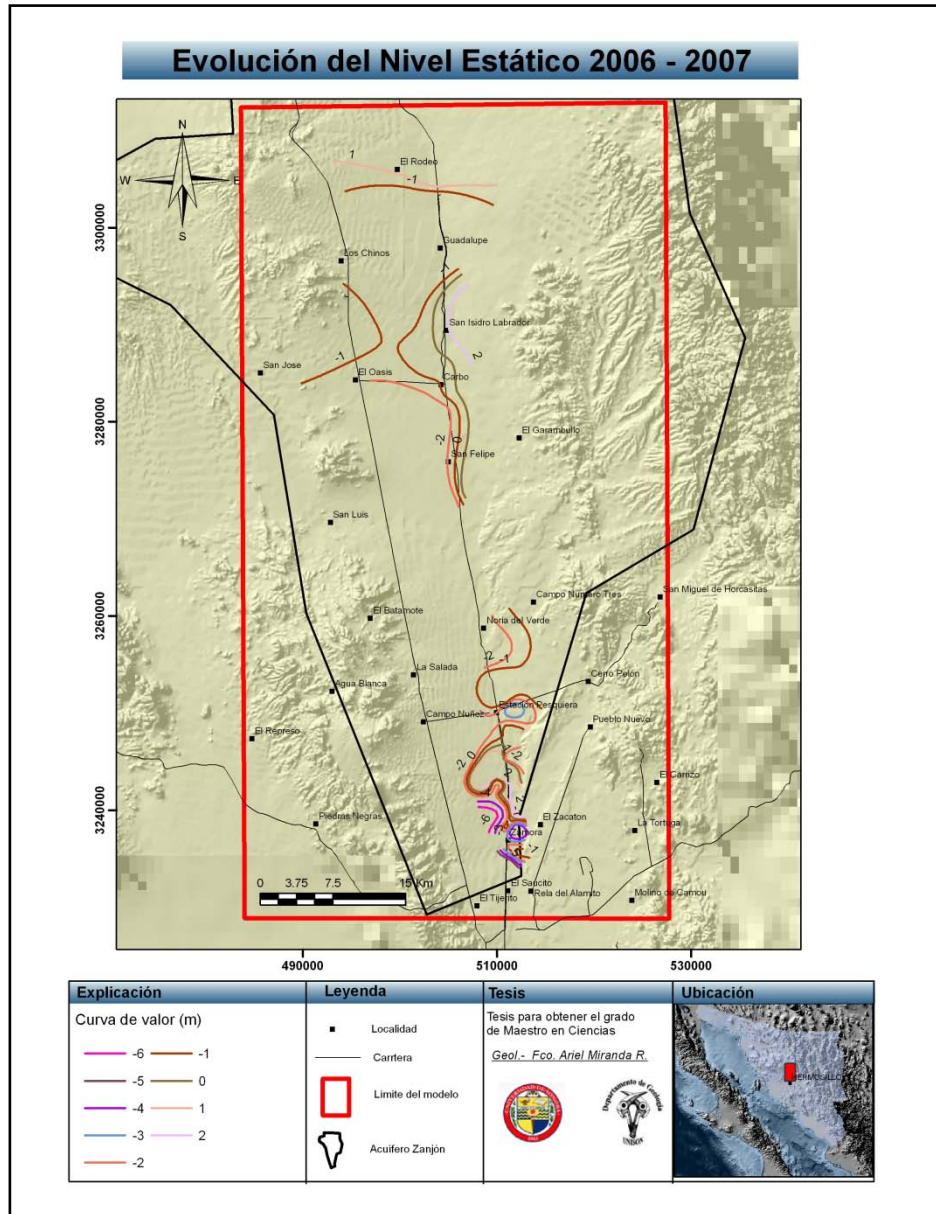


Figura 7.7.- Evolución del Nivel Estático 2006 – 2007.



8.- BALANCE INTEGRAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Un balance de aguas subterráneas consiste en registrar las entradas, salidas y cambio en el volumen de almacenamiento, que acontecen en un volumen específico del sistema acuifero en un determinado lapso de tiempo; por tanto, debemos de conocer las componentes que intervienen en el área de balance, como pueden ser la evapotranspiración, bombeo, caudal base, flujo subterráneo que entra o sale lateralmente, etc. Para lograr este fin, se realizó el balance para la zona de valle dentro del área de estudio.

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

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

Aplicando esta ecuación, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica.

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento en la unidad hidrogeológica}$$

De esta forma la ecuación de balance queda de la siguiente manera:

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S)$$

Donde:

- R_v= Recarga vertical por lluvia
- E_h= Recarga por flujo subterráneo
- R_i= Recarga inducida
- B= Bombeo
- S_h= Salidas por flujo horizontal
- ETR= Evapotranspiración real
- AV(S)= Cambio de volumen almacenado

8.1 Parámetros Hidráulicos

El agua subterránea se desplaza a través de una serie de sedimentos y rocas de origen diverso que conforman estructuras tectónicas de tipo horst y graben, estos últimos rellenos por materiales sedimentarios de origen continental, los cuales se agrupan en dos medios físicos diferenciables. Estos medios son: i) granular y ii) fracturado.



Las rocas que conforman a los horst y graben, agrupan alternadamente y en superposición a los medios fracturados (andesitas, ignimbritas y tobas) y granular (depósitos sedimentarios continentales) con conductividades hidráulicas obtenidas a partir de la interpretación de pruebas de bombeo mediante métodos diversos.

- Para las andesitas, ignimbritas y tobas se desconoce su conductividad hidráulica debido a que no existe información para su estimación y valoración.
- El medio granular se consideró anisotrópico, debido a la estratificación horizontal de sedimentos; por tanto, los valores de conductividad hidráulica vertical se podrían estimar en un orden de magnitud menor a la K_h , como lo asignan en la literatura mundial.

Transmisividad

Los valores de transmisividad para este sistema acuífero varían de 2×10^{-4} a 2×10^{-2} m²/s. La principal aportación de agua subterránea proviene de la tercera capa que se conforman por gravas y arenas.

Recarga Natural Inducida o Retorno de Riego

Del número total de aprovechamientos, 192 son de uso agrícola con un volumen de extracción general de 13.03 Hm³/año, de esto se asumió un 15% del gasto total es decir 1.95 Hm³/año para el retorno de riego o recarga inducida bajo referencia de Fetter, 1994.

Bombeo (Hm³/año)

En base al estudio (*Consolidación del Comité Técnico Administrativo (COTAS) del río Zanjón*) elaborado por la empresa IDEAS (año 2007) se calculó una extracción total de 85 Hm³ anuales en los aprovechamientos activos actualmente, y siendo 89 Hm³ anuales el volumen concesionado inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), con una diferencia de 4Hm³/año de lo calculado con lo concesionado. Cabe mencionar que el balance se llevó a cabo limitándose al área del acuífero administrativo del Río Zanjón que se encuentra dentro del área de estudio.

Entradas y Salidas Horizontales (Hm³/año)

Se calculó mediante el método de celdas de flujo, basado en la ecuación de Darcy, donde se tomaron como base las curvas de igual elevación al nivel estático y se obtuvieron los diferenciales de carga y de distancia entre las curvas (gradiente dh/dl).

Con base en esto, se ubicaron las celdas en los extremos del acuífero donde es visible según las curvas que existe un flujo subterráneo de entrada o salida (Figura 8.1). La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera (Fetter, 1994):

$$Q = - K A (h_1 - h_2) / L$$

donde:

Q = Gasto, en m³/s

K = coeficiente de permeabilidad (m/s)

A = Área de la sección transversal por donde pasa el flujo, en m²

h₁, h₂ = Cargas hidráulicas (m)

L = Distancia entre curvas de igual valor (m), o en su caso distancia entre piezómetros

El signo negativo solo indica que la dirección del flujo es hacia donde el gradiente hidráulico disminuye.

Conductividad Hidráulica (K)

Se obtiene a partir de las pruebas de bombeo, éstas arrojan un valor de transmisividad, que viene a ser el producto de la permeabilidad por el espesor saturado:

$$T = K b$$

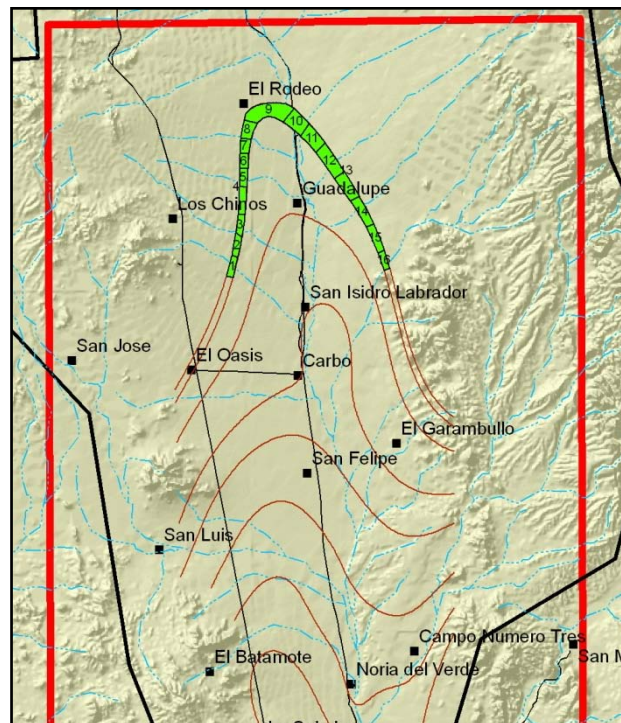


Figura 8.1- Celdas de entrada de flujo en la zona de estudio.



8.2 Cambio de almacenamiento ($Hm^3/año$)

Normalmente se consideran como entradas al acuífero: entradas por flujo horizontal de otros acuíferos (EH), e infiltración vertical directa de lluvia y corrientes superficiales (IV). Pero como es muy difícil evaluar las entradas al acuífero, se evalúan las salidas, que son: salidas por flujo subterráneo horizontal (SH), descarga de manantiales (M) (este incluye el flujo base mencionado anteriormente, siempre y cuando la descarga sea del acuífero que se está evaluando), extracciones mediante pozos de bombeo (B), y evapotranspiración (ETR). El cambio de almacenamiento (ΔV) será la suma de estos parámetros.

El *cambio de almacenamiento* en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se determina mediante la evolución de los niveles de agua en el intervalo de tiempo considerado y valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero.

Hay varias formas para obtener el cambio del almacenamiento, una manera es obtenerla a partir de pruebas de bombeo o de consideraciones relativas al tipo y litología de la zona de estudio, otro modo (el que se utilizó en este trabajo) es crear una superficie y calcular el volumen y multiplicarlo por un coeficiente de almacenamiento, esto se realiza para el inicio y fin del intervalo de tiempo considerado a partir de datos de evolución piezométrica, como se muestra la Tabla 8.1

Tabla 8.1. Cálculo del cambio de almacenamiento para el período 2006 – 2007.

Evolución (m)	Abatimiento (m)	Area (m^2)	S	$\Delta V(S)$ ($m^3/año$)
-5	-5	992623.28	0.08	-397049.312
-5 a -3	-4	4147939.51	0.08	-1327340.643
-3 a -1	-2	10175281.95	0.08	-1628045.112
-1	-1	28140760.00	0.08	-2251260.800
				-5,603,695.9

Las superficies que se utilizaron para calcular el cambio de almacenamiento anteriormente descrito, fueron sobre las zonas de abatimiento en la parte sur del área de estudio a la altura de los poblados Estación Pesqueira, Zamora y El Zacatón como se aprecia la Figura 8.2, éstas son las partes más afectadas por el sobrebombeo en el área de estudio.

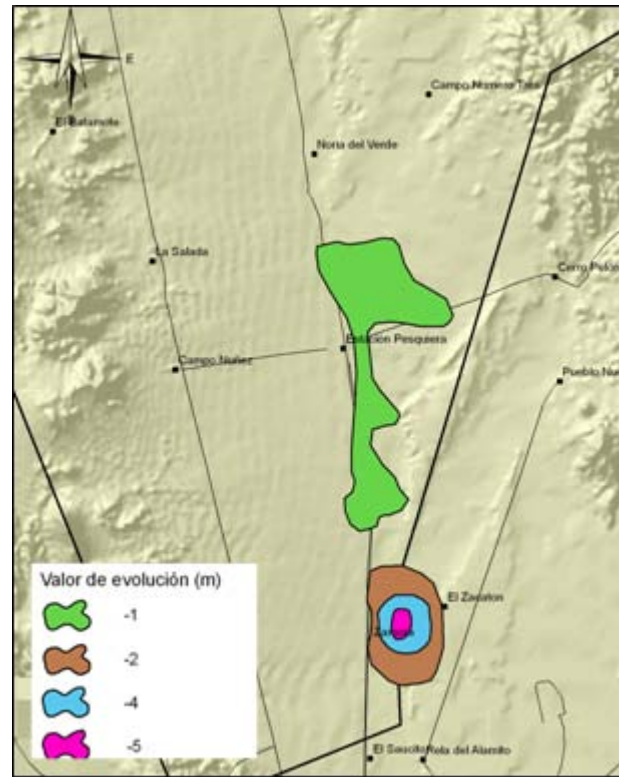


Figura 8.2- Poligonos para el cálculo del cambio del almacenamiento.

8.3 Recarga Vertical (R_v)

La recarga vertical es uno de los términos que mayor incertidumbre implica a su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) fue considerado de acuerdo a la Tabla 8.1, también se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy, el valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión.

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S)$$

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + S_h + ETR + \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 85 + 0 + 0 + (-5.6) - 53.90 - 8.08$$

$$R_v = 17.42 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

La recarga total de aguas subterráneas será:

ENTRADAS	m³/año
Entradas Horizontales (celdas de flujo)	53,906,104.06
Retorno de riego	8,085,915.61
Infiltración de cuerpos de agua	0.00
Recarga vertical	17,404,284.47
Recarga Total	79,396,304.13
SALIDAS	
Bombeo	85,000,000.00
Salidas Horizontales (celdas de flujo)	0.00
Descarga de manantiales (flujo base)	0.00
Evapotranspiración en niveles someros	0.00
Salidas totales	85,000,000.00
CAMBIO DE ALMACENAMIENTO	-5,603,696

La figura 8.3 muestra un modelo conceptual de la zona de balance para el área de estudio, con los valores obtenidos en el balance de aguas subterráneas.

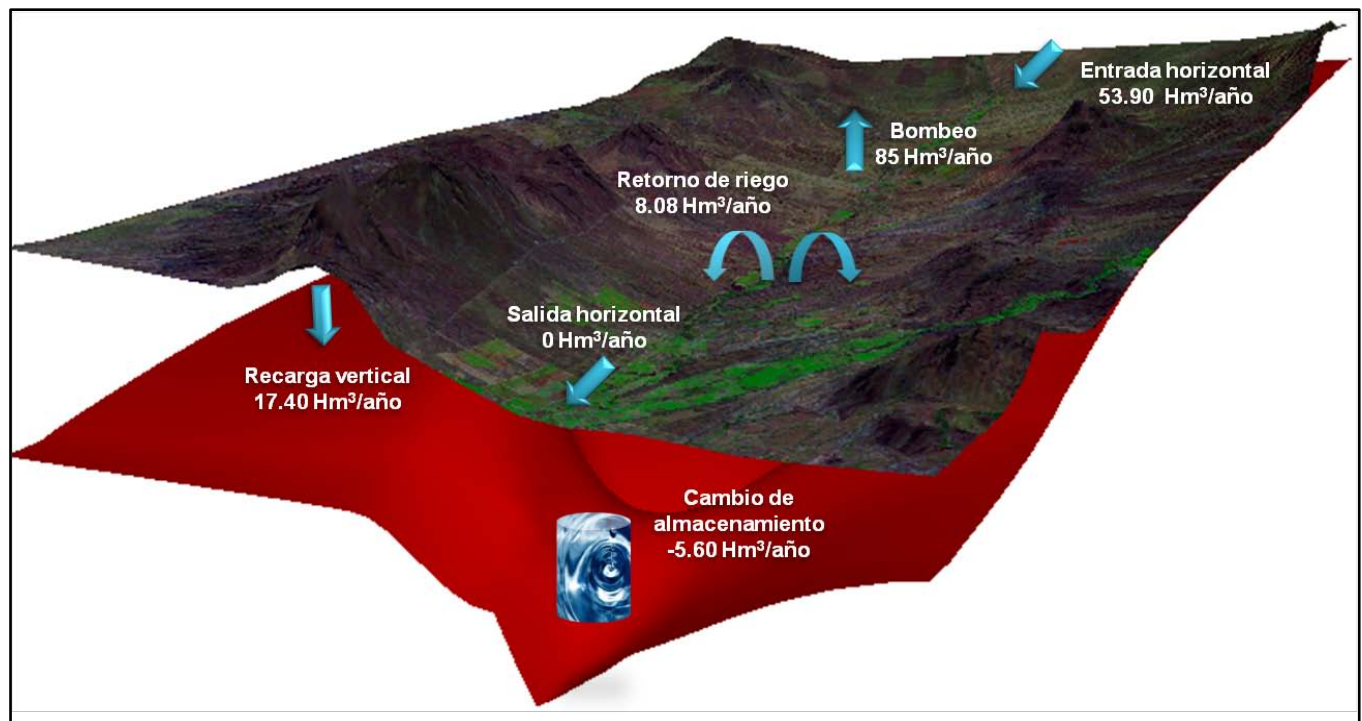


Figura 8.3 Modelo de balance conceptual en el área de estudio.



9.- MODELACIÓN MATEMÁTICA

Mod-Flow es un programa tridimensional para agua subterránea el cual trabaja bajo una expresión de diferencias finitas de aproximación. Mod-Flow fue desarrollado por el USGS de los Estados Unidos de América bajo el sistema de Fortran 88 y documentado en los años 1995 – 1996, el programa fue generado por un proceso matemático y matrices complejas bajo la ley de Darcy y sus resultados finales presentaban una calidad muy pobre. Posteriormente la Universidad de Waterloo logró codificar un módulo para una mejor calidad visual en los resultados el cual le dieron el nombre de Visual Mod-Flow. Hoy en día se han estructurado diferentes módulos codificados para otras aplicaciones particulares y otras nuevas compatibilidades.

Mod-Flow puede simular un fluido en estado transitorio y estacionario, combinando varias tipos de capas, así como tipo de acuíferos confinados y semiconfinados, también puede calcular el movimiento de una partícula, es decir modelos de transportes de contaminantes. El modelo puede requerir de varios parámetros, depende del cual sea su aplicación requiere datos como; pozos de extracción o de inyección, área de recarga, flujos y drenes, conductividad hidráulica, conductividad hidráulica vertical, topografía, flujos de entrada y salida, coeficiente de almacenamiento, condiciones de fronteras, coordenadas para capas horizontales, geometría del acuífero. A continuación algunas otras aplicaciones de Visual Mod-Flow:

- ✓ Construir una distinción tridimensional entre acuíferos confinados y libres durante la evaluación del sitio para un relleno sanitario.
- ✓ Caracterizar las variables hidrogeológicas que influyen el flujo de aguas subterráneas y la migración de contaminantes en instalaciones industriales.
- ✓ Visualizar en dos y tres dimensiones e interpretar shapefiles, archivos de CAD, archivos GRD, archivos de EXCEL, diagramas tridimensionales, superficies, imágenes raster, pozos y puntos XYZ.
- ✓ Diseñar condiciones de frontera independientes de la malla para el modelo MODFLOW, con base en datos de GIS o datos geológicos.
- ✓ Interpolación bidimensional y trazo de contornos.
- ✓ Generar modelos geológicos complejos, mallados, que pueden ser fácilmente exportados a Visual MODFLOW para su simulación.
- ✓ Generar mallas numéricas deformadas/uniformes, incluyendo refinación vertical y horizontal.
- ✓ Analizar los resultados de MOFLOW y MODPATH en dos y tres dimensiones.

En la Figura 9.1 se presenta un diagrama para crear un modelo conceptual en Mod-Flow a partir de un modelo numérico.

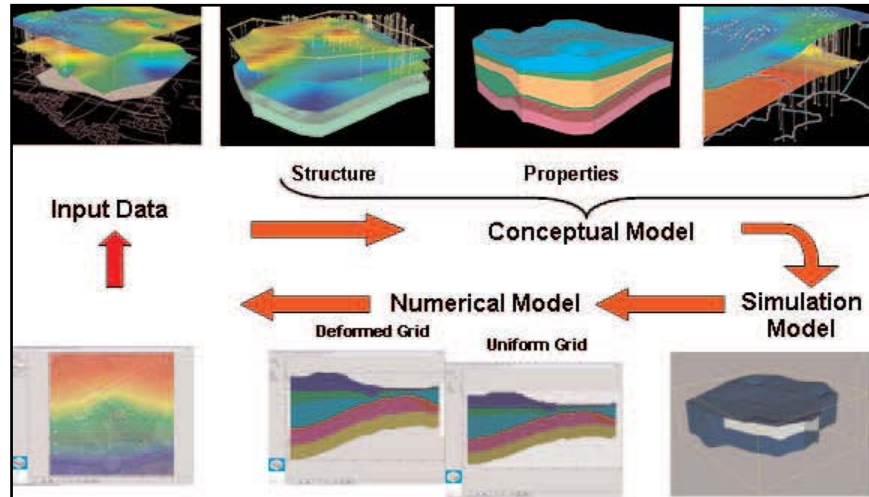


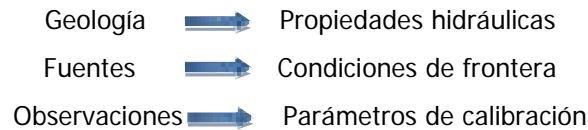
Figura 9.1.- Modelo conceptual en Mod-Flow (tomado de Schlumberger, año 2007)

Los modelos son, por definición, aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural. Las suposiciones y las soluciones de compromiso debidas a las limitaciones en la capacidad de cómputo, la precisión limitada del proceso de solución, la escasez de fondos y la insuficiencia de los datos de entrada, pueden combinar los resultados y las predicciones.

Las limitaciones en Mod-Flow se basan en que los datos de entrada afectan la precisión y aplicabilidad de los modelos. Una importante información pudiera ser la arquitectura del modelo: el tamaño de la malla y el número de capas. Los primeros modelos matemáticos estaban limitados por la capacidad de cómputo y la poca disponibilidad de información hidrogeológica; el tamaño de la malla era grueso y los datos eran limitados. Hoy en día, el tamaño de las celdas puede ser mucho más pequeño debido a que los sistemas de cómputo se encuentran muy avanzados tanto en su capacidad como en memoria. Sin embargo, la información hidrogeológica no ha aumentado a la misma velocidad que la capacidad de simular la presencia y el movimiento del agua subterránea utilizando celdas muy pequeñas. Actualmente el tamaño de la celda está limitado más bien por el objetivo del modelo y los datos hidrogeológicos, y no por el tiempo de cómputo.



Un modelo de aguas subterráneas es una representación de un sistema acuífero natural, existen varios tipos de modelos de aguas subterráneas: como los modelos conceptuales, modelos matemáticos, entre otros. Un modelo matemático de aguas subterráneas utiliza las ecuaciones de flujo y conservación de la masa para simular flujo de agua subterránea y transporte de solutos donde se incorporan los rasgos físicos del sistema natural como expresiones matemáticas:



Todos ellos basados en las observaciones reales del sitio.

Los objetivos de un modelo matemático tomando en cuenta la conservación del acuífero son principalmente tres:

- 1) Implementar un modelo de simulación hidrodinámica del acuífero para hacer balances.
- 2) Elaborar escenarios de manejo del acuífero.
- 3) Hacer recomendaciones para la administración del agua subterránea, operando los escenarios de incremento paulatino de extracción.

Mod-Flow resuelve las ecuaciones diferenciales parciales usando el método de diferencias finitas, donde cada celda de Mod-Flow es un volumen unitario. En general la ecuación de flujo de aguas subterráneas que emplea Mod-Flow es la siguiente:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z})}_{\text{Flujo de aguas subterráneas entradas / salidas}} + \underbrace{W}_{\text{Fuentes y sumideros}} = \underbrace{Ss \frac{\partial h}{\partial t}}_{\text{Cambio de almacenamiento}}$$

Donde:

K = conductividad hidráulica en las direcciones horizontal (x,y) y vertical (z).

H = carga hidráulica.

W = flujo volumétrico por unidad de volumen, que representa fuentes o sumideros de agua.

Ss = coeficiente de almacenamiento específico del medio.

t = tiempo.

$\partial x, \partial y, \partial z$ = Discretización en tres dimensiones

La ecuación de flujo anterior debe satisfacer las condiciones iniciales y de frontera dadas por:

$$h(x_i, 0) = h_o(x_i)$$

$$h(x_i, t) r1 = h_o(x_i, t)$$

$$V_i n_i \mid r2 = -Vn(x_i, t)$$

Donde:

h_o = carga inicial

h = carga preestablecida en la frontera de tipo Dirichlet $r1$

n = $(n1, n2, n3)$ vector unitario normal hacia fuera de una frontera tipo Neumman $r2$

Vn = flujo lateral preestablecido por unidad de área en una frontera r

(Vn es positivo para el flujo que entra al dominio y negativo para el flujo que sale del dominio)

Cuando $r2$ es una frontera impermeable y $Vn = 0$, entonces $V_i n_i \mid r2 = 0$.

En la ecuación tridimensional de flujo saturado en un medio poroso, combinada con las condiciones iniciales y de frontera adecuadas, representan una expresión matemática del sistema de flujo de agua subterránea.

Por otra parte el proceso de modelación se basa en varias etapas como lo muestra la Figura 9.2, donde la etapa clave se podría decir que es la obtención de datos.

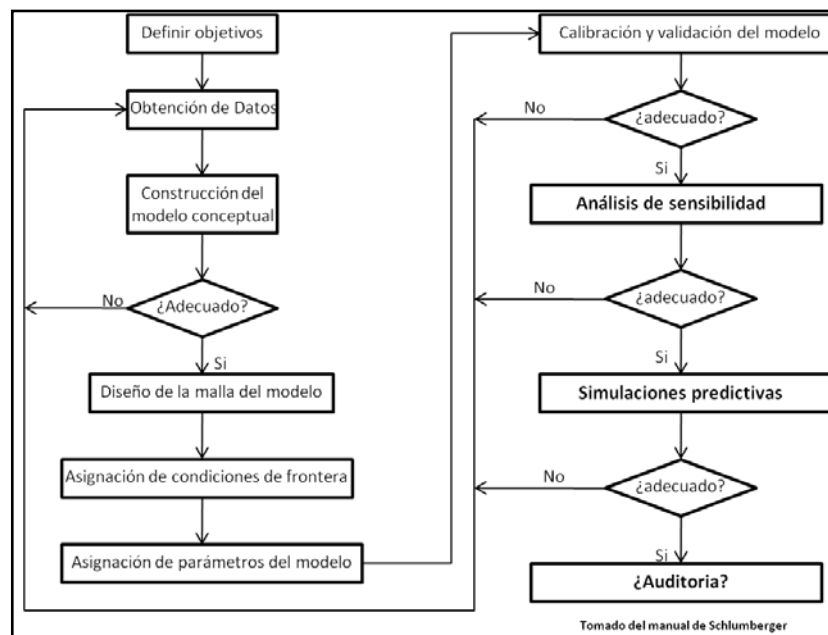


Figura 9.2.- Etapas principales de un modelo matemático en general.



En la obtención de parámetros necesitamos dos tipos de datos para desarrollar un modelo de aguas subterráneas:

Parámetros de entrada - Usados para construir el modelo, del cual tenemos tres elementos importantes:

Geometría del modelo

Extensión del dominio horizontal y vertical, estructuras de las capas.

Propiedades

Conductividad hidráulica, porosidad, coeficiente de almacenamiento.

Fronteras

Localización, valores.

Observaciones – usadas para calibrar el modelo:

Flujo - Carga hidráulica, gradiente hidráulico.

Otro punto importante es definir las fronteras naturales que limitan al sistema de flujo de aguas subterráneas, esto definirá la extensión del área dentro de la cual es necesario obtener datos como:

- Parteaguas geológicos
- Parteaguas de aguas superficiales
- Parteaguas subterráneos

Las capas que simulan a un área determinada pueden funcionar como libres, confinadas o una combinación de ambas. Mod-Flow también permite modelar *esfuerzos* externos al sistema tales como pozos de extracción o de inyección, recarga, evapotranspiración, ríos, drenes y calcular el balance de una zona determinada por medio de "Zonal Budget" entre otros.

Finalmente, un modelo de agua subterránea es el resultado de todo un estudio geohidrológico llevado a cabo en un área determinada, donde se obtienen todos los parámetros que alimentan al modelo desde censos de aprovechamientos, geología, geofísica, pruebas de bombeo, etc.

10.- INTEGRACIÓN DE PARÁMETROS HIDRAÚLICOS

10.1 Condiciones de Frontera

Las condiciones de fronteras o condiciones de borde son importantes para un modelo matemático ya que éstas nos definirán los límites hidráulicos del acuífero, así como el tipo de materias impermeables y contactos geológicos. El área de estudio se encuentra limitada por zonas volcánicas y una zona de valle producto de movimientos tectónicos. El área en si tiene su flujo principal de Norte a Sur, proveniente principalmente por el Río Zanjón, el cual de acuerdo a la piezometría mencionada anteriormente, es el principal aportador de agua al acuífero. (Figura 10.1)

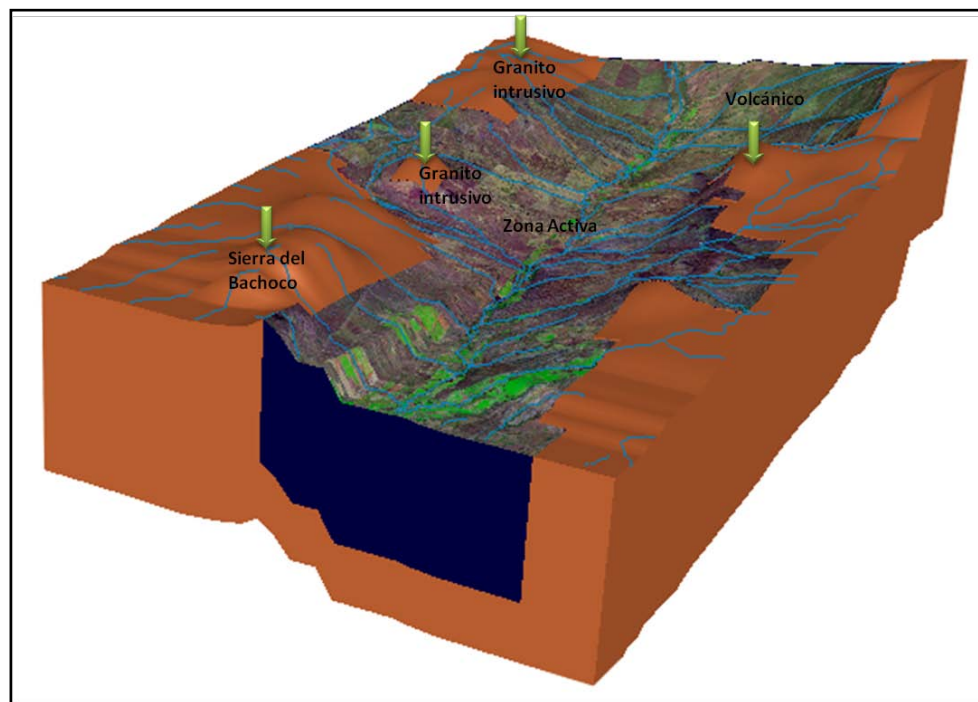


Figura 10.1.- Condiciones de frontera del acuífero en el área de estudio.

A partir de las condiciones de frontera podemos deducir el agua disponible en la zona saturada y podemos estimarla, utilizando un método de balance de aguas. Por otra parte los escurrimientos superficiales provenientes de las zonas altas de las sierras a los valles tienen poca influencia en el acuífero, ya que los niveles de profundidad de nivel estático generalmente se encuentran mayor a los 20 m.

10.2 Diseño de la malla

Los límites hidráulicos son representados por fronteras a través de las cuales no hay flujo, mientras que los límites artificiales generalmente son representados por fronteras de carga constante. Los límites físicos e hidráulicos son los que representan de manera más fiel los límites verdaderos en un sistema natural y a partir de las condiciones de frontera se establece el desarrollo de una malla discretizada dentro del modelo a las condiciones de bordes establecidas. La malla generalmente debe de ser orientada al sentido principal de la dirección de flujo del sistema de agua subterránea, esto se puede determinar a partir de cargas observadas y piezometría (Figura 10.2).

La malla se definió dentro de la zona activa de flujo que consta de 31 columnas y 60 renglones. La malla se encuentra orientada de norte a sur conforme al flujo principal mencionado anteriormente, donde cada celda cuadrada tiene 1000 m de lado y un refinamiento de 500 m en el área de zona de abatimiento por la parte sur del área de estudio. El tamaño de las celdas afecta el modelado debido a que es necesario suavizar o promediar los parámetros de entrada y, además, determina a qué nivel de detalle el modelo va a ser útil.

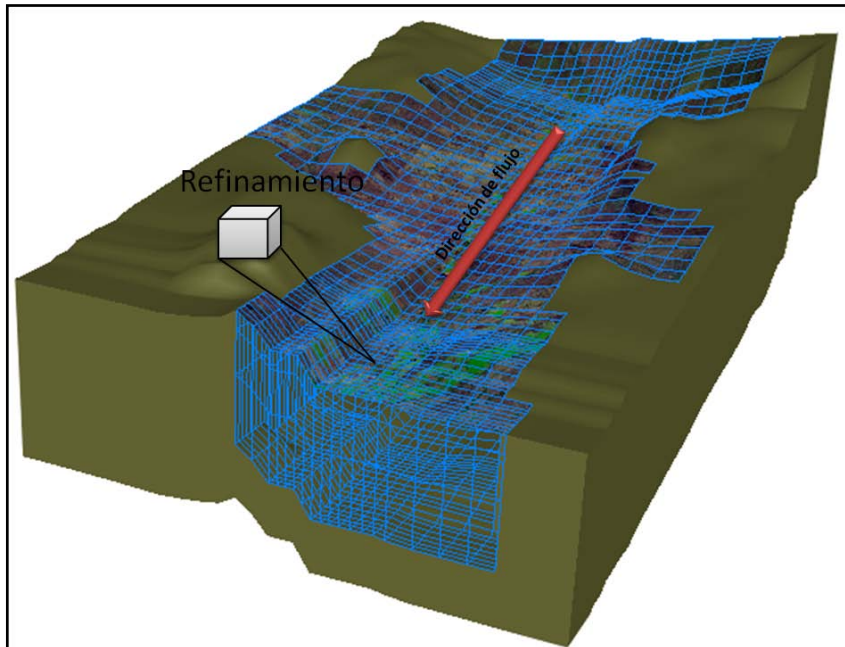


Figura 10.2.- Malla del modelo de flujo.

10.3 Determinación de Capas

El número de capas se determinó a partir de los perfiles eléctricos y estudios anteriores dentro del área de estudio. Se determinaron 4 capas importantes para el modelo; la primera capa consiste de suelo compacto y arenas arcillosas, la segunda que es la más importante y productiva, se compone por arenas gruesas y gravas, la tercera capa se compone de la Formación Baucarit y por último la cuarta capa es el basamento granítico (Figura 10.3).

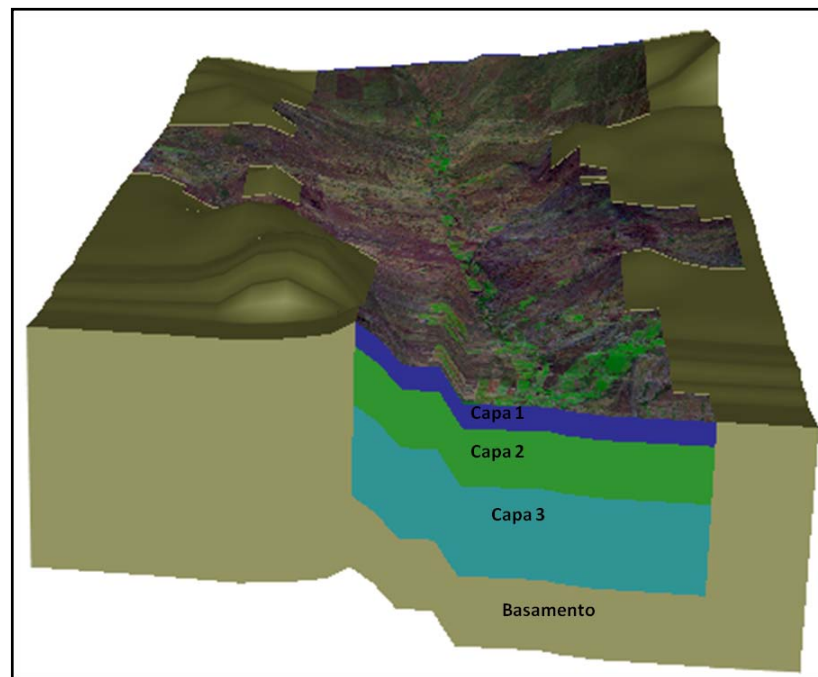


Figura 10.3.- Diferentes capas para el modelo hidrodinámico en el área de estudio.

Es importante señalar que para aplicar un número de capas se debe determinar la geometría del acuífero que consiste en las dimensiones físicas del acuífero: la topografía de la cima y la base (basamentos), así como la localización de los flancos activos del acuífero.

Se puede observar que las capas tienen diferentes grosores los cuales también presentarán diferentes transmisividades hidráulicas, los grosores varían de acuerdo con los datos geofísicos reinterpretados, y de la profundidad de los aprovechamientos.



10.4 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica (K) que se define como una medida de la habilidad del acuífero de transmitir agua subterránea. Dentro de la medida que caracterizan a una formación geológica desde el punto de vista hidráulico, la conductividad hidráulica horizontal (K_h) y vertical (K_z), (o la transmisividad) y el coeficiente de almacenamiento, son parámetros que se deben incluir en los modelos utilizados para simulaciones transitorias. Los datos para estos parámetros suelen ser en muchas ocasiones escasos y por eso, en grandes áreas de los modelos se estiman sus valores. Los modelos generalmente utilizan conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento basadas en registros de pozos (pruebas de bombeos, perforaciones de suelos, muestras de suelos, cortes litológicos) y valores corregidos durante la calibración para comparar los niveles de agua simulados y observados

En el área de estudio se reinterpretaron diez pruebas de bombeo realizadas por la empresa Guysa en el año 2000, se presentan los resultados en la Tabla 10.1. Los pozos con clave 9,13 y 16 se localizan dentro de la zona anómala a la altura del poblado Zamora, sin embargo los valores conductividad hidráulica y transmisividad difieren mucho con los valores de extracción en varios casos, de esta manera las conductividades se fueron ajustando de acuerdo a litología, perfiles eléctricos, gasto y calibración del modelo.

Tabla 10.1.- Valores de parámetros hidráulicos.

Clave	X	Y	Pof. Total(m)	Ne.(m) Feb 2000	Nd (m) Feb 2000	Abat (m)	Cuadal	T (m ² /d)	k (m/S)
9	507323	3239974	300	101.11	130.6	29.49	110.8	170.208	9.91E-06
13	508847	3239032	300	88.47	140.36	51.89	47	38.88	3.54E-06
16	507090	3241746	320	105.54	163.17	57.63	73	55.296	1.81E-06
46	505500	3253138	110	81.13	86.67	5.54	4	24.192	9.80E-06
117	512598	3243019	122	16.93	38.15	21.22	62	103.68	1.14E-05
134	512456	3248855	80	15.48	30.88	15.4	30	48.384	8.69E-06
247	507357	3265014	90	33.04	56.35	23.31	102	196.992	4.00E-05
255	509987	3274040	183	47.23	67.98	20.75	67	513.216	4.38E-05
397	506878	3267118	210	33.55	45.53	11.98	60	206.496	1.35E-05
352	511202	3233057	61	19.87	39.84	19.97	21	819.936	2.31E-04

Del tal manera que la conductividad hidráulica se le asignó valores desde 10^{-4} m/s en la capa más productiva y las capas restantes de 10^7 y 10^8 . La Figura 10.4 también indica la distribución de las pruebas de bombeo, nótese que las pruebas en su mayoría se concentraron en la parte sur del área de estudio y otras pocas en el centro.

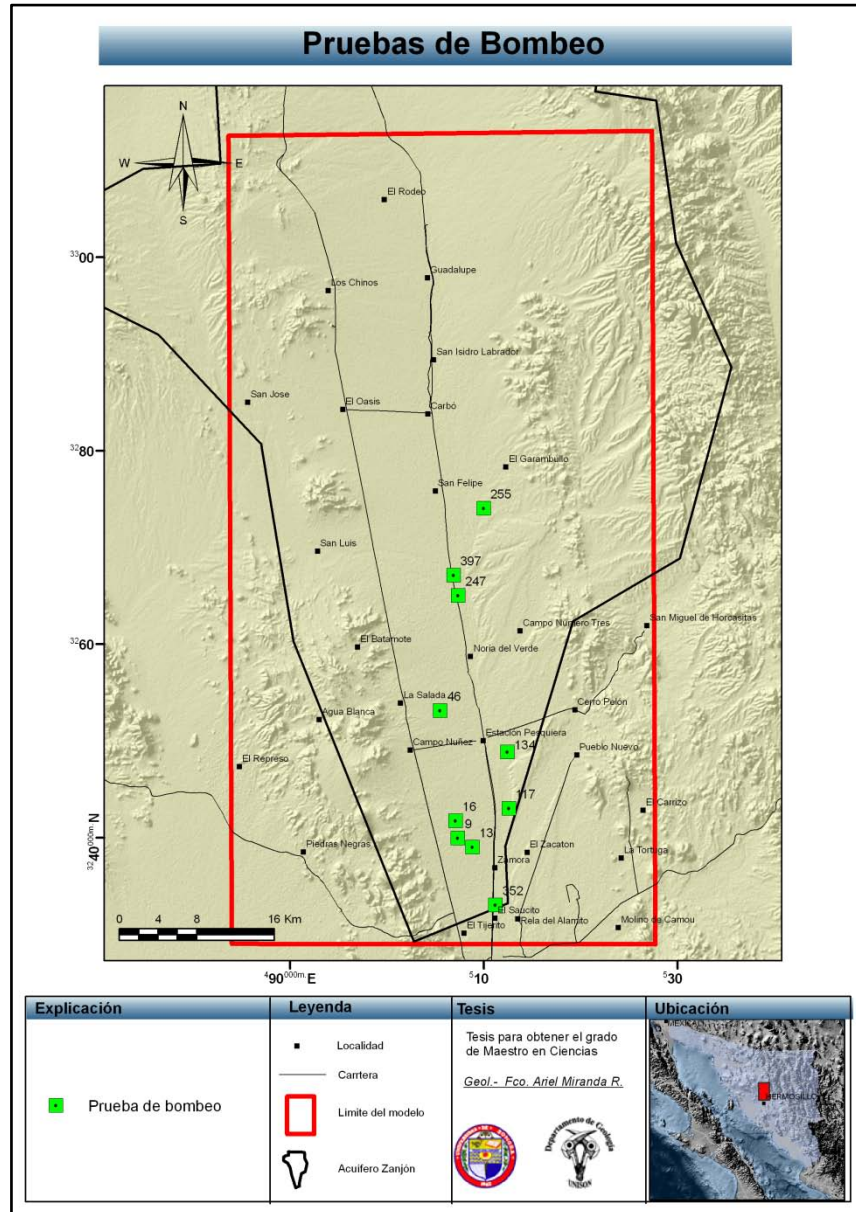


Figura 10.4.- Pruebas de Bombeo en el área estudio.

No está demás mencionar que debido a que la calibración del modelo depende tanto de la conductividad hidráulica como de la recarga, estos dos parámetros son ajustados conjuntamente. La conductividad hidráulica se convierte es un parámetro muy sensible para el modelo, el cual repercute directamente en los resultados, como en la calibración del modelo.

10.5 Recarga

De acuerdo a Mullican (1997), demostró que el hecho de distribuir la recarga de manera discrecional, zonificada o uniforme tenía poco impacto en las predicciones numéricas de los niveles de agua en el modelo a escala regional (pero no a escalas locales). La verdadera cantidad de recarga que se aplica al límite de volumen de flujo especificado es importante, porque afecta los niveles de agua y la calibración del modelo. En el área de estudio la recarga se compone de un 17% en comparación con el volumen de extracción total que se bombea actualmente.

10.6 Pozos de Bombeo

Las estimaciones de la extracción de agua por bombeo suelen ser datos muy importantes para el modelado de aguas subterráneas, especialmente para las predicciones de reducción de niveles piezométricos y efectos de abatimientos como tal es el caso de nuestro estudio. El bombeo afecta la calibración del modelo y las predicciones de los niveles de agua en el futuro, el valor de extracción se tomó como un gasto constante los 365 días del año.

La extracción de volumen total para el área de estudio fue de $85\text{Hm}^3/\text{año}$. La Figura 10.5 indica el bombeo en m^3/d (caudal) vs tiempo en días, el bombeo se simuló constante a 3650 días es decir a 10 años de predicción. Se pueden observar extracciones menores a los $800\text{m}^3/\text{d}$ (9 L/seg) hasta los 120 L/seg ($10,800\text{m}^3/\text{dia}$).

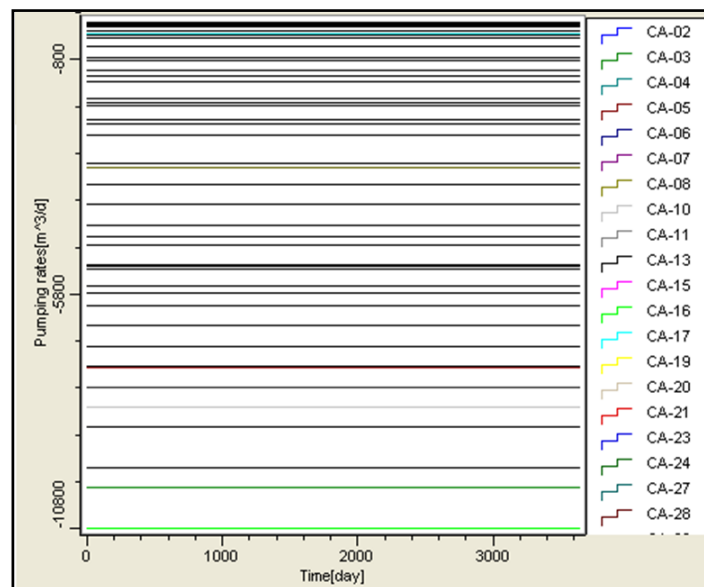


Figura 10.5.- Gráfica de bombeo constante para el modelo de predicción.

En total se utilizaron alrededor de 300 aprovechamientos entre norias y pozos perforados, distribuidos generalmente sobre la zona del cauce del río Zanjón, donde la gran mayoría de los aprovechamientos tienen su ranurado en la segunda capa del modelo. La extracción fue estimada de acuerdo al censo elaborado por la empresa IDEAS 2007.

Se puede observar en la Figura 10.6 que en la parte sur del área de estudio, se concentran aprovechamientos donde se tienen gastos mayores a los 60 l/s hasta un gasto máximo de 100 l/s, mismo que ha contribuido a los bajos niveles piezométricos en los últimos años.

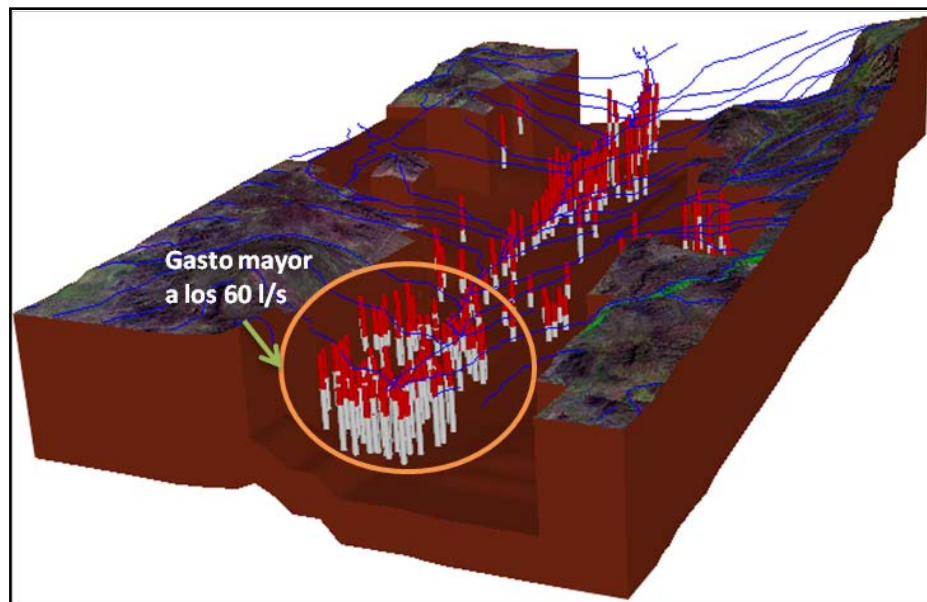


Figura 10.6.- Distribución espacial de los pozos de bombeo.

Cabe señalar que el modelo corrige internamente la tasa de extracción en función del espesor saturado y la transmisividad, es por eso de la importancia de los grosores de los espesores de ranura de los aprovechamientos, es decir la zona saturada, ya que a medida que los niveles de agua descienden y el espesor saturado disminuye, la producción típicamente se reduce.

Cuando se agrega un pozo de bombeo al modelo matemático debemos de contar con la siguiente información:

- Nombre del pozo
- Coordenadas de localización
- Intervalo de ranurado
- Régimen de extracción de bombeo

10.7 Pozos de observación

Los pozos de observación para el modelo son importantes porque representan los niveles piezométricos de un acuífero cuando éste se encuentra por decir estable. Generalmente se toma un red de pozos de monitoreo que se pudiera enriquecer en años futuros y llevar a cabo una vigilancia de los niveles de agua subterráneas.

Muchos de los pozos de observación utilizados para el modelo tienen poca continuidad en datos de años anteriores a partir del año 2000 al 2007, es decir los datos consecutivos de niveles estáticos son deficientes. Sin embargo, se tomaron los pozos con más datos de observación posible para así obtener un mejor resultado en la calibración del modelo. Como lo muestra la Figura 10.7 se utilizaron alrededor de 32 pozos de observación.

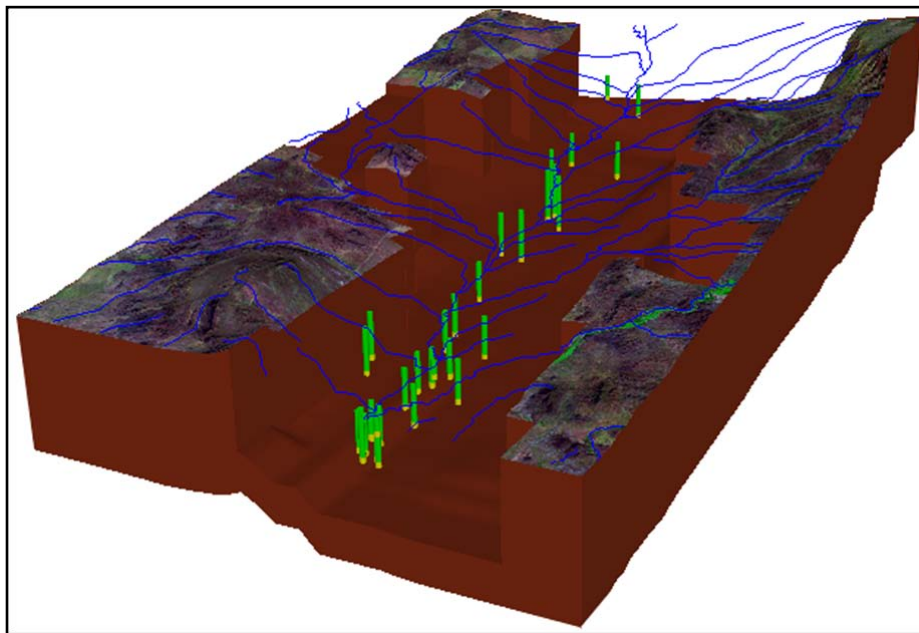


Figura 10.7.- Pozos de observación.

No está demás mencionar que los pozos de observación en el modelo son utilizados para comparar las cargas hidráulicas calculadas vs las observadas. Las observadas corresponden a aquéllas que son tomadas en campo y obviamente necesitamos que estas cargas hidráulicas sean de naturaleza confiable. Generalmente se recomienda que estos datos siempre en lo posible sean referidos al nivel del terreno y no a la cota de brocal, debido a que pueden existir diferencias entre lo calculado y lo observado.

11. RESULTADO DE PREDICCIÓN

11.1 Predicción 2015

Las grandes extracciones que se llevan a cabo en la parte sur del área de estudio están siendo afectadas de manera considerable para el acuífero que se encuentra dentro del área de estudio. Para los años siguientes partiendo de condiciones iniciales del 2005, el modelo presenta el cierre total de las curvas de abatimiento en la parte sur del modelo, afectando a los niveles de agua subterránea el cual presentará fuertes descensos, así como en sus evoluciones que se ven reflejados en valores negativos (Figura 11.1).

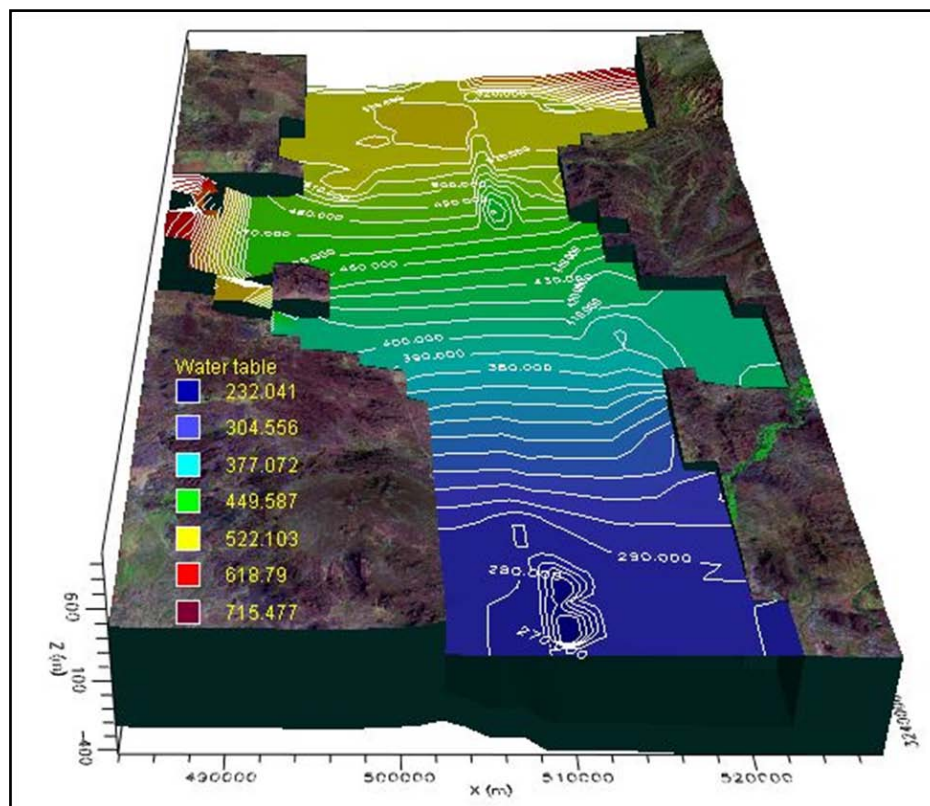


Figura 11.1.- Elevación del Nivel Estático 2015.

Por lo anterior la parte norte del área de estudio presenta tendencias estables, donde la corriente de flujo subterráneo proveniente del parte norte sigue su flujo normal es decir su gradiente hidráulico natural viaja de las partes más altas hacia las partes más bajas.

Una comparación de los niveles de elevación piezométrica del año 2007 y 2015 como lo muestra la Figura 11.2, muestra una zona de abatimiento en la zona sur del área de estudio. Los valores piezométricos muestran como valor máximo 588 y el valor más bajo con 265 m.s.n.m.

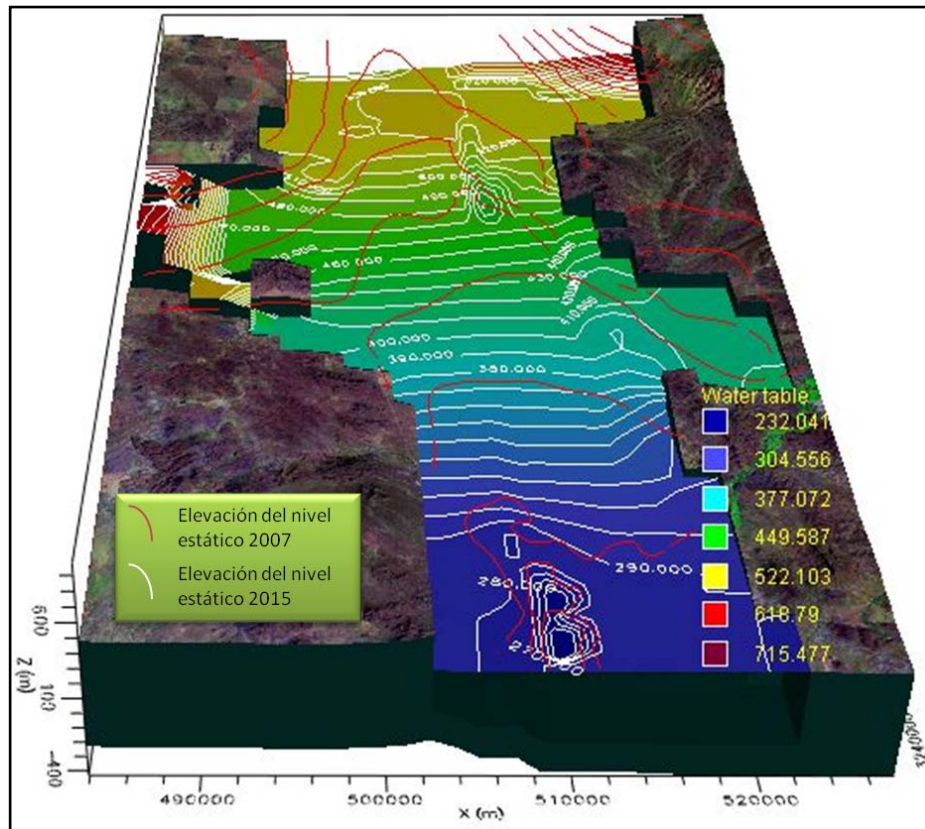


Figura 11.2.- Comparación de los niveles piezométricos de los años 2007-2015.

De acuerdo a los valores de elevaciones de niveles piezométricos se puede estimar que el acuífero en su zona de abatimiento desciende 4 m por año, esto considerando el bombeo de todo el año, no obstante muchos de los aprovechamientos censados trabajan en temporadas o cierto número de horas al día por lo cual el valor en general para esa zona se puede reducir a 2 m/año, entonces podemos deducir que en diez años el acuífero bajara sus niveles a 20 m.

El cono de abatimiento en el área de estudio, se localiza en la zona de salida del flujo subterráneo el cual detiene ese flujo absorbiendo al cono y atrayendo agua de la entrada al siguiente acuífero.

El modelo presenta celdas secas en la capa superior durante la simulación como lo indica la figura 11.3, estas celdas Mod-Flow elimina automáticamente el bombeo de extracción y esto es de acuerdo a los valores de ranurado y pozos de observación. Esto se debe al incremento de bombeo en el área de estudio reduciendo sus niveles someros y desapareciendo los niveles freáticos, el cual se ve reflejado en el historial piezométrico de la zona de interés.

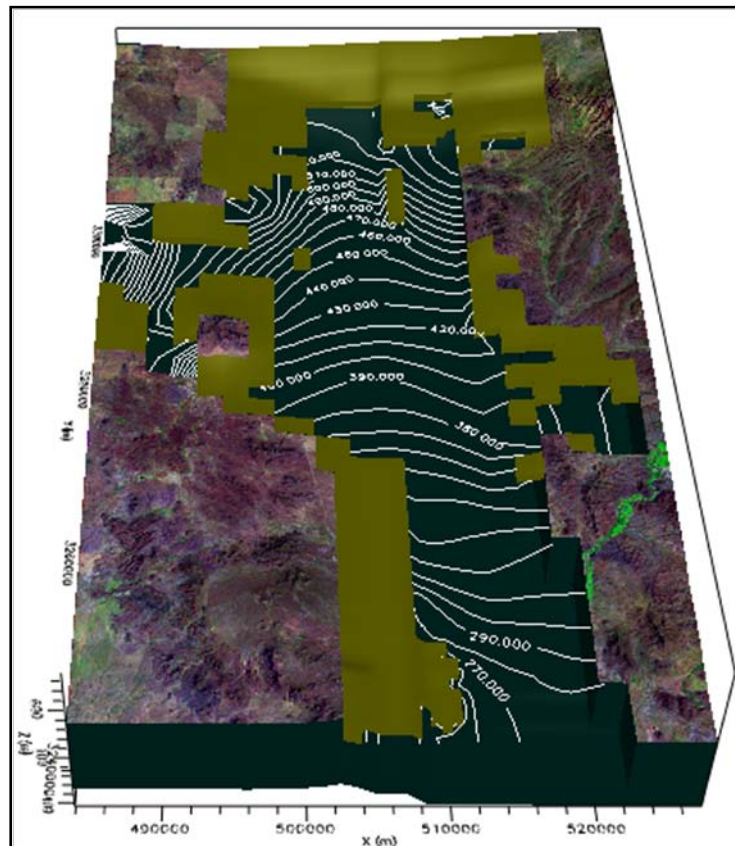


Figura 11.3.- Celdas secas dentro del área de estudio.

11.2 Calibración

La calibración consiste en obtener un conjunto de valores de los parámetros del modelo donde se incluye las propiedades de acuífero, los términos fuente-sumideros, las condiciones iniciales y condiciones de frontera que permiten que el modelo represente los valores de observaciones (datos cualitativos) dentro de un error aceptable.



En los modelos hidrodinámicos los datos piezométricos se toman siempre como observaciones pero también se recomienda tomar datos de caudales, manantiales, estaciones hidrométricas que se pueden tomar como observaciones de la recarga o la descarga del acuífero.

Existen dos procedimientos generales para la calibración: el ajuste manual por ensayo y error, y la estimación automatizada de parámetros (WinPEST). El ajuste manual suele ser la más utilizada hoy en día para los modelos, sin embargo suele ser muy subjetivo y conducente a resultados difícil de evaluar (Carrera y Neuman, 1986). En este ajuste el modelador calibra su modelo de acuerdo con parámetros como gasto, geología, conductividades y de acuerdo con la información y todo el contexto del estudio, así mismo se esperan un resultado que se acerque más a los resultados reales previstos de un modelo conceptual y piezometría ya existente. Por otra parte, el uso de la calibración automatizada con WinPEST consiste en asignar un límite de valores de calibración a partir de los datos alimentados al modelo. Así mismo el procedimiento automatizado calcula directamente la sensibilidad del modelo hacia sus parámetros y la correlación de estos mismos. Esta información permite determinar si los parámetros del modelo y las predicciones fueron calculados de manera confiable con los datos disponibles, y que datos adicionales son requeridos para mejorar el modelo (Pooter y Hill, 1997)

Resumiendo en sí, la calibración es el ajuste de los parámetros o un grupo de propiedades hidráulicas o condiciones de frontera ajustadas, que concuerden con los valores medidos en campo dentro de un rango de error preestablecido (Figura 11.4).

WinPest se emplea como un módulo de ModFlow que ayuda al proceso de calibración por medio de algoritmos matemáticos complejos, PEST puede ayudar a determinar si el modelo conceptual es razonable para encontrar el peor y el mejor caso de predicción bajo condiciones calibradas. Sin embargo PEST no garantiza que los resultados sean 100% razonables, si esto ocurre, podría ser un fuerte indicador de que nuestro modelo conceptual es incorrecto.

En la Figura 11.5 se observa una imagen de PEST en Visual Mod-Flow donde podemos definir que parámetros nos interesa calibrar y que variables deseamos controlar. Finalmente podemos utilizar PEST como una herramienta de interpretación de verificación de datos del modelo y no como un calibrador automático.

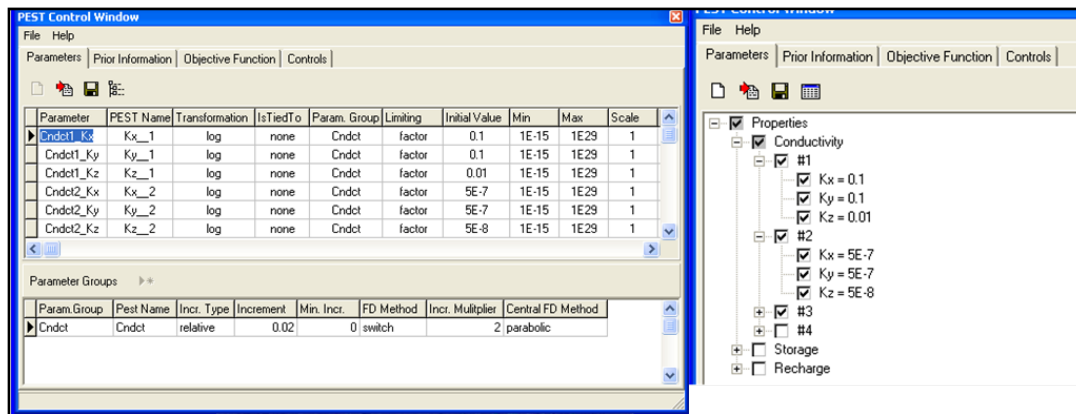


Figura 11.5.- PEST en visual MODFLOW.

En la Figura 11.6 Muestra la calibración del modelo del presente estudio donde los puntos rojos representan los niveles en la primera capa sin embargo sus niveles estáticos rebasan en su mayoría los 20 m de profundidad, por otro lado los puntos azules representa el nivel en la segunda capa. El período de calibración para este estudio, se extendió hasta el año 2015 a partir de la condiciones iniciales 2005, la Figura 11.6 presenta los siguientes resultados estadísticos:

- Número de puntos observados en total 32
- Residual Medio (RM)= 0.407
- RMS = 5.94(m)
- RMS Normalizada = 2.28 (%)

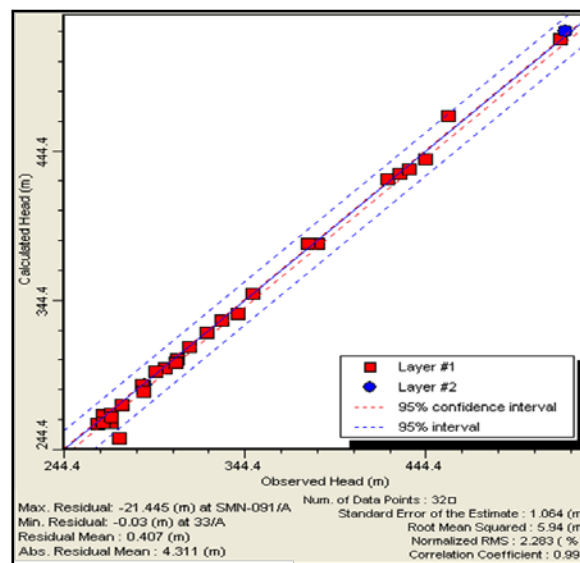


Figura 11.6.- Muestra la línea y puntos de calibración para el modelo.



El residual medio mide el error del modelo, si su tendencia es negativa se dice que esta subestimando las cargas hidráulicas y lo contrario si su tendencia es positiva. Un residual medio cercano a cero indica un modelo virtualmente con poco error. Por otra parte la desviación media cuadrática (RMS) o error cuadrático medio es una medida utilizada con frecuencia de las diferencias entre los valores pronosticados por un modelo o un estimador y los valores observados de la realidad, es decir mide el valor de lo calculado contra lo observado. Mientras más pequeño sean el RM y RMS mejor será el ajuste de las cargas simuladas a las observadas, pero se advierte que estos resultados solo son estadísticos y son una medida del valor residual promedio en el modelo.

12. DISCUSIÓN

Los modelos numéricos de flujo de agua subterránea son importantes para integrar los datos hidrológicos y predecir de qué manera los niveles de agua en un acuífero responderán a la extracción. Una vez calibrado el modelo se puede utilizar para la predicción, donde las predicciones de interés son uno de los factores de mayor peso en los modelos matemáticos.

Estos modelos permiten predecir los cambios en el espesor saturado e identificar los datos de entrada cuya calidad debe ser mejorada, con censos de calidad y una red de monitoreo establecida que podemos definir con una mejor precisión en los cambios de almacenamientos. Es importantes reemplazar modelos nuevos con mejor calidad en los datos de entrada como la conductividad hidráulica, zonas recarga, extracción para el comportamiento del modelo, sobre todo cuando se necesitan predicciones detalladas, así mismo es necesario emplear una discretización más fina y obtener resultados más precisos de la reducción de los niveles estáticos y zonas de abatimientos.

Es importante desarrollar una mejor descripción de los límites de la zona de estudio, teniendo más estudios geofísicos que nos ayuden a interpretar la geología del subsuelo y tener una mejor definición de la geometría de la zona de interés y tener modelos conceptuales de mayores atributos. El tener una mejor calidad en los datos de parámetros hidráulicos puede implicar esfuerzos muy costosos, sin embargo se podría mejorar la información exigiendo a perforistas de nuevos pozos que son perforados las pruebas de bombeo y datos de aforo.

Si bien es cierto que los modelos son predicciones numéricas a partir de datos de entrada de alimentación, el cual nos puede ayudar o darnos una idea sobre una predicción en el futuro sobre un acuífero o un área de interés, pero los resultados dependerán de los datos de entrada, es decir si los datos son erróneos por lo tanto los resultados serán erróneos (Figura 12.1).

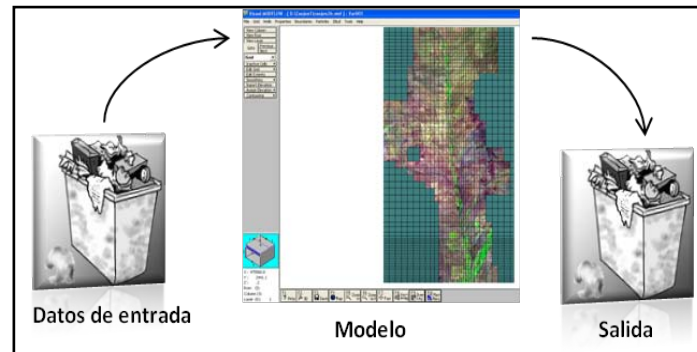


Figura 12.1.- Esquema de datos erróneos aplicados al modelo
(Curso de Waterloo hydrogeologic, 2005)

Sin embargo existen aun aspectos hidrogeológicos conceptuales típicos que todavía quedan por resolver en el área de estudio. Una de las mayores incógnitas en el área de estudio son las extracciones totales de los aprovechamientos y los espesores de los tubos ranurados, así como también las características constructivas de los pozos perforados, en el estudio llevado a cabo por el empresa IDEAS (2007) se registró un número importantes de aprovechamientos de los cuales no se logró medir sus niveles ni sus extracciones por causas ajenas a esa empresa.

Es significativo señalar que hoy en día las versiones de Visual Mod-Flow de Schlumberger (anteriormente Waterloo), vienen muy limitados en sus versiones básicas. Sus límites se basan a un número de celdas y columnas, a un establecido número de capas y a una determinada área para llevar a cabo un modelo.

No obstante MODFLOW es la opción prevalente y la más comercial hasta ahora para llevar a cabo un modelo matemático visual.



Las ventajas de MODFLOW incluyen:

- ✓ Sus antecedentes comprobados como un programa oficial de modelado para la administración de aguas subterráneas.
- ✓ Su popularidad entre la mayoría de los profesionales en aguas subterráneas.
- ✓ El perfeccionamiento continuo del código.
- ✓ El soporte técnico de parte de los proveedores externos de preprocesadores.
- ✓ Su versatilidad y capacidad de expansión por el usuario.
- ✓ Las oportunidades de capacitación.
- ✓ Resultados en vista tridimensional.
- ✓ Resultado de la modelación reproducido por un video.

Desventajas de MODFLOW:

- ❖ Costo muy elevado del programa.
- ❖ Costos muy elevados de los módulos para un mejor desempeño del software.
- ❖ Costos muy elevados en la capacitación.
- ❖ Costos muy elevados para la actualización de licencias.
- ❖ No es preciso en los acuíferos en roca.
- ❖ No trabaja con capas acuñadas.
- ❖ No define datos estructurales.



13. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- La reinterpretación de 4 secciones gravimétricas permitió reconocer cuatro fosas principales con profundidades que van desde los 600 a los 900m y se denominaron Fosa Carbó, Fosa Pesqueira, Fosa Zamora y Fosa San Pedro.
- A partir de los datos geofísicos reinterpretados y de la geología se definieron 5 unidades geohidrológicas y el desarrollo de un modelo conceptual, la unidad superior corresponde al suelo compacto (aluvión), debajo de ésta se encuentra la unidad de arenas arcillosas y subsiguientemente la unidad más importante en el acuífero se conforma por arena media-gruesa, que presenta espesores de hasta 700 m aproximadamente, posteriormente la Formación Baucarit y por último el basamento granítico.
- Se obtuvo una recarga vertical de $17.40 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y un cambio de almacenamiento de $-5.60 \text{ Hm}^3/\text{año}$, rectificando así un problema de abatimiento en la zona sur del área de estudio.
- Se determinó un bombeo de $85 \text{ Hm}^3/\text{año}$ de extracción en el área de estudio.
- Se calculó una entra de flujo subterráneo de $53.90 \text{ Hm}^3/\text{año}$.
- A partir de los parámetros hidráulicos en el área de estudio se desarrolló un modelo visual matemático con el programa visual Mod-Flow versión 4.2.
- El resultado del modelo presenta una zona de anomalía es decir una zona de abatimiento, causado principalmente por el sobrebombeo.
- Se estimó que el acuífero en su zona de abatimiento desciende a 4 m por año, considerando el bombeo de 365 días al año. No obstante muchos de los aprovechamientos censados trabajan en temporadas o ciertas horas durante el día por lo cual el valor se reduce 2 m/año como valor promedio correspondiente a la zona de abatimiento.
- Se predice el comportamiento para el año del 2015, a partir de las condiciones iniciales del 2005, donde se observa que en la parte sur del área de estudio se amplía la zona de afectación por sobre bombeo y la porción sur incrementa su deformación equipotencial hacia la porción norte y sur de área de modelación, para conformar un mayor cono de abatimiento, que podría interceptar la recarga hacia el acuífero Mesa del Seri-La Victoria.



14. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que a partir de la geometría del basamento obtenido, se realice un modelo matemático local a la altura del poblado de Zamora, realizando sondeos eléctricos. Así como definir los materiales que rellenan la fosa y determinar un modelo conceptual más preciso.
- Se debe establecer una red de monitoreo en las zonas afectadas y disminuir su bombeo de extracción e impedir más el crecimiento de la zona de abatimiento.
- Es importante realizar un cruce de información donde cada pozo tenga sus extracciones y su Piezometría de cada año con la misma clave, es decir una piezometría histórica más precisa que en un futuro nos ayude en recrear modelos de mejor calidad y más precisos.
- Es urgente llevar a cabo la reglamentación del acuífero, para definir el volumen máximo de extracción al que puede someterse ya que la realidad muestra que se está minando gravemente el almacenamiento.
- Es muy importante complementar la información obtenida por REPDA, ya que se encontraron discrepancias en cuanto a la localización de los aprovechamientos y extracciones.
- Es necesario el dato correcto de extracción o tener el dato más cercano a lo real. Tratar que todas las captaciones cuenten con un medidor de flujo o totalizador de volumen la extracción que se está haciendo en la zona de estudio.
- Es urgente verificar que los volúmenes de extracción que reporta el titular de cada pozo sea exactamente el concesionado por CONAGUA.
- Es importante realizar un programa donde se lleve un control sucesivo y un orden de monitoreo permanente para mantener la actualización hidrogeológica continua del acuífero.
- Es importante desarrollar modelos a escalas más locales y someterlos a auditorías, actualizarlo con datos de mayor calidad y darle un seguimiento continuo a la predicción.



15. REFERENCIAS CITADAS

- Ariel Construcciones, S.A.(1970). Censo de aprovechamientos hidráulicos (superficiales y subterráneos) en los valles del río Sonora, desde Mazocahui hasta Arizpe, Sonora. (para la dirección de Aguas Subterráneas, SRH).
- Ariel Construcciones, S.A. (1996). Estudio del manejo de la demanda para la estabilización y recuperación de los acuíferos de Hermosillo, Son. Y Querétaro, Qro.- Costa de Hermosillo, Son. Comis. Nal. Agua, Subdir. Gral. Téc., Ger. Aguas Subterráneas, Contrato GAS-010-PRO-96, 134pp más anexos.
- Carrera,J., and Neuman (1986). Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 2. Uniqueness. Stability, and Solution Algorithms, Water Resources Research.
- Consultores en Agua Subterránea, S.A. de C.V. (1987). "Integración Geohidrogeológica en el valle del Río Zanjón para suministro de agua en bloque a Hermosillo, Sonora"
- Colleta, Bernad, y Agelier, Jackes (1983)., Tectonique cassante du nord-ouest Mexicain et ouverture du Golfe de Californie: Bulletin Centre Reach
- C. Serna,(1988). An outline of the geology of Mexico, in Bally, A.W. and Palmer, A.R., eds., The geology of North America, an over view: Boulder Colorado, Geol. Soc. Of Am., The geology of North America, V.A.,p233-264.
- Dr. Adolfo Chávez Rodríguez, Dr. Adán Pinales Munguía, Ing. Ricardo Ducoing Castillo, Ing. José Luis Cruz José.(2006). Modelación Aplicada al Sistema de Acuíferos: Enfoques y Desarrollos en México.
- Freeze, R.A.; Cherry, J. (1976). Groundwater, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.
- Guiguer N. (2007). Curso de modelación aplicada al flujo y transporte de contaminantes, Schlumberger Water Services.
- Gomez D., (2005). Curso de modelación aplicada al flujo y transporte de contaminantes 2005 Waterloo Hydrogeologyc.
- IDEAS y Comité Técnico Administrativo (COTAS) del río Zanjón, (2007). Estudio de Actualización de la red de observación piezométrica para sustentar las bases del manejo sustentable del acuífero río Zanjón en la localidad varias, municipios varios en el Estado de Sonora.
- Guysa, (2000). Estudio de actualización geohidrológica del acuífero del valle del Río Zanjón, municipio de Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, Sonora.
- King, R.E., (1939). Geological reconnaissance the northern Sierra Madre Occidental of Mexico: Bull. Geol. Soc. Amer. v, SON, o.11 p, 1625.1722.



- Lugo-Hubo, J. y Córdova-Fernández de A.C., (1990). Morfogénesis (Mapa de la República Mexicana) Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. de Geografía, Atlas Nacional de México, Hoja geomorfología 1, No. IV. 3,3.
- Lugo-Hubp, (1990). El relieve de la República Mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Mullincan, W.F., Johns, N.D., Fryar, A.E.(1997). Playas and recharge of the Ogallala aquifer on the Southern High Plains of Texas—an examination using numerical techniques: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology.
- Poeter, E. P. and M.C. Hill. (1997). Inverse models: A necessary next step in groundwater modeling, Ground Water.
- Servicio Geológico Mexicano, (1998). Carta Geológica-Minera y Geoquímica de Hermosillo clave H12-8, Escala 1:250,000, Estado de Sonora.
- Servicio Geológico Mexicano, (2004). Carta topográfica a Escala 1: 250, 000, Hermosillo, Estado de Sonora clave H12-8.
- Universidad de Sonora, (2005). Estudio de Actualización del Estudio Geohidrológico de las Subcuencas de los ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri – La Victoria y Cuenca Bacoachito.
- Waterloo Hydrogeologic, (2006). Manual de Visual Modflow Profesional Versión 4.2 y 4.3