



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA UNIDAD TICOMAN

METODOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE UN
MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO.

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEÓLOGO
OPCIÓN: PRÁCTICAS PROFESIONALES



PRESENTA:
DIANA PEREA HERNÁNDEZ
Asesor Interno: Ing. Saúl Milán Valdez
Asesor Externo: Ing. Josué Mata González

DICIEMBRE 2017

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos".
"60 Aniversario del CECyT 14 Luis Enrique Erro".
"60 Aniversario del Patronato de Obras e Instalaciones".
"50 Aniversario de COFAA-IPN".
"30 Aniversario de la Unidad Interdisciplinaria de Biotecnología".

Años
95
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

OFICIO N° E.P. y T.102/2017

Ciudad de México, a 07 de abril de 2017

C. DIANA PEREA HERNÁNDEZ
PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO
DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
PRESENTE.

A continuación comunico a usted, el tema del trabajo que deberá desarrollar para su examen profesional, por la opción de **PRÁCTICAS PROFESIONALES:**

**"METODOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL
HIDROGEOLÓGICO"**

Hago de su conocimiento que tiene seis meses a partir de esta fecha para desarrollarlo, de acuerdo al reglamento de Titulación del I.P.N.

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico



**UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**

FRCH/*vcg

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional



Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos".
"60 Aniversario del CECyT 14 Luis Enrique Erro".
"60 Aniversario del Patronato de Obras e Instalaciones".
"50 Aniversario de COFAA-IPN".
"30 Aniversario de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología".

Años
95
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

Ciudad de México, a 6 de junio de 2017.

ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
P R E S E N T E

Por este conducto, hacemos constar que el Tema de Tesis Profesional, por la opción de **Prácticas Profesionales "Metodología para la Definición de un Modelo Conceptual Hidrogeológico"** presentado por la pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geológica**, C. **DIANA PEREA HERNÁNDEZ**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES


M. en C. CARLOS TEJEDA GALICIA


ING. SAÚL MILÁN VALDÉS


ING. JOSÉ GONZÁLEZ MILLÁN


ING. MARIANA OLVERA BADILLO


M. en C. ELISEO VAZQUEZ SANCHEZ



OFICIO N° E.P. y T.358/2016

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2016.

M. en C. CARLOS MANUEL TEJEDA GALICIA
ING. SAÚL MILÁN VALDÉS
ING. JOSÉ GONZÁLEZ MILLÁN
ING. MARIANA OLVERA BADILLO
M. en C. ELISEO VÁZQUEZ SÁNCHEZ
PRESENTE.

Con relación a la solicitud de titulación de la C. **DIANA PEREA HERNÁNDEZ**, pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geológica**, por la opción de **PRÁCTICAS PROFESIONALES** y conforme al artículo No. 15 del Reglamento de Titulación Profesional, solicito a ustedes se sirvan asesorarla con respecto al informe escrito que deberá desarrollar; del cual posteriormente hará una exposición oral como examen profesional.

Dicho informe será sancionado previamente por la academia correspondiente, y en su caso aprobado por la Subdirección Académica.

Cabe señalar que el informe escrito deberá ser entregado, en esta oficina en un plazo no mayor a seis meses a partir de la fecha del presente.

ATENTAMENTE

“La Técnica al Servicio de la Patria”


Ing. Saúl Milán Valdés
Subdirector Académico
Interino



C.c.p.- Ing. René Alejandro Téllez Flores.- Jefe del Departamento de Formación Integral e Institucional
c.c.p.- Interesada
Expediente

UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

SMV*mdv

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán



8&C
AÑOS IPN

OFICIO N° E.P. y T.357/2016

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2016.

ING. JOSUÉ MATA GONZÁLEZ
ESPECIALISTA EN GEOHIDROLOGÍA
SUBGERENCIA DE ESTUDIOS GEOHIDROLÓGICOS
COMISIÓN FEDERAL DE ELÉCTRICIDAD
PRESENTE.

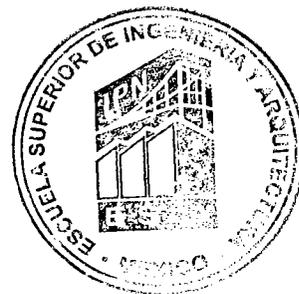
En atención a la Solicitud de la C. **DIANA PEREA HERNÁNDEZ** pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geológica** y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional que por la opción de Prácticas Profesionales, deberá desarrollar la interesada, por lo que solicito a usted, se sirva proponer a esta Subdirección el Tema.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“La Técnica al Servicio de la Patria”


Ing. Saúl Milán Valdés
Subdirector Académico
Interino



UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

SMV*mdv.

Agradecimientos.

A la Comisión Federal de Electricidad por darme la oportunidad de presentar este trabajo y al Ing. Francisco Gama Martínez.

Al Ing. Saúl Milán porque a lo largo de mi estancia en esta escuela me brindo los conocimientos necesarios en el área de Geohidrología y por su apoyo en la elaboración de este trabajo.

Al **Instituto Politécnico Nacional** y de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán, por la formación profesional adquirida en esta etapa y Por permitirme ser parte de esta gran institución.

Al Ing. René Téllez, por el apoyo total desde el inicio de la carrera, por sus consejos y su asesoría.

A los profesores Ing. José González, M. en C. Carlos Tejeda, Ing. Mariana Olvera y al M. en C. Eliseo Vázquez por sus observaciones y contribuciones para la realización de este trabajo.

Dedicatoria

A mis padres José Guadalupe y Sofía.

A mi hermano Fernando.

A mi hijo Daniel.

La Piedra

El distraído tropezó con ella.
El violento la utilizó como proyectil.
El emprendedor construyó, con ella.
El campesino cansado la utilizó como asiento.
Para los niños fue un juguete.
David mató a Goliat y
Miguel Ángel le sacó la más bella escultura.
En todos los casos,
la diferencia no estuvo en la piedra,
sino en el hombre.
No existe piedra en tu camino que no puedas
aprovechar para tu propio crecimiento.

ÍNDICE

1) Resumen.....	1
2) Abstract.....	2
3) Introducción.	3
3.1 Objetivo.	3
3.3 Marco Conceptual.	4
3.4 Localización.	6
4) Metodología.	8
4.1 Recopilación, depuración y análisis de la información bibliográfica del área de estudio.....	8
4.2 Geología.....	9
4.3 Estudio Geofísico.....	9
4.4 Piezometría.....	11
4.4.1 Censo de aprovechamientos Hidráulicos.	11
4.5 Pruebas hidráulicas.	12
4.6 Definición del Modelo Hidrogeológico Conceptual.	14
5) Resultados:	14
5.1 Generalidades del área de estudio.	14
5.1.1 Hidrología Superficial.....	14
5.1.2 Hidrología Subterránea.....	16
5.1.3 Análisis Climatológico.	17
5.2 Geología.....	20
5.3 Correlación geológica-geofísica.....	25
5.4 Comportamiento hidráulico.	32
5.4.1 Censo de aprovechamientos hidráulicos.....	32
5.4.2 Mediciones del nivel piezométrico.....	36
5.5 Pruebas Hidráulicas.....	41
6) Conclusiones: Modelo Conceptual Hidrogeológico.....	44
7) Trabajos citados.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Localización y vías de comunicación del área de estudio.....	5
Figura 2: Metodología empleada para la definición de un modelo conceptual geohidrológico.	8
Figura 3: Arreglo tipo Schlumberger (Tomado de Auge, 2008)	10
Figura 4: Recta de recuperación.	13
Figura 5: Hidrología Superficial del área de estudio	15
Figura 6: Geología general del acuífero Cotaxtla (CONAGUA, 2015).	17
Figura 7: Datos climatológicos del área de estudio.	18
Figura 8: Hidrograma representativo del acuífero, período enero 2010 - diciembre 2014.....	20
Figura 9: Provincia Fisiográfica del área de estudio. (Tomado de Provincias fisiográficas 2003).....	21
Figura 10: Columna estratigráfica del área de estudio.	22
Figura 11: Mapa geológico del área de estudio.....	24
Figura 12: Sección Geológica A-A`	25
Figura 13: Corte Litológico del pozo 1.....	26
Figura 14: Corte litológico del pozo 3.	27
Figura 15: Localización de las secciones geofísicas.	28
Figura 16: Sección geoeléctrica A-A'.....	29
Figura 17: Sección Geoeléctrica I –I'.....	30
Figura 18: Sección Geoeléctrica C –C'.....	31
Figura 19: Localización de los pozos y norias.	32
Figura 20: Aprovechamientos Hidráulicos N82 Y N29.....	33
Figura 21: Configuración de la elevación del nivel estático del año 1997.	37
Figura 22: Configuración de la elevación del nivel estático del año 2008.	38
Figura 23 : Configuración de la elevación del nivel estático del año 2014.....	39
Figura 24: Hidrograma representativo del sistema acuífero del área de estudio, período enero 2010-dicimebre 2014.	40
Figura 25: Cálculo de “T” .Recta de recuperación del pozo 1.....	42
Figura 26: Cálculo de “T” .Recta de recuperación del pozo 3.....	43
Figura 27: Modelo Conceptual Hidrogeológico de la Central de Ciclo Combinado Dos Bocas, Veracruz.	47

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Vértices del polígono que delimitan el área de estudio.....	6
Tabla 2 : Ubicación de la estación climatológica El Tejar.	18
Tabla 3:Resumen de los aprovechamientos hidráulicos censados.....	34
Tabla 4:Resumen de los aprovechamientos hidráulicos censados.....	35
Tabla 5:Datos de la recuperación del pozo 1.	41
Tabla 6: Datos de la recuperación del pozo 3.	43

1) Resumen.

Con el objeto de proporcionar un marco de referencia para realizar un estudio hidrogeológico a detalle y definir el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero que explota la Central Termoeléctrica de ciclo combinado (CCDB) ,se realizaron una serie de actividades, las cuales iniciaron con la recopilación de información técnica del área de estudio, posteriormente el trabajo en campo que abarco el reconocimiento geológico, el censo de aprovechamientos hidráulicos, la medición del nivel del agua subterránea ,que ayudo en el análisis del comportamiento hidrodinámico del agua subterránea y la ejecución de Sondeos Eléctricos verticales ,que junto los datos geológicos proporcione valiosa información sobre las unidades hidrogeológicas y la intrusión marina.

Resultando así de esta serie de actividades el modelo conceptual hidrogeológico del área de estudio, en el que se diferenciaron 3 unidades, conformadas arenas, gravas y arcillas. Y debido a la constitución de estos materiales, se considera que todos ellos funcionan como un solo acuífero costero de tipo libre.

La recarga del acuífero tiene como principal componente la precipitación y en menor proporción ocurre la recarga horizontal proveniente del Oeste donde se ubica la parte más alta del área.

La profundidad del agua subterránea se encontró a 6 metros, por lo que una de las principales salidas de este sistema acuífero es por medio de la evapotranspiración, las otras salidas de agua dulce ocurren a través de la extracción por medio de pozos y norias y la descarga subterránea hacia el Golfo de México. El acuífero se encuentra afectado por intrusión marina hacia el noroeste de la planta en dirección Boca del Río.

2) Abstract.

In order to provide a framework for hydrogeological study and hydrogeological conceptual model of the aquifer that exploit the thermoelectric power plant Dos Bocas (CCDB), a series of activities were carried out, which began with the compilation of technical information of the study area, later the workfield that included the reconnaissance geologic, hydrocensus, groundwater level measurement, that helped in the analysis of the hydrodynamic behavior of groundwater and the execution of vertical electrical soundings of the Schlumberger configuration, that together the geological data provide valuable information on the hydrogeological units and marine intrusion.

As a result of this series of activities the hydrogeological conceptual model of the study area, which describes 3 units, made up of sands, gravel and clays and due to the constitution of these materials, it is considered that all of them function as coastal unconfined aquifer.

The main component of the recharge of the aquifer is a precipitation and in smaller proportion it happens the originating horizontal recharge of the West where the highest part of the area is located.

The depth of the groundwater was found to 6 meters, so that one of the main outputs of this aquifer system is through evapotranspiration, the other outputs of groundwater occurs through pumping well and norias and groundwater discharge to Gulf of Mexico. The aquifer is affected by marine intrusion towards the northwest of the plant towards Boca Del Río.

3) Introducción.

El agua dulce no contaminada es un recurso escaso y por tanto debe gestionarse de modo adecuado para satisfacer la demanda global y realizar una correcta planificación integral de los recursos hídricos. Una gestión correcta implica un sistema de contabilidad que reproduzca la situación existente y permita cuantificar el efecto de los distintos escenarios de gestión sobre la cantidad y calidad de los recursos. Esta necesidad de cuantificación hace indispensables los modelos conceptuales hidrogeológicos para una correcta gestión de los recursos hídricos.

El propósito general de un modelo conceptual es simplificar el problema comenzando por examinar y organizar los datos del sistema que puede ser analizado. La simplificación es necesaria, ya que una detallada reconstrucción del sistema es muy complicada. (Martínez Santos et al, 2010)

En este caso, un modelo conceptual hidrogeológico es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea, frecuentemente representada en forma de bloque diagramático o sección (Bentacour, Palacio, & Escobar, 2012) ,incluye los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica, su geometría, las áreas de recarga y descarga ,profundidad del nivel freático y/o piezométrico, las direcciones del flujo y la distribución en superficie de las unidades hidrogeológicas.

Por lo tanto, un modelo es un paso importante durante el desarrollo e implementación de esquemas de planeación y aprovechamiento óptimo de recursos hídricos, ya que proporciona las bases para entender cómo funciona el sistema y los procesos que operan.

La calidad de este depende de la calidad de la información recopilada, analizada, el trabajo en campo y la disponibilidad de los recursos financieros. Es importante mencionar que un modelo no reproduce la realidad, sólo permite realizar estimaciones o análisis comparativos de posibles comportamientos.

3.1 Objetivo.

- A partir de información previa construir el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero que explota la Central de Ciclo Combinado Dos Bocas, Veracruz (CCCDB).
- Demostrar que siguiendo esta metodología se puede realizar una aproximación para la descripción y conocimiento acerca del funcionamiento de un sistema de flujo de agua subterránea en un área determinada.

3.2 Antecedentes. Marco Teórico.

El área en donde se empleó esta metodología fue en el acuífero que explota la central termoeléctrica de Ciclo Combinado Dos Bocas (CCC DB) que se ubica en el Municipio de Medellín, estado de Veracruz.

Inició operaciones en el año de 1974 como Termoeléctrica de ciclo convencional posteriormente se convirtió a Ciclo Combinado.

La CCC DB con una capacidad instalada de 400 MW y consta de dos paquetes o plantas de ciclo independientes entre sí (marca Westinghouse), cada uno compuesto por dos turbinas de gas, dos recuperadores de calor y una turbina de vapor.

Se le denomina ciclo combinado debido a que utiliza gas natural, o diésel o incluso carbón preparado como combustible para alimentar una turbina de gas, luego los gases de escape de la turbina de aun tienen una elevada temperatura y se utilizan para producir vapor que mueve una segunda turbina, esta vez de vapor. Cada una de estas turbinas está acoplada a su correspondiente alternador para generar la electricidad como en una central termoeléctrica convencional.

Para satisfacer las necesidades de agua la central requiere tanto de agua superficial como de agua subterránea. Para el sistema de enfriamiento utiliza agua salobre proveniente del río Jamapa que es captada a través de una toma ubicada en su margen izquierda y posteriormente retorna al mismo por un canal que drena al norte. El agua utilizada para la reposición del ciclo y de servicios generales se obtiene subterráneamente de dos pozos, propiedad de la central.

Los estudios previos que se realizaron en el acuífero que explota la central fueron los siguientes:

CFE 1992, realizó un estudio geohidrológico para la CCC DB, con la finalidad de proponer sitios para perforar pozos profundos, y extraer agua subterránea de buena calidad, ya que presentaba una alta concentración de hierro.

A partir del año 1995 y hasta el 2014 la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) ha realizado campañas piezométricas, monitoreo de la calidad del agua a través del análisis de parámetros Físico-Químicos, registros del volumen de explotación en los pozos de la propiedad de la central CCC DB.

3.3 Marco Conceptual.

El proceso de desarrollo de un modelo numérico requiere una planificación cuidadosa. Y conlleva una serie de etapas previas su construcción, las cuales se explican de manera general a continuación.

a) Definición del Modelo

Modelo Conceptual: Es el primer paso y el más importante. En él debe quedar reflejada la idea que tenemos del funcionamiento del acuífero a la vista de los datos disponibles, que condicionaran, a su vez, el tipo y nivel de detalle del modelo.

En esta etapa se integra los resultados de cada actividad (información geológica, del análisis de información del área de estudio, inventario de aprovechamientos, monitoreo de niveles estáticos, pruebas hidráulicas, integración geológica-geofísica).

La definición del modelo conceptual debe contemplar los siguientes puntos:

- Litología: Unidad(es) geológica(s) que lo constituye(n), composición litológica, tipo y origen de su permeabilidad.
- Geometría de cada unidad hidrológica, Distribución, extensión y espesor.
- Términos del balance general del acuífero (recarga y descarga, dirección del flujo)
- Identificación espesor de la zona saturada y no saturada, interacciones entre los diferentes horizontes acuíferos.
- Características hidráulicas de la unidad, grado de permeabilidad, potencial hidráulico basado en las evidencias encontradas en campo y relaciones hidráulicas con otras unidades, funcionamiento hidráulico de las distintas unidades (confinado, semiconfinado, libre)

Una vez ejecutado el modelo y comparado con la realidad, algunas de estas ideas tendrán que ser cambiadas o modificadas para ajustarlas a la realidad de los datos.

b) Definición general del posible modelo.

Esta etapa incluiría: 1) Análisis de objetivos; 2) datos disponibles y posibilidad de obtener nuevos datos; 3) Necesidad de un modelo y grado de complejidad del modelo a utilizar; 4) Elección del tipo de modelo y programa de cálculo necesario.

c) Discretización

Definición del grado de finura de la malla y de la resolución en el tiempo, que será función del nivel de precisión deseado, de los datos disponibles y de la geometría del sistema, así como de los objetivos asignados al modelo. La misma también tendrá que tener en cuenta las condiciones de contorno existentes.

d) Condiciones de contorno.

Los bordes del modelo deberán definirse basándose en los datos de geometría existentes. La resolución de la ecuación diferencial exige el conocimiento de las condiciones de contorno existentes en todo el contorno y a lo largo de todo el período simulado. Esta limitación puede obligar a modificar los límites iniciales, si no se conocen con suficiente detalle en las mismas. Los principales tipos son:

a) Potencial hidráulico b) Caudal, cuyo caso es más simple que el borde impermeable, cuando ese caudal es nulo.

c) Una relación entre caudal que atraviesa el contorno y el potencial en el acuífero.

e) Acciones externas a incluir

Correspondería a la fijación de los principales fenómenos que actúan sobre el acuífero y condicionan su funcionamiento, como: recarga distribuida procedente de la lluvia, evapotranspiración, bombeos, drenaje hacia ríos o recarga inducida de los mismo, descargas procedentes de manantiales, drenajes, agrícolas, etc.

Utilidad de los Modelos

- Evaluación regional del recurso agua subterránea-superficial.
- Predicción de efectos de posibles abatimientos.

- Delimitación de zonas de captura.
- Diseño de redes de monitoreo.
- Rastreo de posibles contaminantes.
- Evaluación de riesgo de contaminación.
- Reglamentación del recurso.
- Evaluar problemas geotécnicos.
- Gestión y ordenamiento de cuencas.

3.4 Localización.

El área de estudio se localiza en la parte centro del Estado de Veracruz, en el Municipio de Medellín de Bravo, (figura1) limita al Este con el Golfo de México y al Suroeste con la localidad el Tejar y al Noroeste con el Fraccionamiento Puente Moreno y se encuentra dentro del polígono formado por las siguientes coordenadas (Tabla 1).

Coordenadas UTM (m)		
vértice	x	y
a)	796000	2160000
b)	804000	2160000
c)	796000	2110000
d)	804000	2110000

Tabla 1: Vértices del polígono que delimitan el área de estudio.

Vías de comunicación

El principal acceso al área de estudio (figura 1) es la carretera federal 150D Córdoba-Veracruz, que conduce la carretera municipal Veracruz – Medellín la cual entronca a la altura del kilómetro 6+500 con camino vecinal que lleva directo a la CCC DB.

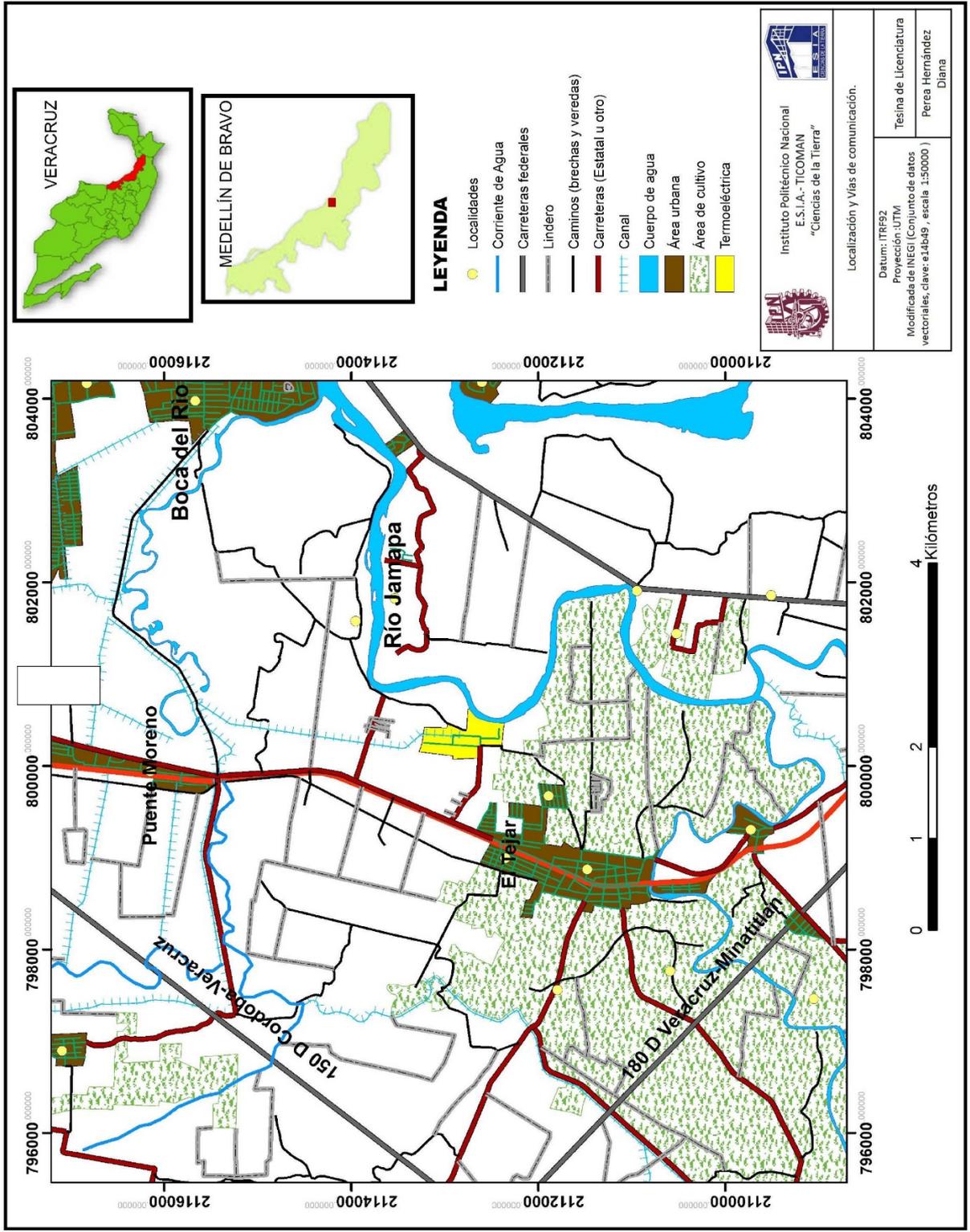


Figura 1: Localización y vías de comunicación del área de estudio.

4) Metodología.

Para realizar el estudio geohidrológico y definir un modelo conceptual hidrogeológico de una zona de estudio se plantearon una serie actividades que a continuación se describen (figura 2).

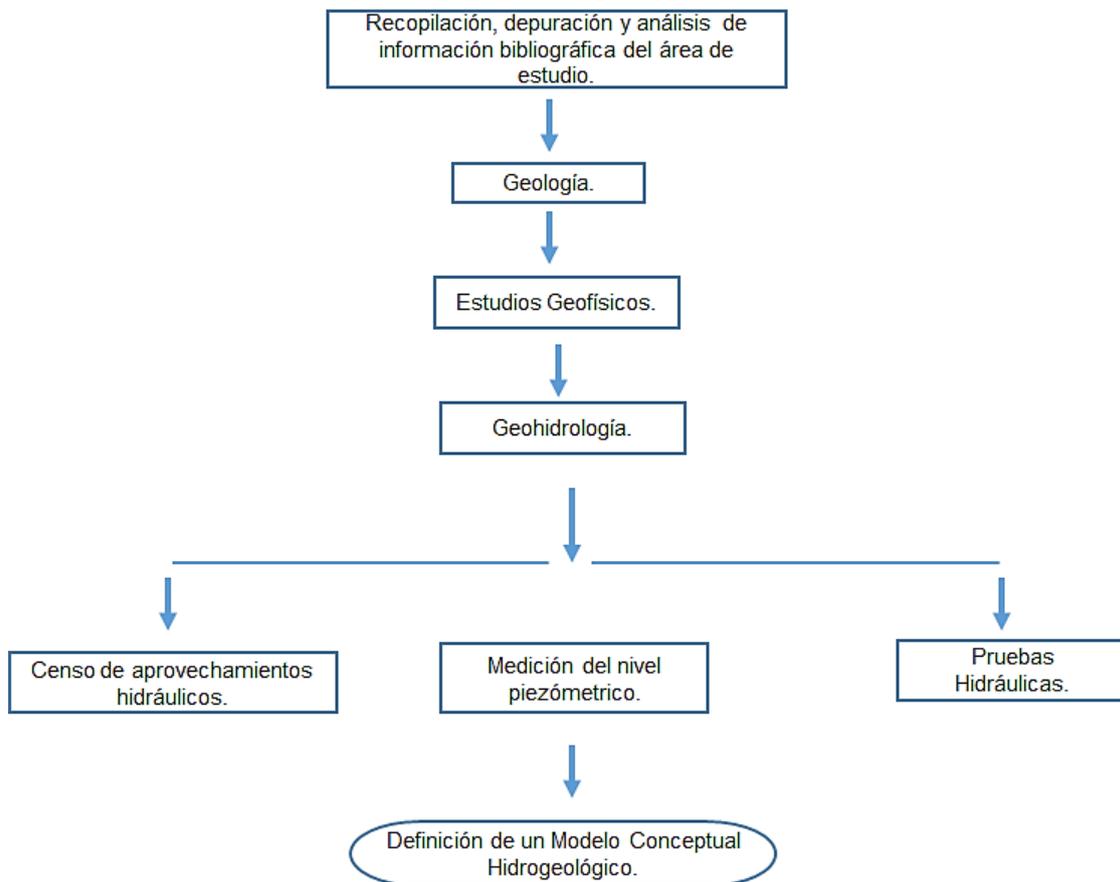


Figura 2: Metodología empleada para la definición de un modelo conceptual geohidrológico.

4.1 Recopilación, depuración y análisis de la información bibliográfica del área de estudio.

Como primer paso (Figura 2) se identificó la ubicación geográfica del área de interés en cartografía INEGI escala 1:50000 y en la cartografía del Servicio Geológico Mexicano (SGM) escala 1:250000 y posteriormente se llevó a cabo la recopilación de la siguiente información.

- Climatológica: Recopilación de datos climatológicos como precipitación, evaporación, temperatura, evapotranspiración, entre otros.
- Hidrológica y Geohidrológica: tipo de cuenca, densidad de drenaje, aprovechamientos hidráulicos con su respectiva ubicación, características constructivas de los pozos y características hidráulicas de las rocas.
- Topográfica: Planos topográficos y Modelos digitales de elevación.

- Geológica: estratigrafía local y regional, unidades geológicas, principales estructuras (fallas, fracturas, discordancias, pliegues).
- Geofísica: ubicación de los SEV realizados con anterioridad y sus resultados (si es que existe información).

Estos datos se recopilaron en organismos públicos, dependencias gubernamentales, como son el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Universidades.

La información se analizó y clasificó de acuerdo al objetivo de trabajo, grado de detalle, fecha de edición y confiabilidad estimada para obtener un marco de referencia del área de interés y ayudar a generar tablas, secciones y mapas.

4.2 Geología

Posterior al análisis de la información procesada en gabinete, personal del departamento de geología efectuó un recorrido en campo para cubrir uniformemente el área y con el fin de verificar la información geológica procesada anteriormente por medio de fotointerpretación y de cartografía existente.

Durante el recorrido en campo se verificó el tipo de materiales litológicos que conforman el área de estudio.

Para fines de esta investigación a partir de la información generada por personal del departamento de Geología, se observaron detalles como indicios del flujo de agua a través de ellos (como la presencia de norias o manantiales) y se estimó de forma cualitativa su permeabilidad.

Después se identificó la presencia de estructuras geológicas que pudieran afectar el flujo de agua subterránea, como pueden ser contactos litológicos, planos de estratificación, fracturas, fallas, discordancias cavernas, alteraciones en la roca o plegamientos.

Con esta actividad se obtuvo el modelo geológico, el cual permitió conocer las características del subsuelo, la correlación con otros tipos de rocas y su arreglo estructural, lo que dio un mayor panorama del funcionamiento hidrodinámico del acuífero en estudio.

4.3 Estudio Geofísico.

La geofísica es una ciencia que permite conocer las características litológicas en el subsuelo mediante distintos métodos indirectos. Los métodos geofísicos más empleados en Hidrogeología son los geoelectrónicos y estos se basan en la inyección artificial de una corriente eléctrica (sondeos eléctricos verticales SEV's) y calicatas eléctricas (CE); y de menor utilidad son la polarización inducida (PI) y el potencial espontáneo (PE), este último basado en la medición de campos eléctricos naturales.

Con la finalidad de definir el marco geológico-geohidrológico del subsuelo se utilizó el método geoelectrico de sondeos eléctricos verticales (SEV's). Este método consiste en inyectar corriente eléctrica al subsuelo y medir la diferencia de potencial que se genera de esta forma y basados en la ley de Ohm, calcular la resistividad aparente del medio. El instrumento con el que se realiza las mediciones se denomina transmisor o resistivímetro (figura 3), y está conformado principalmente por dos electrodos de corriente (A y B), dos electrodos de potencial (M y N) y una fuente de energía.

Para este caso se utilizó el arreglo tetraelectrónico Schlumberger, que consiste en mover los electrodos de corriente (A y B), mientras que los electrodos de potencial se mantienen fijos hasta que la diferencia de potencial sea muy baja, entonces se mueven los electrodos (M y N), pero teniendo cuidado en respetar la siguiente condición $AB \geq 5MN$.

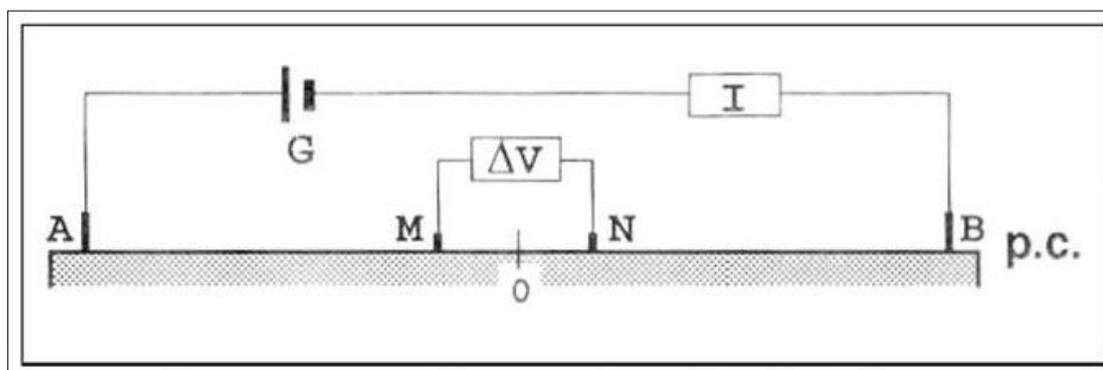


Figura 3: Arreglo tipo Schlumberger (Tomado de Auge, 2008)

El número de líneas de los SEV's, pueden ser tantas como sean posibles, pero se recomiendan como mínimo 3 líneas para correlacionarlas y tener un modelo más completo. Por lo tanto, en este caso, con base en la información recopilada y el recorrido en campo se realizaron un total de 33 sondeos eléctricos verticales (SEV's) y se alcanzó una profundidad máxima de investigación de 130 m.

Para la interpretación de estos sondeos, personal especializado procesó los datos duros, mediante métodos geofísicos arrojando valores los valores de resistividad de cada uno de los materiales que conforman el subsuelo.

Y para fines de este trabajo de investigación, se interpretaron estos valores de resistividad, agrupándolos en diferentes unidades geoelectricas en el subsuelo y con base en la información geológica obtenida anteriormente se relacionaron con unidades litológicas y su posible comportamiento hidrogeológico.

4.4 Piezometría

4.4.1 Censo de aprovechamientos Hidráulicos.

Esta actividad se realizó con el fin de recabar información que permita cuantificar el volumen del agua subterránea que se extrae en la zona, su uso y distribución espacial, así como las características físicas de las obras hidráulicas que explotan el sistema acuífero.

Como primer paso se planteó en gabinete el recorrido de campo de acuerdo a las características de accesibilidad y del posible conocimiento a "priori" de la densidad de obras en la zona de interés.

Posteriormente en un sitio claramente visible de la obra hidráulica, se colocó pintura con alguna clave que le corresponda a la obra y cada una se identificó por un número consecutivo.

En cada uno de las obras hidráulicas se obtuvieron los siguientes datos:

- Localización de la obra referenciada a coordenadas UTM.
- Características de la obra (diámetro del ademe, altura del brocal o altura de la medición con respecto al nivel del terreno).
- Uso del agua.
- Parámetros físicos del agua.

Los resultados obtenidos fueron recopilados en tablas y posteriormente se ubicaron en un mapa topográfico cada una de las obras censadas.

Es importante mencionar que, en cada aprovechamiento censado de campo, se contactó con el usuario o propietario, para informarle en términos generales el objetivo del censo y solicitarle su autorización para ingresar al interior de sus instalaciones.

4.4.2 Medición del Nivel Piezométrico.

Esta actividad consistió en la medición de profundidad del nivel estático y dinámico de cada aprovechamiento hidráulico anteriormente seleccionado y con base en estos datos auxiliarse para establecer una hipótesis del movimiento del agua en el subsuelo, así como la evolución del nivel estático con respecto al tiempo.

Para esta actividad una vez que se llegó al aprovechamiento se procedió de la siguiente manera:

Antes de comenzar las mediciones, en cada pozo se nivelaron topográficamente los brocales a fin de contar con un nivel de referencia para determinar correctamente la dirección de flujo subterráneo.

Posteriormente se verificó el funcionamiento de la sonda. Una vez corroborado esto se anotó si cercano a la obra a medir existían otras obras en operación y la distancia aproximada a la cual se ubicaban.

Después se identificó sobre la obra un punto de referencia de medición (en este caso el brocal), se introdujo la sonda lentamente, para que por gravedad llegara hasta el nivel piezométrico y así cierre el circuito eléctrico de la sonda; al ocurrir lo anterior, se verificó por lo menos dos veces más este punto mediante un movimiento de ascenso y descenso del cable de la sonda.

Una vez que se registró el nivel de agua, se marcó el cable en la boca del pozo y se midió la longitud hasta el electrodo con una cinta métrica. A continuación, se verificó el número de aprovechamiento y fecha en la que fue tomada la lectura.

Finalmente, de los datos obtenidos en campo se analizaron y elaboraron planos de elevación del nivel estático, tomando en cuenta también las características constructivas de cada piezómetro.

Es importante mencionar que, es esencial que las medidas a realizar en los distintos puntos de observación sean “simultáneas”, entendiendo por tales a aquéllas que se realizan dentro de un período de tiempo tan corto que no se registren variaciones debidas a recargas o fuertes bombeos.

4.5 Pruebas hidráulicas.

Las pruebas de bombeo consisten en operar un pozo de régimen variable, midiendo a diferentes intervalos de tiempo, la descarga del pozo de bombeo y el abatimiento (o la recuperación) del nivel de agua ocurrido en el pozo de bombeo y en piezómetros y/o pozos de observación localizados a distancias conocidas.

Una prueba de bombeo tiene principalmente dos objetivos. El primero es determinar las características hidráulicas del acuífero y el segundo es proporcionar la información necesaria para determinar la relación caudal-abatimiento y seleccionar el equipo de bombeo y profundidad adecuada de instalación.

A partir del comportamiento en el abatimiento de los niveles de agua, la distancia entre los pozos de observación, el pozo de bombeo y el caudal de bombeo, se pueden determinar las propiedades hidráulicas del acuífero, como son: la conductividad hidráulica (K), el coeficiente de almacenamiento (S), la transmisividad (T) y confirmar el tipo de respuesta del acuífero con lo que se puede afirmar de qué acuífero se trata por medio de interpretación de gráficas.

En este caso se reinterpretaron los datos de dos pruebas de bombeo realizadas en la zona de estudio para obtener los parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica (K), y transmisividad (T).

Para la reinterpretación de los datos provistos por la prueba de bombeo se utilizó el método de recuperación, que consiste en efectuar las interpretaciones del ensayo con base en los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial del agua. Este método se basa en el análisis de la recuperación o evolución del ascenso de niveles posterior a la parada.

En el análisis de los datos primero se generó un gráfico semilogarítmico (figura 4) con los valores de la recuperación en escala métrica, en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisas los valores de cada $(t + t')$ / t' en escala logarítmica. Posteriormente se ajustó una recta a los puntos obtenidos y de esta recta se calculó su pendiente que corresponde con la caída del descenso en un ciclo logarítmico de la gráfica (Δd).

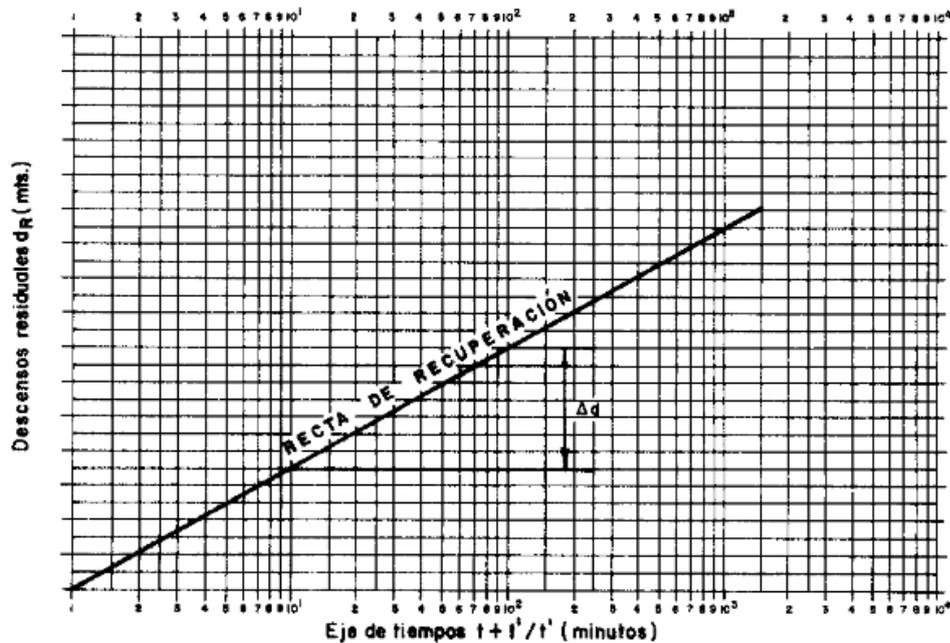


Figura 4: Recta de recuperación.

De manera que a partir de este gráfico puede calcularse la transmisividad (T) y posteriormente la conductividad hidráulica (K) del acuífero por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{t+t'}{t}$$

Donde:

t = tiempo que duró el bombeo real (min).

t' = tiempo que ha transcurrido desde que se paró el bombeo (min).

$$T = 0.183 * \frac{Q}{\Delta d}$$

Donde:

T = transmisividad ($m^2/día$).

Q = caudal de bombeo constante ($m^3/día$).

Δd = la caída por ciclo logarítmico (m).

0.183 = constante.

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

Donde:

K = conductividad hidráulica (m/d).

b = espesor del acuífero (m).

Cabe mencionarse que con la interpretación de la recuperación se obtienen valores más precisos de la transmisividad del acuífero.

4.6 Definición del Modelo Hidrogeológico Conceptual.

Un modelo conceptual es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea, frecuentemente representada en forma de bloque diagramático o sección (Bentacour, Palacio, & Escobar, 2012). El modelo conceptual incluye los parámetros hidráulicos de cada unidad, la posición del nivel freático y piezométrico, las direcciones de flujo, las áreas de recarga.

En esta etapa se integró y proceso cada uno de los resultados de las actividades descritas anteriormente (información geológica, del análisis de información del área de estudio, inventario de aprovechamientos, monitoreo de niveles estáticos, pruebas hidráulicas). A través de la información recabada en campo, se identificaron *in situ*, las distintas unidades litológicas que afloran en la zona, se estimó cuantitativamente su permeabilidad, su área de afloramiento y su posición estratigráfica.

Con los datos de campo se realizaron las adecuaciones necesarias para la clasificación de los materiales que conforman el área de estudio, lo que permitió entender cómo funciona el sistema acuífero y los procesos que operan en él.

La definición del modelo conceptual contemplo los siguientes puntos:

- Litología: Unidad(es) geológica(s) que lo constituye(n), composición litológica, tipo y origen de su permeabilidad.
- Geometría de cada unidad hidrológica, Distribución, extensión y espesor.
- Definición de las áreas de recarga y descarga, dirección del flujo.
- Identificación espesor de la zona saturada y no saturada, interacciones entre los diferentes horizontes acuíferos.
- Características hidráulicas de la unidad, grado de permeabilidad, potencial hidráulico basado en las evidencias encontradas en campo y relaciones hidráulicas con otras unidades.

A partir de estos resultados se generaron secciones, mapas y bloques diagramáticos mostrando la distribución de las unidades hidrogeológicas, así como los puntos en donde se obtuvo la información.

5) Resultados:

5.1 Generalidades del área de estudio.

5.1.1 Hidrología Superficial.

Por sus características hidrológicas y en función de los límites de cuencas hidrológicas establecidas por la comisión Nacional del Agua, en la costa veracruzana se delimitan cuatro regiones Hidrológicas de norte a sur: RH-26 Pánuco, RH-27 Norte de Veracruz o Tuxpan-Nautla, RH-28 Papaloapan, RH-29 Coatzacoalcos (Salas, 2001).

El área de estudio se ubica en la Región Hidrológica – 28 Papaloapan, en la cuenca del Río Jamapa-Cotaxtla (Figura 5), específicamente en la Subcuenca Río Jamapa, limitando al norte con la Subcuenca San Francisco-Puerto de Veracruz y al sur con la Subcuenca Río Atoyac.

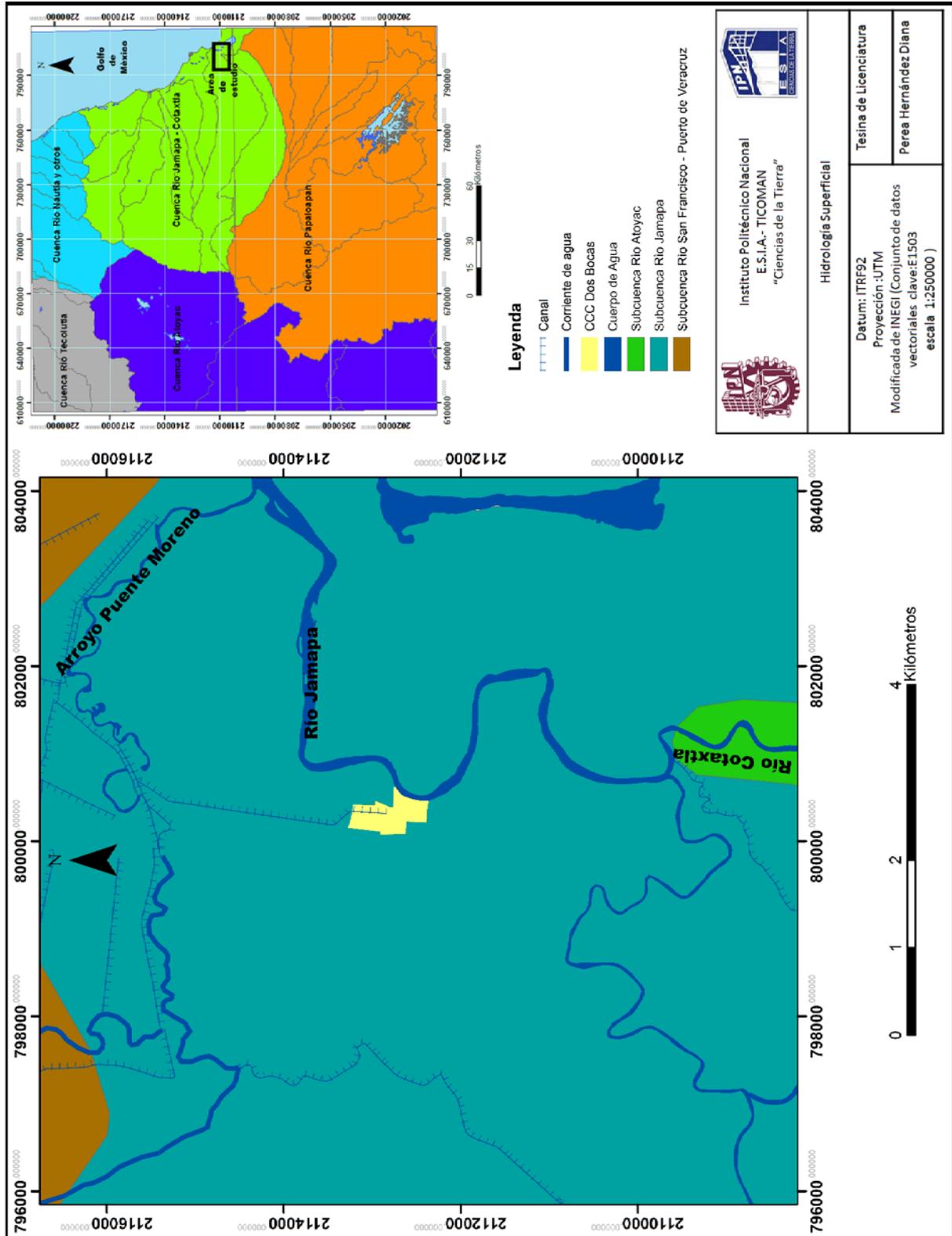


Figura 5: Hidrología Superficial del área de estudio

confluencia se conocen con los nombres de río Cotaxtla y Jamapa. El río Jamapa, escurrimiento del cual toma el nombre la subcuenca, nace en las faldas del Pico de Orizaba con la denominación de río Pantepec.

La red hidrológica del área está integrada principalmente por el Río Jamapa, que cruza el área en una dirección sur –norte y a la altura de la población de Playa de Vacas, experimenta una deflexión hacia el Oeste para desembocar en el golfo de México.

En segundo orden y al norte de la central se ubica el Arroyo Puente Moreno que corre en una dirección Este-Oeste y desemboca en el Río Jamapa a la altura de la población de Boca del Río. El patrón de drenaje regional es de tipo semiparalelo, orientado Este-Oeste.

En la zona de depositación de materiales fluvio-aluviales, la densidad de drenaje tiende a disminuir, formando zonas bajas inundables con formación de lagunas intermitentes o zonas pantanosas durante la época de lluvias, en tanto que la zona litoral presenta características semejantes a las zonas anteriores, sólo que existe una interacción con los procesos litorales con mayor número de zonas de inundación y presencia de sistema de dunas, con un drenaje incipiente y elevaciones bajas.

5.1.2 Hidrología Subterránea.

El área de estudio se encuentra dentro del acuífero Cotaxtla, que limita al norte con el acuífero Costero de Veracruz, al Oeste con Libres Oriental, al sur con los denominados Orizaba-Córdoba, Olmeca-Huixcolotla y al Este con el Golfo de México.

A cerca de la situación administrativa del acuífero, el territorio que abarca el área de estudio, se encuentra sujeto al decreto de veda tipo III, la cual solo permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros (CONAGUA, 2015).

De acuerdo con la información geológica del subsuelo en el acuífero Cotaxtla, está conformado en la parte superior, por los depósitos granulares heterogéneos, eólicos, vulcanosedimentarios y conglomerados que rellenan los valles, en tanto que la parte inferior está conformada por rocas volcánicas y calizas, cuando presentan fracturamiento y disolución que en conjunto constituyen un sistema de tipo libre, con confinamiento en algunas zonas debido a la presencia de lentes sedimentos arcillosos. El predominio de sedimentos granulares y conglomerados de granulometría media, le confieren permeabilidad media a alta, al acuífero (figura 6).

Las rocas volcánicas sin fracturamiento y depósitos arcillosos del Terciario, conforman el basamento del acuífero que actualmente se explota. El espesor de los depósitos granulares puede alcanzar los 200 metros, actualmente es la unidad que se encuentra en explotación.

Los sedimentos eólicos presentan un flujo horizontal subterráneo hacia la laguna Mandinga y hacia el mar. Su espesor promedio es de 30 metros (CONAGUA, 2009).

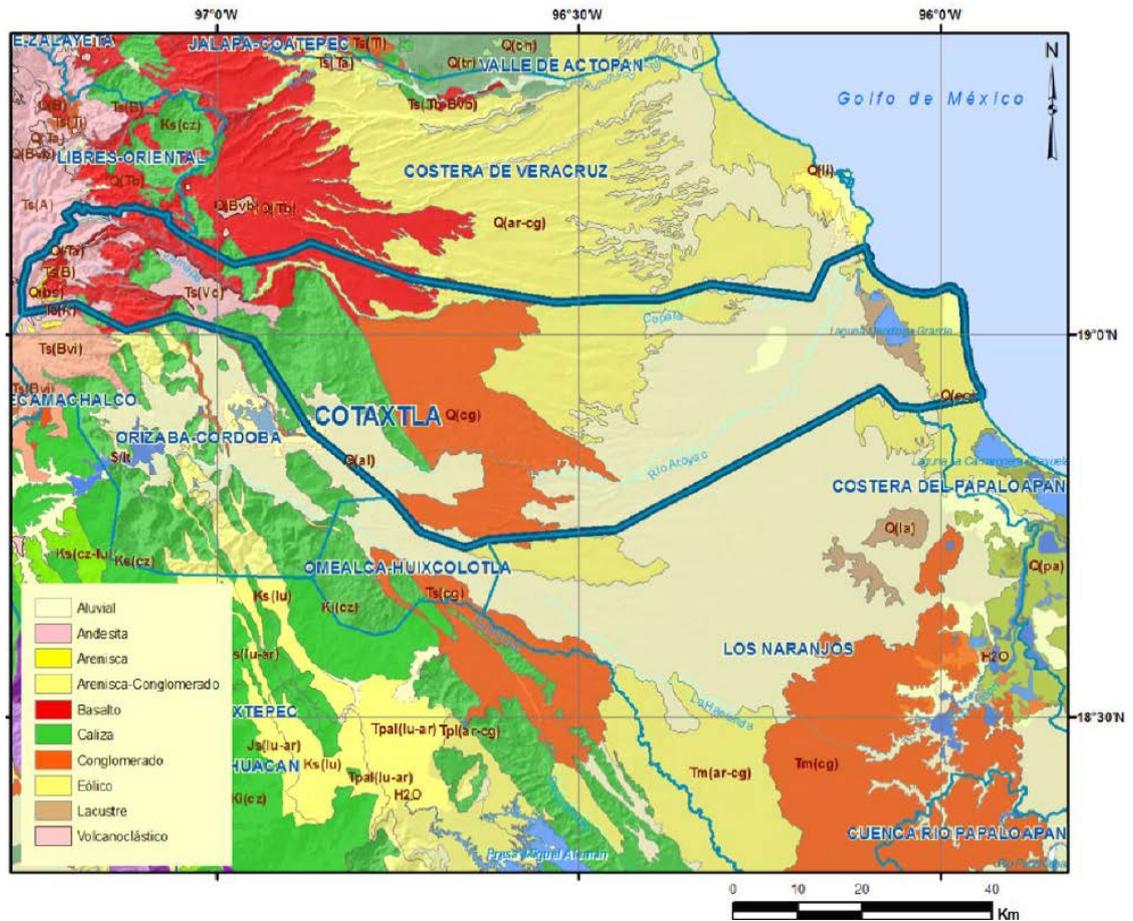


Figura 6: Geología general del acuífero Cotaxtla (CONAGUA, 2015).

5.1.3 Análisis Climatológico.

De acuerdo con la clasificación de climas de Köppen, modificados por E. García, la superficie del acuífero que explota la CCC DB está representada por una variación de climas que depende en gran medida de las elevaciones topográficas. De esta manera, en la región occidental, donde se registran las mayores elevaciones, se presentan climas fríos y conforme se desplaza a la línea de costa, el clima cambia gradualmente a cálido subhúmedo.

Para la porción central y oriental del acuífero, que corresponde al área de estudio está representada por climas del tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw_2 (w) y Aw_1 (w)).

Con objeto de conocer un orden de magnitud de recargas y descargas potenciales de un acuífero por efecto de los fenómenos meteorológicos más comunes como son la precipitación pluvial, evaporación potencial, temperatura ambiente y evapotranspiración, se realizó un análisis de estos parámetros climatológicos en el área de estudio.

Para esto se identificó como primer paso las estaciones climatológicas que, por su ubicación, permitieran evaluar el impacto de dicha relación (tabla 2).

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
El Tejar	19° 04' 03"	96° 09' 31"	10

Tabla 2 : Ubicación de la estación climatológica El Tejar.

Los registros climatológicos, fueron proporcionados por la estación climatológica de El Tejar; ubicada en la población de El Tejar municipio de Medellín, la cual es operada por personal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Para obtener un panorama general acerca de la fluctuación de estos parámetros climatológicos se procedió a graficarlos (figura 7), abarcando un periodo de 17 años (1997-2014).

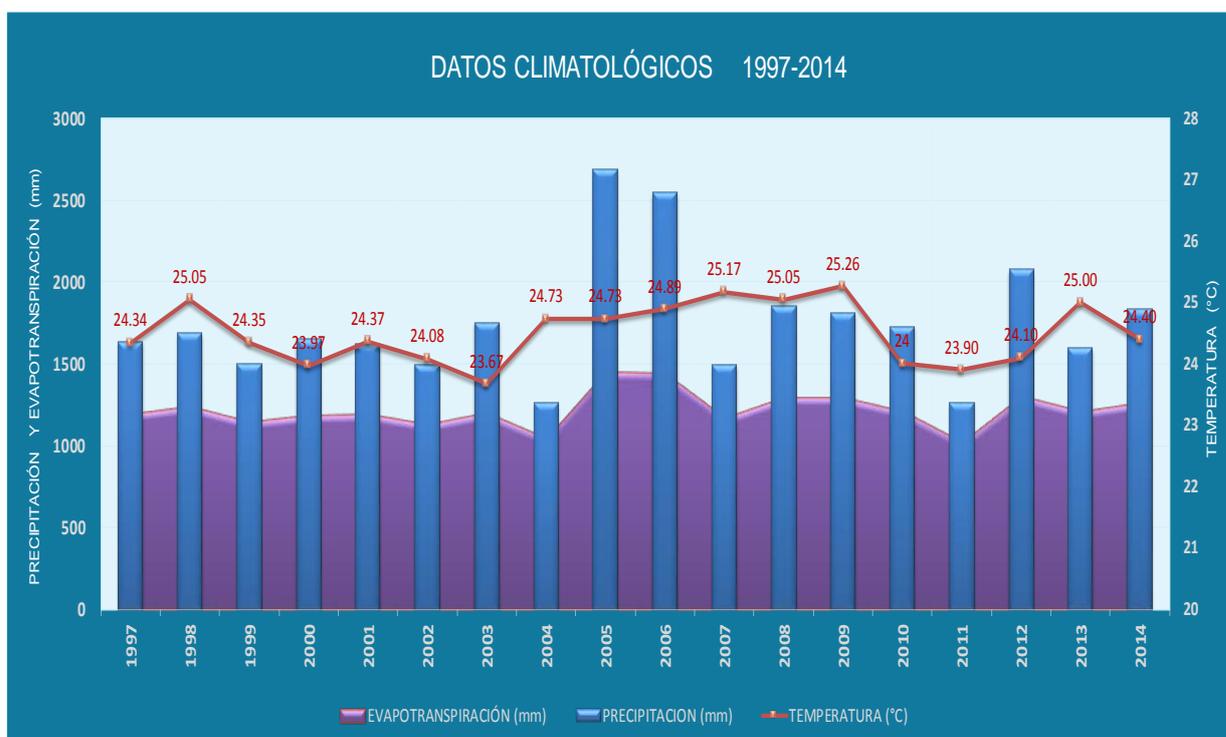


Figura 7: Datos climatológicos del área de estudio.

En la figura 7 se observa que la temperatura fluctuó de 23 °C a 25, la precipitación de 1200 mm a 1800 mm, y debido a fenómenos meteorológicos se observan dos datos sobresalientes de 2600 mm causados por un Huracán en el año 2005 y posteriormente una Tormenta tropical en el año 2006.

Para obtener la evapotranspiración se utilizó la siguiente expresión:

Formula de Turc.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

ETR= evapotranspiración real en mm/año.

P= Precipitación en mm/año

$L = 300 + 25t + 0.05t^3$

T= temperatura media anual en °C.

Posteriormente se determino el porcentaje de escorrentía a partir del coeficiente de escorrentía (Q) que se registra en el simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas de INEGI (SIATL) para la zona de estudio, que corresponde al 9% de la lámina de agua que llueve (figura 6) y a partir de la siguiente ecuación se dedujo lo siguiente.

$$I = Hp - Etr - Q$$

Donde :

I=infiltración (mm/año)

Hp=Altura de precipitación

Etr=Evapotranspiración

Q=Escurrimiento

Por ejemplo si en el año 2002

Hp = 1490 mm.

Etr=1122.14mm.

Q=134.39mm.

Entonces

$I = 1490 - 1122.14 - 134.39 = 233.47$ (mm/año).

A partir de esto se pudo estimar que aproximadamente el 20% de lo que precipita, alimenta el acuífero.

Después se analizaron los datos climatológicos en temporada de estiaje y temporada de lluvia.

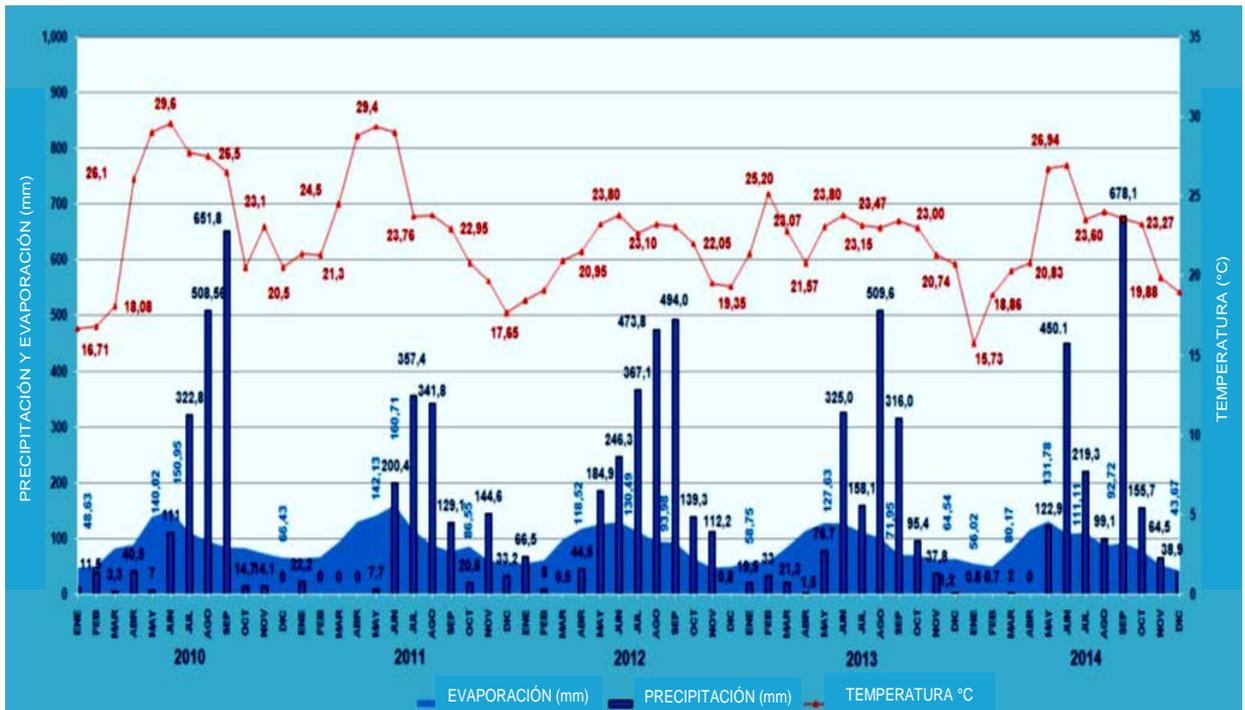


Figura 8: Hidrograma representativo del acuífero, período enero 2010 - diciembre 2014.

La evolución de los parámetros climatológicos (Figura 8) registra un comportamiento cíclico, con valores máximos de evaporación y precipitación en la temporada de lluvia (junio-septiembre), mismos que tienden a disminuir conforme avanza la temporada de estiaje o sequía (diciembre-abril).

5.2 Geología.

De acuerdo a la información bibliográfica analizada en gabinete y la reinterpretación de dos cortes litológicos obtenidos en estudios anteriores para el diseño de los pozos de la CCDB, se elaboró el modelo geológico del área de estudio, el cual se describe a continuación.

Fisiografía

La zona de estudio se localiza fisiográficamente en la porción nororiental de la Llanura Costera del Golfo Sur (figura 9), se distingue por la presencia de lomeríos tendidos con cañadas en el Oeste, mientras que en la porción central y oriental las geofomas están asociadas con una gran llanura aluvial, esta provincia abarca una extensión aproximada de 60 km desde la línea de costa; la llanura está delimitada por las estribaciones de la Faja Volcánica Transmexicana, al norte por la denominada sierra del Chiconquiaco y al Oeste por los grandes aparatos volcánicos del Cofre de Perote y Pico de Orizaba (CFE, 1999).

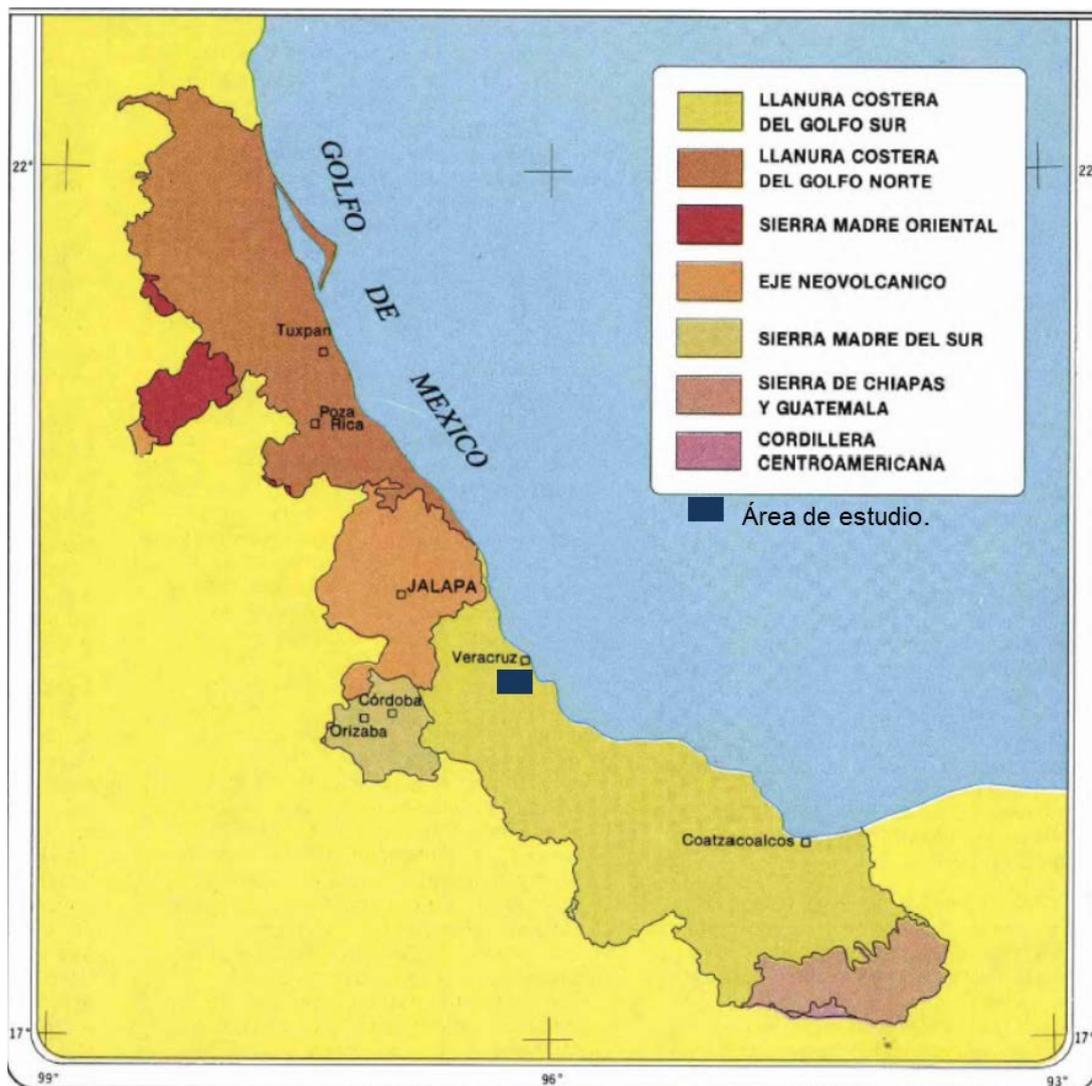


Figura 9: Provincia Fisiográfica del área de estudio. (Tomado de Provincias fisiográficas 2003).

Geomorfología.

Se ubica en la zona de depositación de materiales fluvi-aluviales, la densidad de drenaje tiende a disminuir, formando zonas bajas inundables con formación de lagunas intermitentes o zonas pantanosas durante la época de lluvias, en tanto que la zona litoral presenta características semejantes a las zonas anteriores, solo que existe una interacción con los procesos litorales con mayor número de zonas de inundación y presencia de sistemas de duna, con un drenaje incipiente y elevaciones no mayores a los 40 msnm.

Geología.

La planicie costera se encuentra cubierta por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico. Estos sedimentos descansan sobre rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía pocos metros, cerca de sus límites hacia la tierra, a más de 6000 m bajo el Golfo de México.

En el área de estudio afloran depósitos cuaternarios (figura 10), que forman suelos residuales, aluviones y depósitos eólicos que cubren a una potente secuencia sedimentaria

depositada en el Terciario, producto de la erosión y transporte de los materiales ígneos de la Faja Volcánica Transmexicana y depósitos en un ambiente deltáico, así como materiales costeros producto de fluctuaciones en el nivel del mar. Esta serie se encuentra interrumpida por antiguos paleocauces o por algunas cuencas de moderadas dimensiones en donde se depositó material de diferente granulometría.

Era	Período	Época	Columna Litológica	Descripción		
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENO	Q (eo)	Depósitos Eólicos: Material Arenoso (Fino) Transportado por el viento.	Sedimentos lacustres: Acumulación fluvial de sedimentos compuesta por arcillas, limos y arenas de grano muy fino.	Aluvión: Sedimentos fluviales en tamaños de limos, arenas. Material no consolidado.
			Q (la)			
			Q (al)			
			Q (ar-cg)	Materiales continentales: Materiales volcánicos retrabajados, bloques de rocas preexistentes de diferente origen.		

Figura 10: Columna estratigráfica del área de estudio.

En la zona se caracteriza por tener un relieve plano con una pendiente suave en dirección Este; el paisaje rompe con la presencia de montículos de poca altura (± 25 m) formados por dunas de orientación preferencial NW-SE.

A continuación, se describe cada una de las unidades litológicas que conforman el área de estudio:

Cuaternario.

- Materiales continentales Q (ar-cg):

Estos materiales corresponden a unidades continentales del Cuaternario que se depositaron en zonas topográficamente bajas, así como en las laderas de cerros. Están constituidos por materiales volcánicos retrabajados, sedimentos aluviales de tal forma que manifiestan una gran variabilidad en su granulometría desde arcillas, limos y arenas, hasta gravas cantos y bloques producto de rocas preexistentes de diferente origen. Sus fragmentos varían desde subangulosos hasta redondeados, en una matriz arcillo arenosa, poco consolidada. Aflora en la porción occidental del área de estudio (figura 11).

- Materiales Aluviales Q(al):

Se agrupa con esta nomenclatura al conjunto de sedimentos clásticos que conforman las zonas de lomeríos y llanuras aluviales que caracterizan a este acuífero. Consiste en sedimentos fluviales que fueron transportados por las corrientes provenientes de los altos topográficos, están constituidos por cuarzo, feldespato y fragmentos de rocas volcánicas, en tamaños de limos, arenas y gravas. Estos materiales no están consolidados, esta unidad predomina en el área de estudio (figura 11).

- Depósitos Eólicos Q (eo):

Corresponde a un conjunto de lomeríos dispuestos en una franja paralela a la línea de costa desde Boca del Río hasta Salinas y tierra adentro en el borde oriental de la laguna Mandinga (figura 11), consiste principalmente de arenas de grano medio a fino compuestas por cuarzo, feldespatos micas y fragmentos de concha de pelecípodos, forman dunas longitudinales. Se orientan de forma paralela a la costa en extensión de 1 a 5 Km. Se presentan poco consolidados.

- Sedimentos Lacustres Q (la):

Paquete sedimentario cuaternario que aflora en la porción delimitada, por la carretera que comunica las poblaciones Paso del Toro y el borde de la laguna Mandinga (figura 11). Su constitución corresponde a una acumulación fluvial de sedimentos de granulometría fina a muy fina, compuesta por arcillas, limos y arenas de grano muy fino, que se encuentran cubriendo a sedimentos arenosos y aluviales.

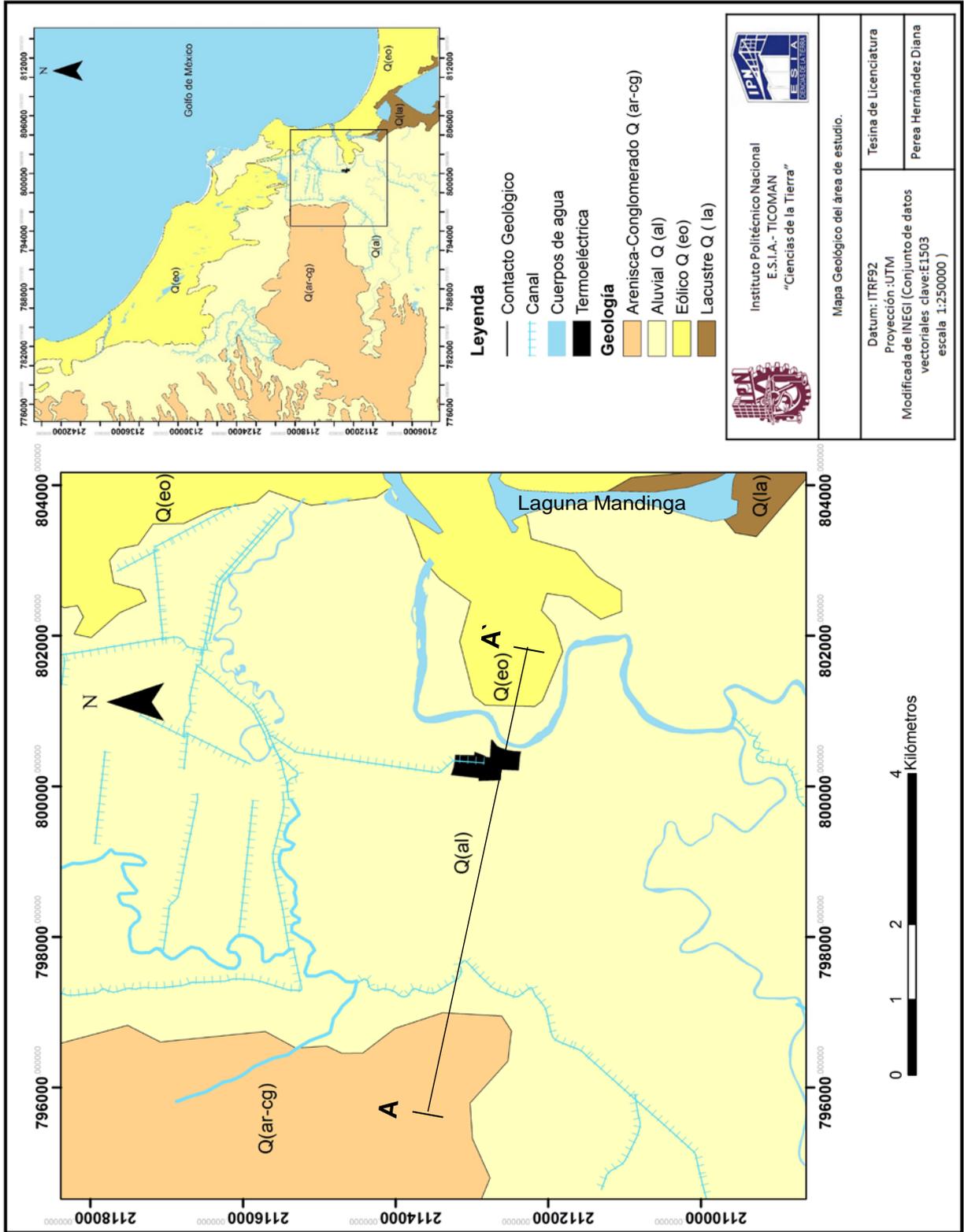


Figura 11: Mapa geológico del área de estudio

Debido a que los suelos cubren gran parte de la secuencia detrítica del Terciario, no se observa ninguna estructura geológica, sin embargo, existen amplios plegamientos anticlinales y sinclinales de echado suave, cuyos ejes siguen una orientación preferencial noroeste-sureste.

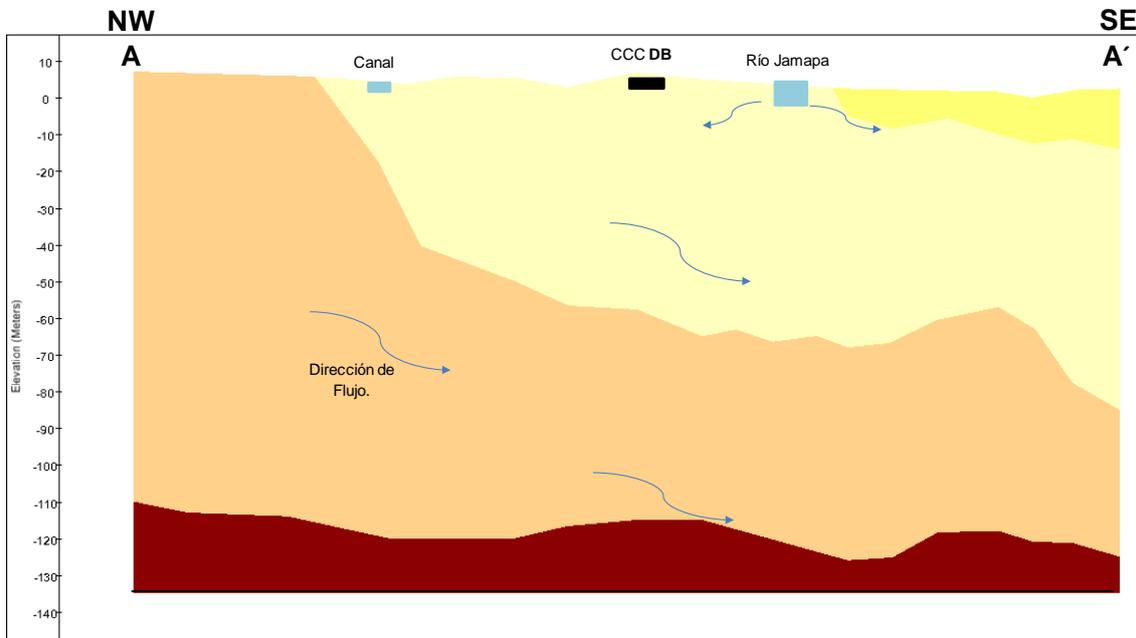
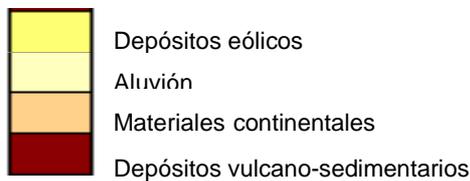


Figura 12: Sección Geológica A-A`.



5.3 Correlación geológica-geofísica

Apoyándose con la información geológica y con la finalidad de definir el marco geológico-geohidrológico del subsuelo, se realizaron un total de 33 sondeos eléctricos verticales (SEV). La distribución de los sondeos se hizo en forma homogénea en un radio de aproximadamente 3 Km de la planta, con lo que se generaron nueve secciones, cinco con orientación Este-Oeste y cuatro Norte-Sur (figura 15).

Tomando como base la información proporcionada por lo núcleos obtenidos en estudios anteriores y los resultados de cada SEV se definió un modelo geológico-geofísico el cual está conformado por tres unidades las que a continuación se describen (figura 13 y 14).

POZO 1

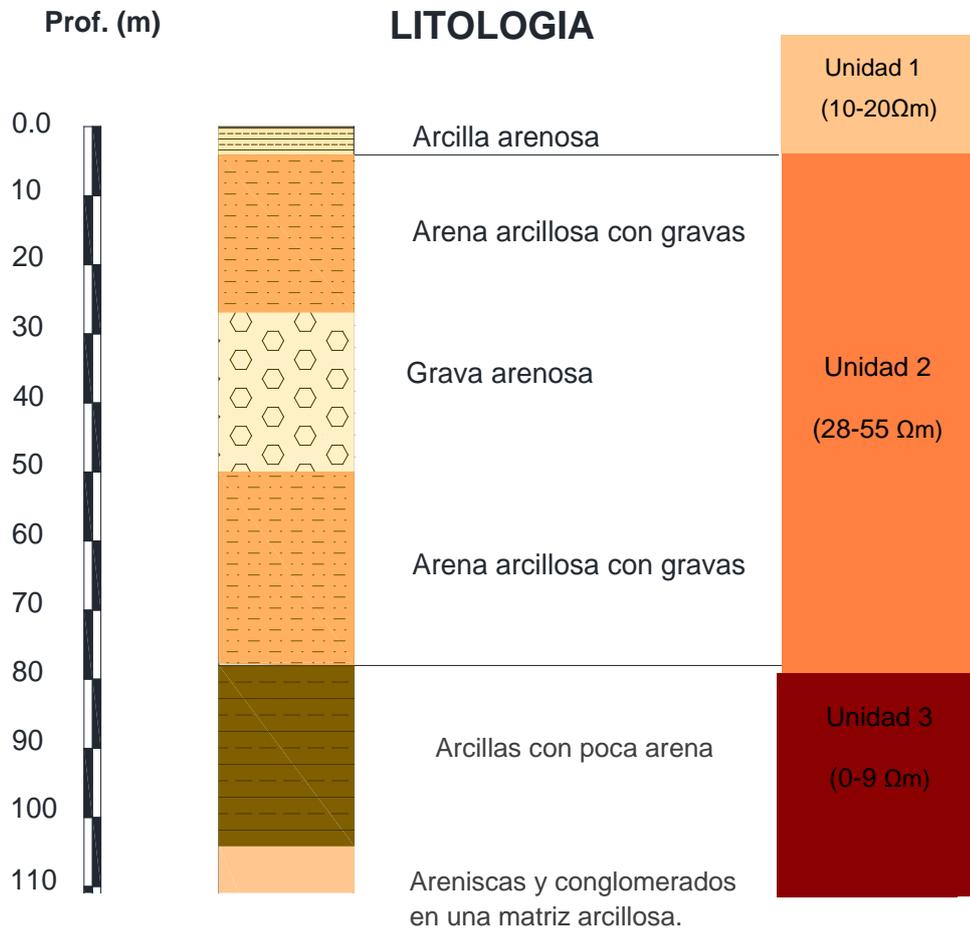


Figura 13: Corte Litológico del pozo 1.

POZO 3

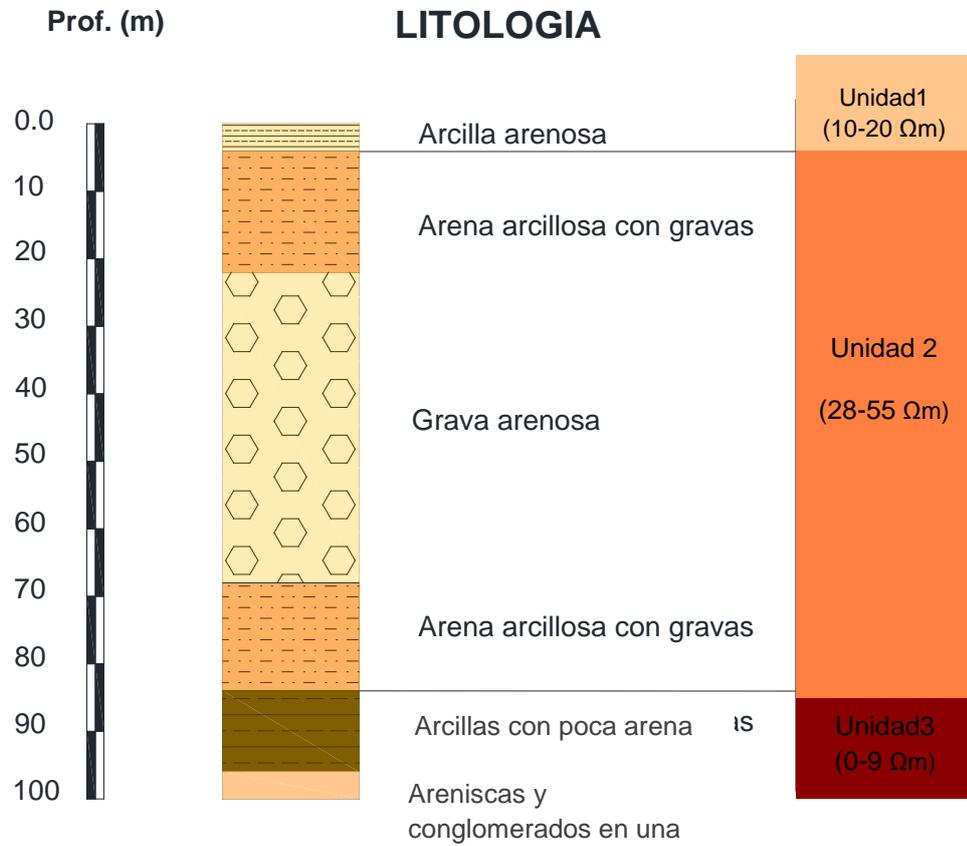


Figura 14: Corte litológico del pozo 3.

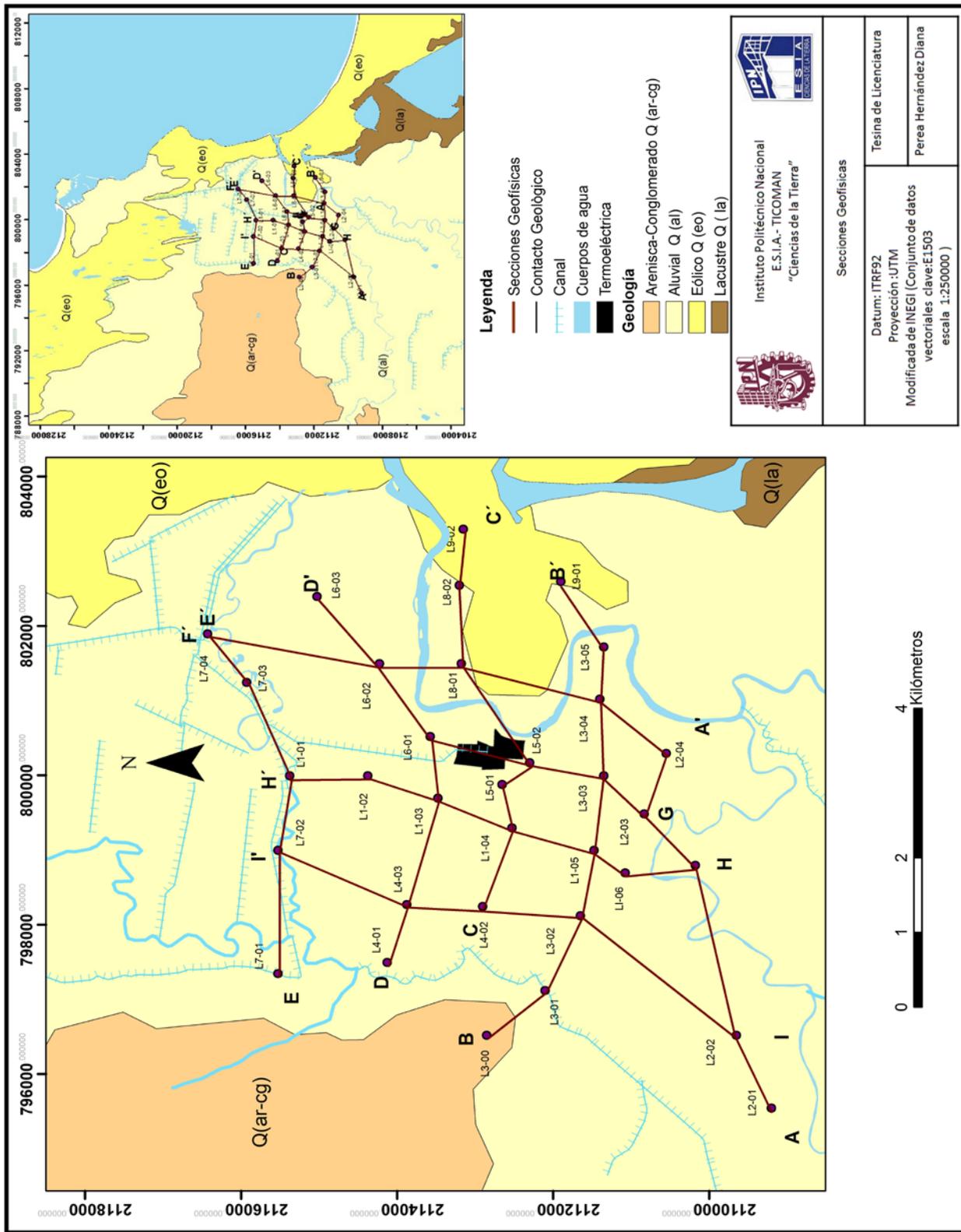


Figura 15: Localización de las secciones geofísicas.

- Unidad U1:

Unidad geoelectrica con resistividades de 10 a 200 Ω -m, se asocia a una capa superficial, es decir a suelos residuales saturados con agua y dada la granulometría que se observa en los cortes litológicos (figura 13 y 14), se infiere que es un horizonte permeable que alimenta a la unidad intermedia. Presenta espesores variables de 1 a 8 metros.

En la sección A-A' (figura 13), se encuentra orientado hacia el E-W, se observa la Unidad geoelectrica U1 que sobreyace a la unidad U2 y U3.

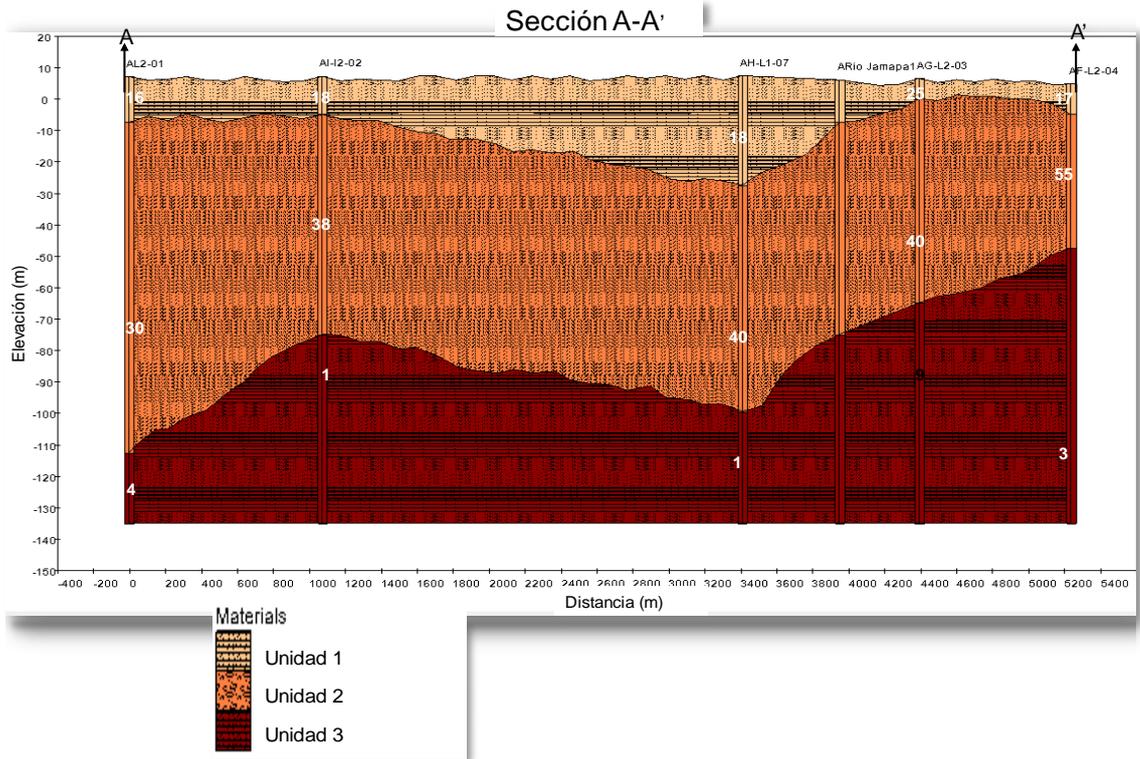


Figura 16: Sección geoelectrica A-A'.

- Unidad U2:

En esta unidad se caracteriza por tener resistividades de entre 28 y 55 Ω -m, litológicamente se asocia a materiales volcánicos retrabajados y aluviales saturadas con agua dulce, ya que, es la que explota la Central de Ciclo Combinado Dos Bocas y la zona en general. Se presenta solo como estratos regulares en las secciones A-A' e I-I', en las demás secciones se encuentra en forma de cuña o discordante a la unidad inferior.

En la sección I - I' (figura 17) se encuentra orientado N-S, se observa el espesor potente de la unidad U2 que sobreyace a la unidad U3.

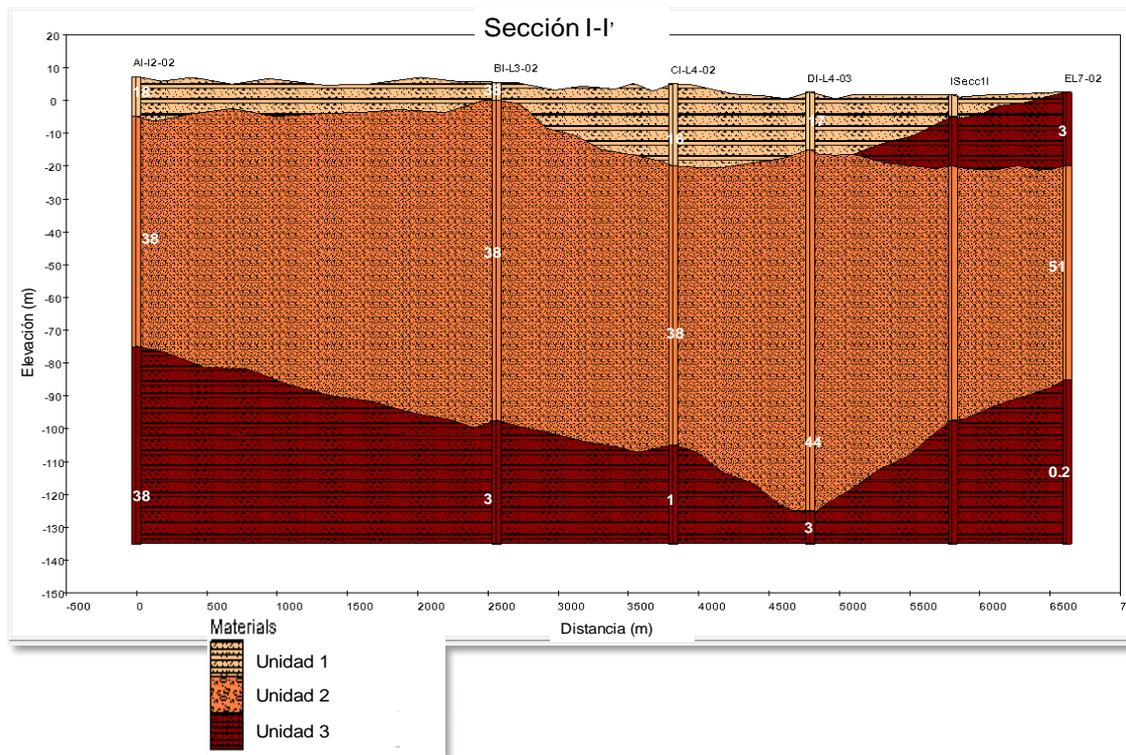


Figura 17: Sección Geoeléctrica I –I'.

- Unidad U3:

Unidad geoelectrica con resistividades de 0.2 a 9 Ω -m asociado a alternancias de arcillas, arenas, areniscas y conglomerados en una matriz arcillosa. Debido a que está unidad presenta resistividades bajas se infiere que se encuentra saturada con agua salada (figura 13 y 14).

En la sección C-C' (figura 18), con orientación E-W se observa que hacia el oriente el espesor de la unidad U3 aumenta y conforme se aleja de la costa este espesor va disminuyendo.

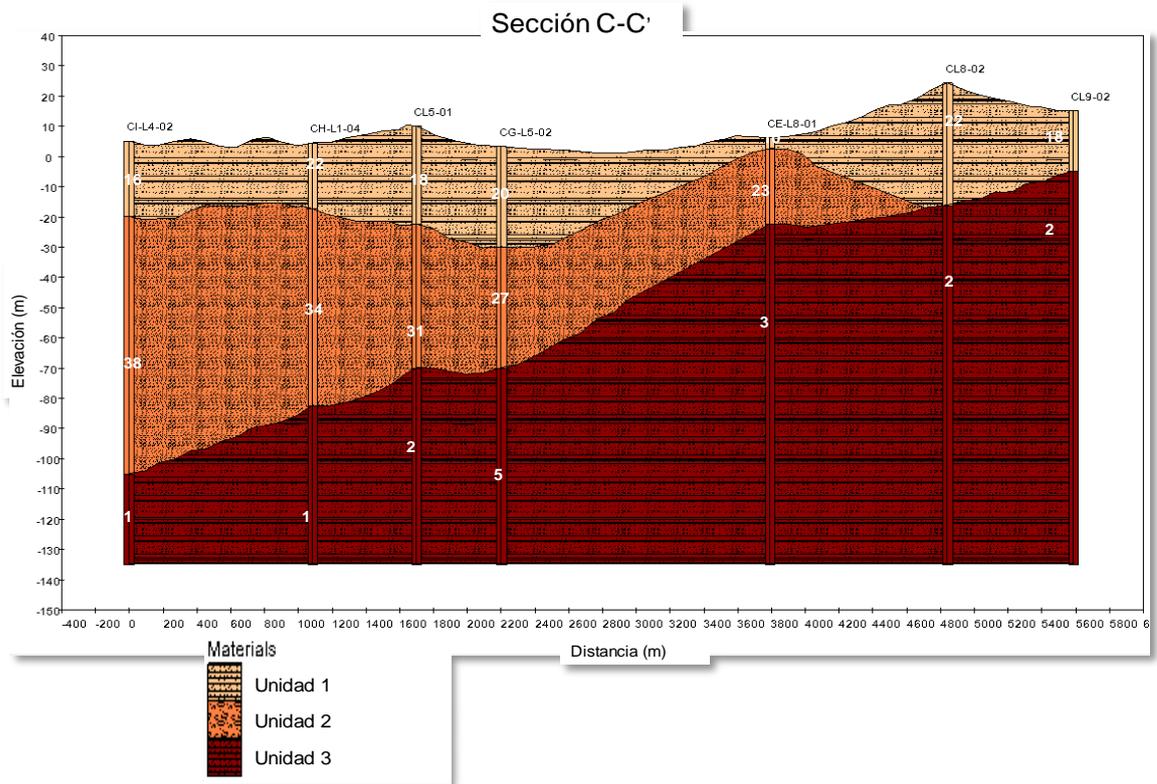


Figura 18: Sección Geoeléctrica C –C’.

5.4 Comportamiento hidráulico.

5.4.1 Censo de aprovechamientos hidráulicos.

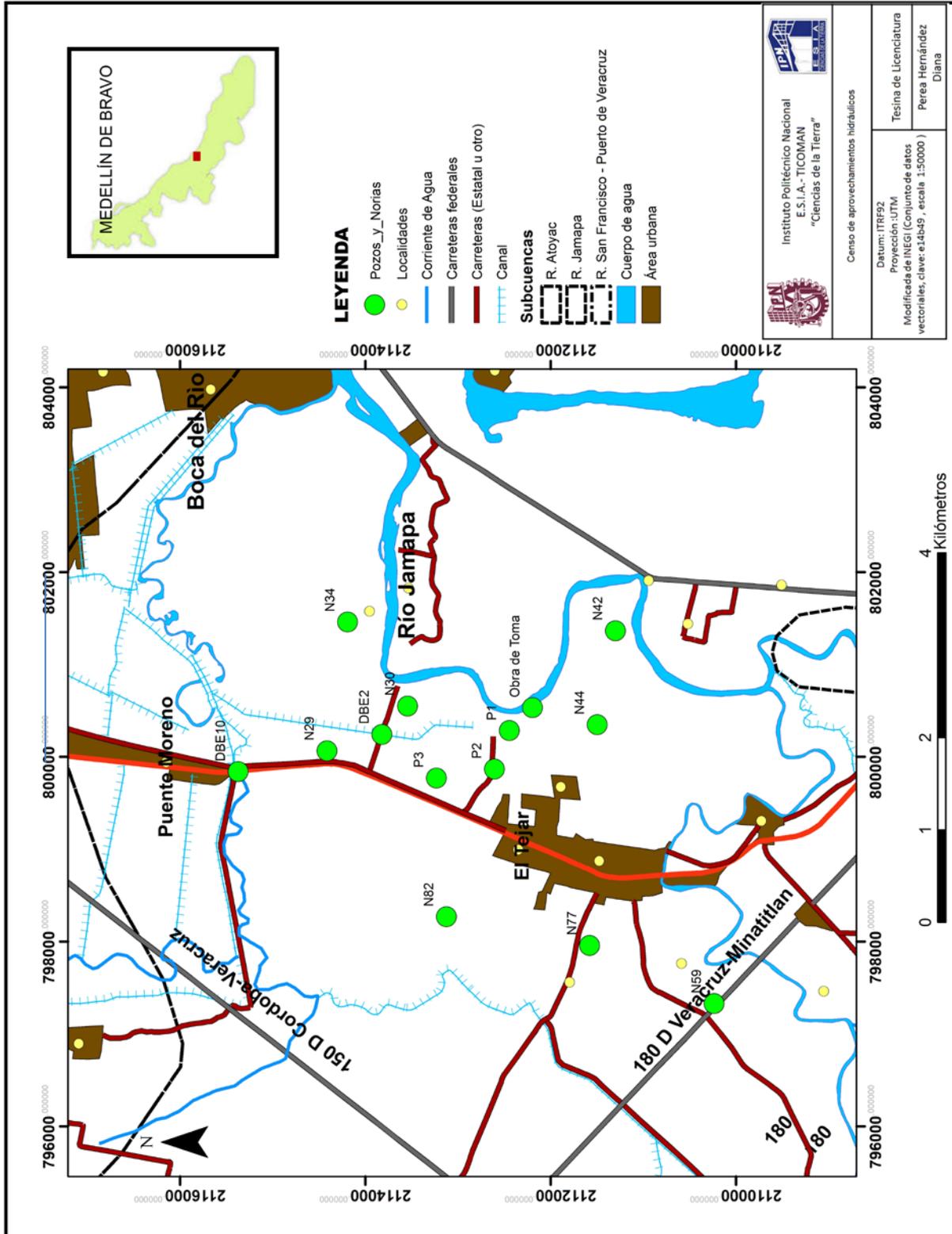


Figura 19: Localización de los pozos y norias.

En el recorrido en campo se localizaron un total de 14 aprovechamientos, de los cuales 3 son pozos que pertenecen a la CCC DB, 8 norias y adicionalmente se cuenta con 3 escalas sobre cuerpos de agua superficial, mismas que se asocian al comportamiento del acuífero. La distribución espacial se muestra en la figura 16, para las norias se utilizó el prefijo N, para los pozos el prefijo P y para las escalas DBE.

De acuerdo al censo de aprovechamientos realizado se observa que los pozos son explotados mediante bombas sumergibles con caudales entre 20 a 25 l/s, su uso es industrial y el principal uso de las Norias es doméstico.

También se observa que los aprovechamientos hidráulicos que se encuentran fuera de operación no cuentan con protección sanitaria (figura 20), estando así expuestas a factores de contaminación por residuos o flujos.



Figura 20: Aprovechamientos Hidráulicos N82 Y P3.

La profundidad del nivel del agua varía de 1 a 5 metros, con temperaturas de 27 °C a 29 °C a excepción de las escalas estas presentan temperaturas de 30 °C a 37° C debido a que se vierte agua caliente que se utiliza en la generación de energía eléctrica. Con respecto a la conductividad eléctrica el rango se encuentra de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a excepción de la N30 y DBE2 que presentan conductividades de 3082 y 4010 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, las cuales se asocian a la influencia de una fosa séptica y descarga de agua residual (servicio doméstico) cercanas al punto de monitoreo, afectando así la calidad del agua subterránea en este sitio. Tomando en cuenta estas características se deduce que se trata de cuerpos de agua dulce.

Es importante mencionar que los parámetros físico químicos fueron tomados a profundidades de 10 a 60 metros.

Para la ubicación de cada aprovechamiento se utilizó el equipo topográfico estación total marca Leica modelo TC407, con precisión de ± 5 mm y un alcance de medición de 5 km.

En la tabla 3 y 4 se muestra el resumen del censo de aprovechamientos indicando la ubicación en coordenadas UTM, parámetros de campo, así como el volumen de extracción anual.

C e n s o d e a p r o v e c h a m i e n t o s h i d r á u l i c o s	Tipo de aprovechamiento		P1	P2	P3	N29	N30	N34	N42
	Coordenadas UTM (m)	X	800261.1	799755.2	799773.0	800066.2	800550.9	801422.0	801357.4
		Y	2112236.9	2112469.5	2113232.0	2114366.6	2113544.4	2114060.0	2111185.0
		Z (nivel del terreno)	4.80	8.20	3.30	2.50	3.30	2.72	2.70
	Altura del brocal o altura de medición (m)		0.88	0.52	0.64	0.94	0.73	0.50	0.52
	Diámetro de la obra (m)		0.30	0.30	0.30	1.20	0.79	0.94	0.95
	Uso		Industrial	Industrial	Pozo fuera de operación , sin equipo de bombeo	Noria fuera de operación.	En uso para servicios generales. Doméstico-escolar.	Diferentes usos	Doméstico
	Volumen total anual (m ³)		115 037	269461.0	0.00	0.00	82781.00	80954.00	350.00
	Profundidad del nivel estático (m)		3.06	5.13	1.53	1.35	1.48	1.69	2.20
	Profundidad total del aprovechamiento (m)		60.00	60.0	54.00	3.50	5.00	6.00	4.00
Temperatura (°C)		29.50	29.80	28.70	28.70	28.50	28.00	27.30	
Conductividad eléctrica (µS/cm)		278.00	632.0	81.00	501.00	428.00	3082.00	254.00	
Ph		6.97	6.67	7.50	7.35	6.38	6.58	6.31	

Nota: P=Pozo N=Noria DBE= Escala de medición — =Sin dato

Tabla 3: Resumen de los aprovechamientos hidráulicos censados.

C e n s o d e a p r o v e c h a m i e n t o s h i d r á u l i c o s	Tipo de aprovechamiento		N44	N59	N77	N82	DBE2	DBE10	Obra de Toma
	Coordenadas UTM (m)	X	800349.4	797331.0	797960.6	798343.0	800283.0	799885.0	800534.0
		Y	2111267.3	2110234.6	2111579.5	2113398.0	2113616.0	2115259.0	2112195.0
		Z (nivel del terreno)	4.06	7.03	4.88	2.89	5.28	5.50	4.81
	Altura del brocal o altura de medición (m)		0.50	0.79	0.75	0.86	0.00	0.00	0.00
	Diámetro de la obra (m)		1.03	1.00	1.06	0.96	—	—	—
	Uso		Diferentes usos	Doméstico	Agrícola	fuera de operación	Escala de medición del canal de enfriamiento	Escala de medición del canal la Zamorana	Escala de medición en Obra de Toma.
	Volumen total anual (m ³)		90903.00	298.00	120390.00	0.00	—	—	—
	Profundidad del nivel estático (m)		2.08	2.48	1.37	1.90	1.69	4.65	4.46
	Profundidad total del aprovechamiento (m)		5.50	4.50	6.00	6.50	—	—	—
Temperatura (°C)		27.50	27.80	27.60	27.90	37.40	30.40	31.40	
Conductividad eléctrica (µS/cm)		416.00	654.00	680.00	—	4010.00	475.00	994.00	
Ph		6.29	6.34	6.80	6.90	7.46	7.07	7.29	

Nota: P=Pozo N=Noria DBE= Escala de medición ----- =sin dato.

Tabla 4: Resumen de los aprovechamientos hidráulicos censados.

5.4.2 Mediciones del nivel piezométrico.

Durante el censo que se realizó, se efectuó además una medición del nivel del agua y con la información obtenida, en gabinete se generaron mapas de elevación del nivel estático. Dado que ya se habían realizado recorridos piezométricos en años previos y se contaba con esta información, se pudieron generar mapas de evolución de la elevación del nivel del agua. También se construyeron bases de datos en las que se integró la información actual con información previa y a partir de la cual se generaron gráficos en Excel que representan las variaciones en el nivel del agua subterránea para temporada de lluvia y estiaje.

Para la generación de los mapas se calculó la elevación del nivel estático, y está se obtuvo al restar la elevación del terreno natural menos la profundidad al nivel estático tomado en campo. Los resultados se plasmaron sobre una base topográfica en la que se mostraron los aprovechamientos censados y se interpolaron los datos de elevación generando líneas de igual elevación, así estas líneas proporcionaron información sobre el comportamiento del sistema acuífero en el área de estudio y a través de este análisis, permitió determinar la dirección del flujo subterráneo.

Para el análisis de la evolución del nivel del agua los datos utilizados abarcaron un periodo de años comprendido del 1997 a 2014 y a continuación, se muestran los más representativos (Figura 21,22, 23).

Los niveles estáticos en el acuífero son muy someros, en donde el 100% de los aprovechamientos censados tienen profundidades menores de 5.5 m, por lo que toda la barra está expuesta a la evapotranspiración, siendo esta una de las principales salidas subterráneas del agua.

En el año 1997 se observan más pozos y norias, pero debido a que la mayoría de las poblaciones cuenta con servicio de agua potable proporcionado por el organismo estatal correspondiente, ha disminuido el uso de las norias. Los restantes de las norias son utilizados por rancherías criadoras de ganado, principalmente de tipo vacuno para satisfacer necesidades domésticas y ganaderas.

No se observan grandes abatimientos a través del tiempo debido a la intrusión marina, es decir el volumen que deja el agua dulce es ocupado por el agua salada.

Debido a la continuidad de los materiales que conforman el sistema acuífero y a través del análisis piezométrico se observó que el acuífero tiene como frontera natural, hacia el Este, el río Jamapa, el cual sirve como vaso regulador, ya que el acuífero descarga o recarga dependiendo de la temporada y la fluctuación de la profundidad del NE, por lo que se infiere que dicho escurrimiento superficial (río) contribuye a mantener en equilibrio el acuífero.

La dirección preferencial que se observa en los años 1997,2008 y 2014 es hacia el Noreste.

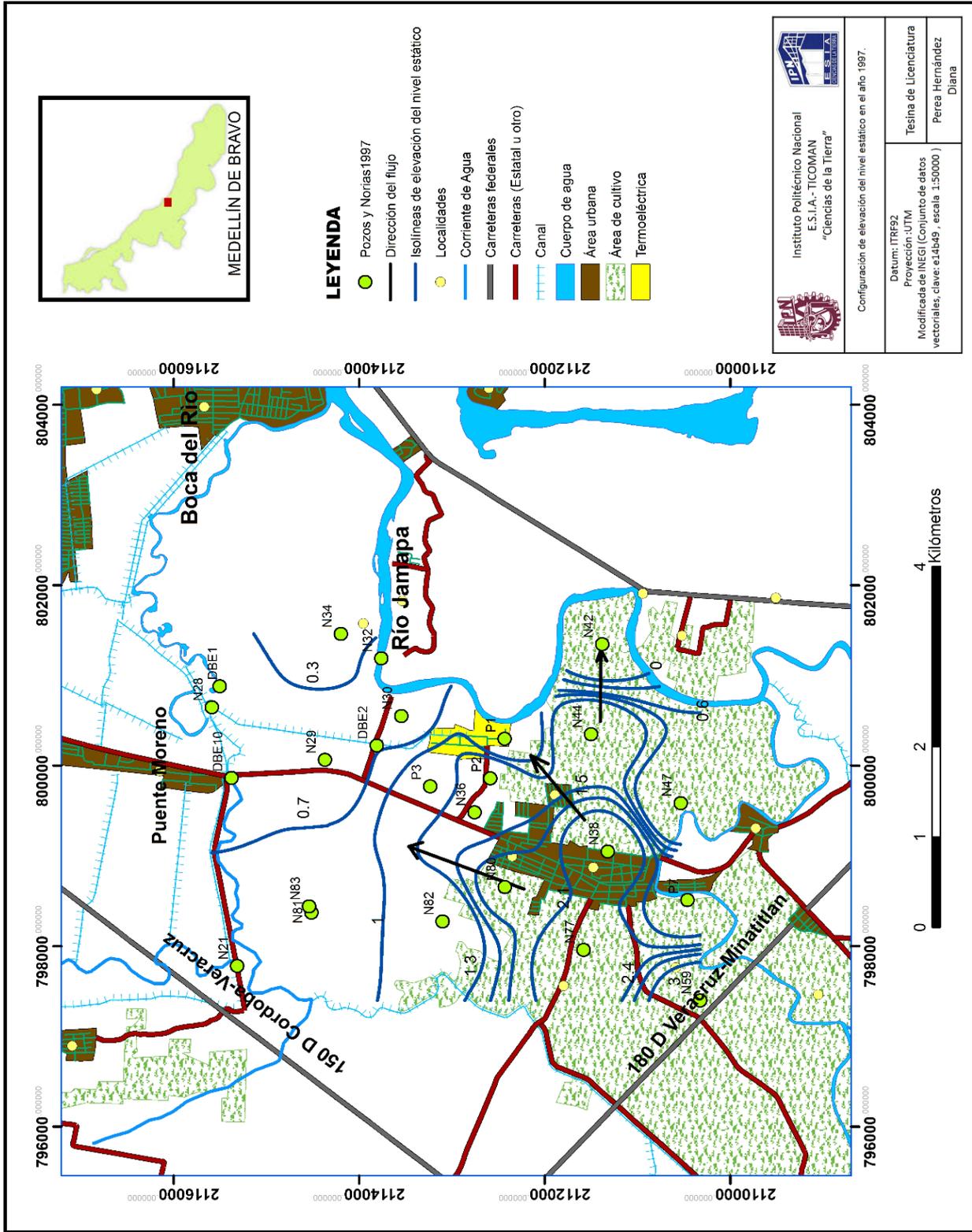


Figura 21: Configuración de la elevación del nivel estático del año 1997.

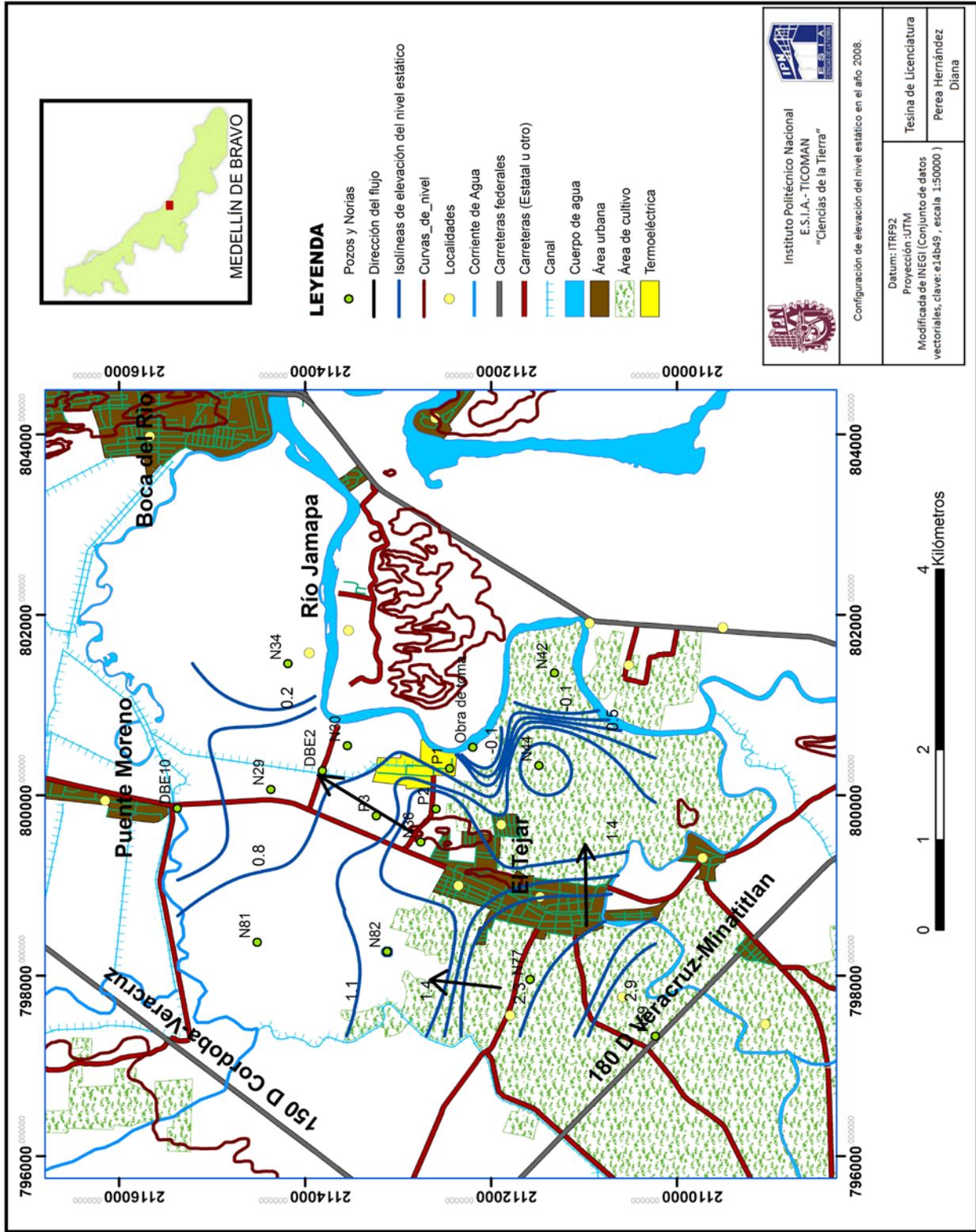


Figura 22: Configuración de la elevación del nivel estático del año 2008.

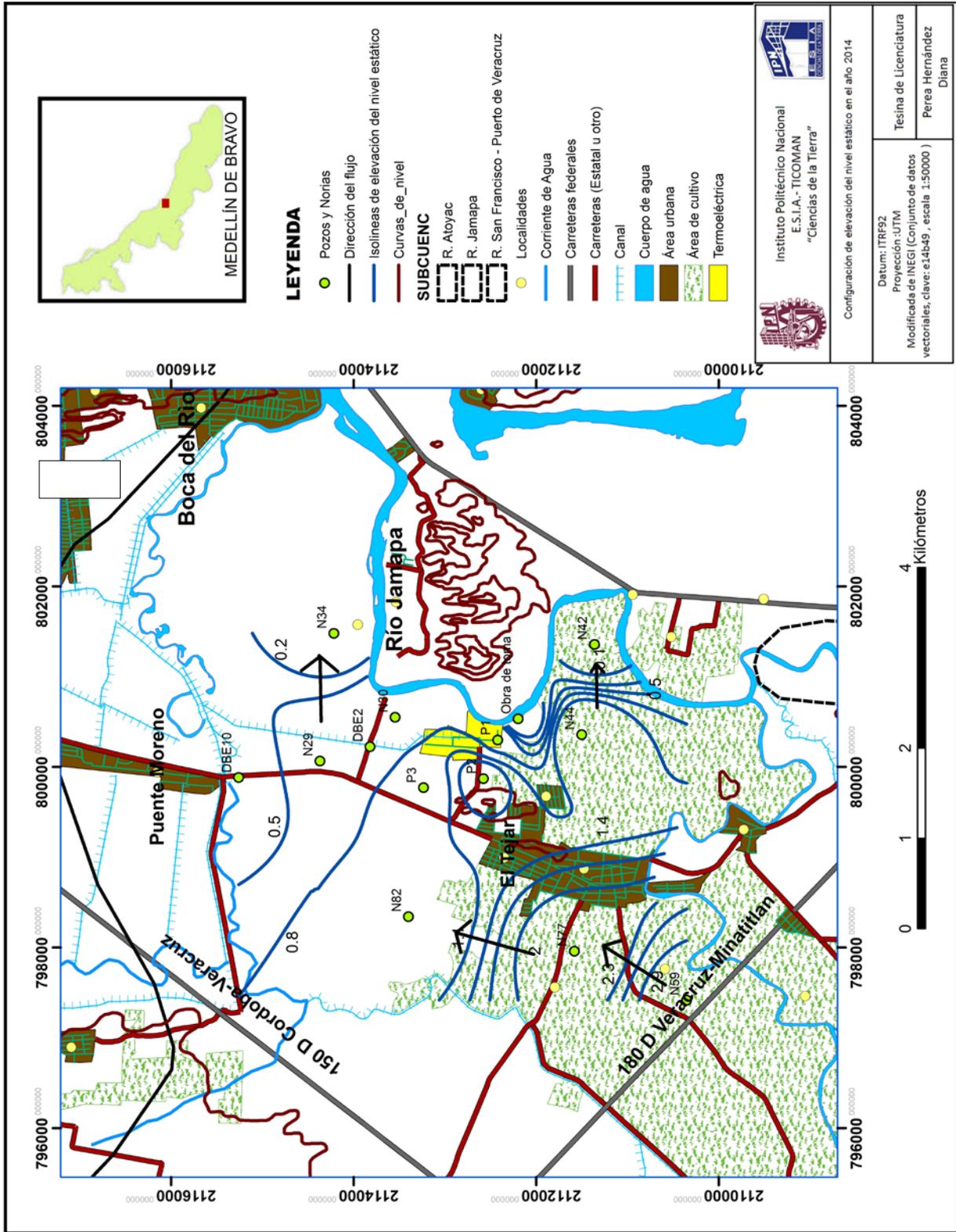


Figura 23 : Configuración de la elevación del nivel estático del año 2014

En el comportamiento del acuífero además se consideró la relación de los niveles estáticos con los parámetros climatológicos, ya que por las características de los materiales del subsuelo y debido a la continuidad hidráulica de los mismos, se infiere que en su conjunto forman un acuífero de tipo libre alojado en medios granulares, y como característica principal de este tipo de acuíferos, es que las recargas locales ocurren mediante el proceso de precipitación pluvial-infiltración al subsuelo.

En la figura 24 se muestra la variación de la profundidad del nivel del agua subterránea a través del tiempo y de la precipitación. Con base en esta información se determinó que su comportamiento hidráulico se asocia con la concurrencia de la precipitación, la cual se ha confirmado ya que registra una variación de la profundidad del nivel del agua subterránea de forma casi instantánea durante y después de la lluvia.

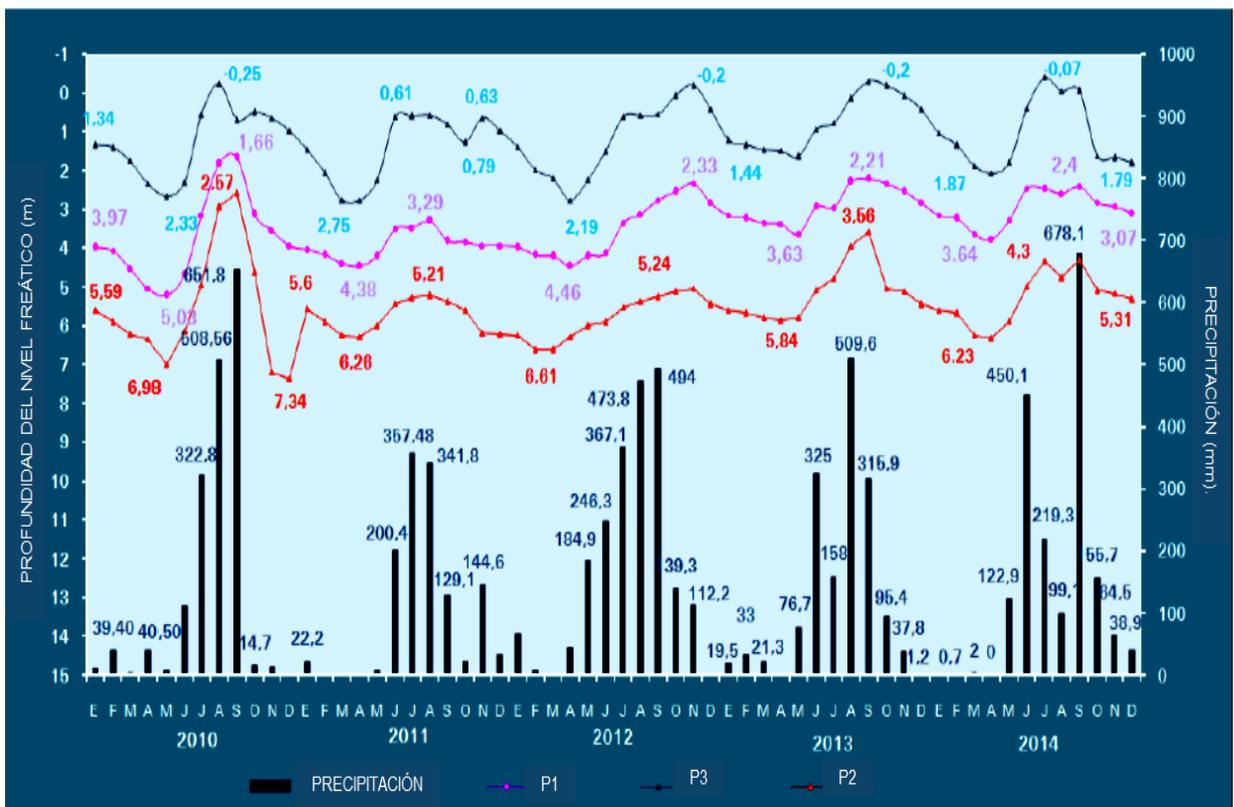


Figura 24: Hidrograma representativo del sistema acuífero del área de estudio, período enero 2010-diciembre 2014.

Se observa además en el Hidrograma (figura 24) que el nivel del agua subterránea durante la temporada de estiaje presenta su máxima profundidad. Para junio con la presencia de lluvias el acuífero experimenta una disminución en su profundidad, la cual se acentúa en los meses de agosto y septiembre debido a las fuertes precipitaciones pluviales que afectan a la región.

Del análisis piezométrico se observaron las siguientes características y propiedades:

- Acuífero somero (profundidad del NE de 3.5 a 6 m)
- Acuífero clasificado como tipo libre.
- Comportamiento hidráulico asociado a la ocurrencia de la precipitación
- Limita al Este con el río Jamapa, al norte y Oeste con el arroyo Puente Moreno (Límites que funcionan como fronteras o condiciones de borde naturales del acuífero).

5.5 Pruebas Hidráulicas

Se reinterpretaron los datos de recuperación de las pruebas de aforo realizadas en los pozos 1 y 3 que pertenecen a la CCDB. En ambos casos se utilizó el método de recuperación.

Para el pozo 1, el tiempo total de bombeo fue de 1440 minutos con caudales variables de 16 l/s hasta 35 l/s. Los datos de la recuperación de la prueba fueron los siguientes.

Depresión observada (m)	t' (min)	t+t'/t' (min)
8	0	∞
5.3	0.3	4801.00
4.6	1	1441.00
4.1	2	721.00
4.0	3	481.00
3.8	5	289.00
3.5	7	206.71
3.2	10	145.00
3.0	15	97.00
2.8	20	73.00
2.5	30	49.00
2.3	45	33.00
2.0	60	25.00
1.5	160	10.00

Tabla 5: Datos de la recuperación del pozo 1.

Para el cálculo de la Transmisividad se graficó (figura 25) la recuperación del nivel y los valores de cada $(t + t') / t'$.

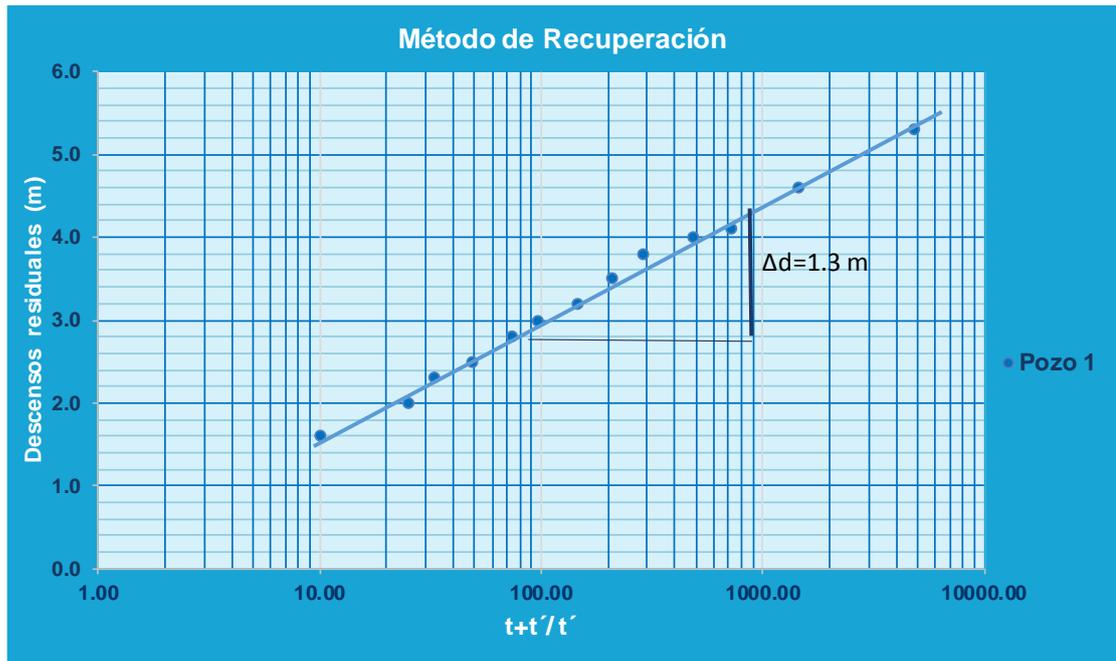


Figura 25: Cálculo de "T" .Recta de recuperación del pozo 1.

Utilizando la siguiente expresión, se obtuvo una transmisividad de $425.68 \text{ m}^2/\text{d}$.

$$T=0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

$$T=0.183 \frac{3024 \text{ m}^3/\text{d}}{1.33} = 425.68 \text{ m}^2/\text{d}.$$

Dónde:

$$Q=35 \text{ l/s} = 3024 \text{ m}^3/\text{d}.$$

$$\Delta d= 1.33 \text{ m}.$$

La transmisividad que se obtuvo tiene una calificación estimativa de media a alta.

Las características constructivas del pozo 1 son las siguientes: 60 metros de profundidad, con 31 m de longitud de ademe liso y 29 m de longitud de ademe ranurado. Con esto se observa que la unidad que explota corresponde a la unidad 2.

Para el pozo 3 el tiempo total de bombeo fue de 1380 minutos, con caudales variables de 15 l/s hasta 24 l/s. Los datos de la recuperación de la prueba fueron los siguientes.

Depresión observada (m)	t' (min)	t+t'/t' (min)
1.54	0	∞
1.02	0.3	4601.00
0.81	1	1381.00
0.68	2	691.00
0.6	3	461.00
0.5	5	277.00
0.43	8	173.50
0.39	10	139.00
0.29	15	93.00
0.18	30	47.00
0.13	45	31.67
0.11	60	24.00
0.08	75	19.40
0.05	90	16.33
0.04	120	12.50

Tabla 6: Datos de la recuperación del pozo 3.

Para el cálculo de la Transmisividad se graficó (figura 26) la recuperación del nivel y los valores de cada $(t + t') / t'$.

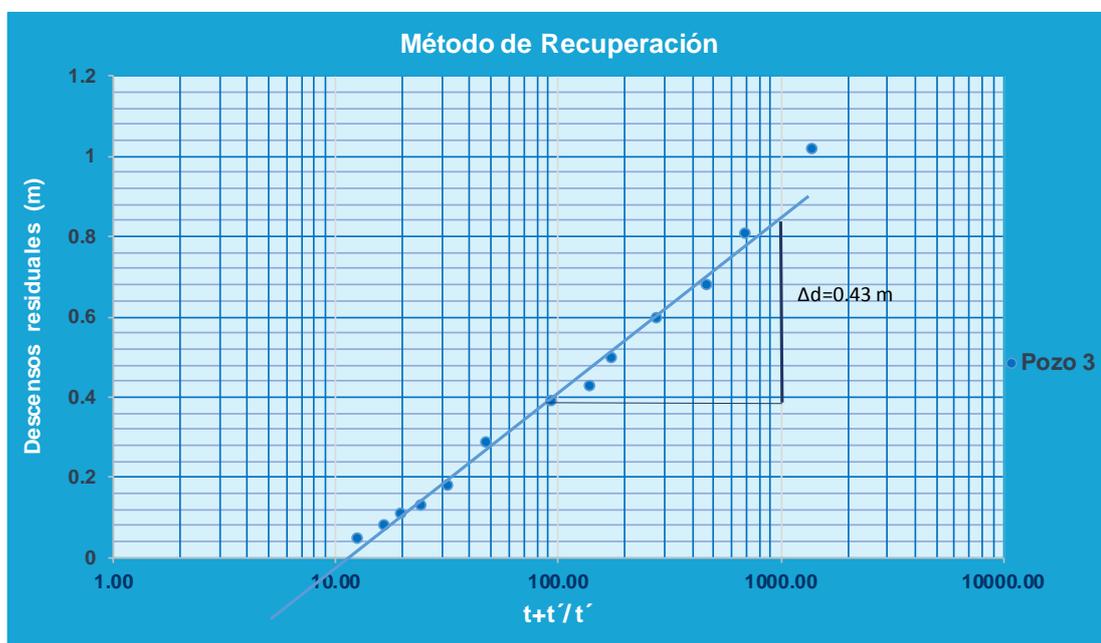


Figura 26: Cálculo de "T" .Recta de recuperación del pozo 3.

Utilizando las siguiente expresión, se obtuvo una transmisividad de $882.48 \text{ m}^2/\text{d}$

$$T=0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

$$T=0.183 \frac{2073 \text{ m}^3/\text{d}}{0.43} = 882.48 \text{ m}^2/\text{d}.$$

Dónde=

$$Q=24 \text{ l/s} = 2073.6 \text{ m}^3/\text{d}.$$

$$\Delta d= 0.43 \text{ m}.$$

$$b = 59 \text{ m}.$$

Se observa que la transmisividad es mayor en el pozo 3 debido a que el espesor de las gravas arenosas aumenta en esta zona.

La transmisividad que se obtuvo tiene una calificación estimativa de alta.

Las características constructivas del pozo 3 son las siguientes: 54 metros de profundidad, con 13 m de longitud de ademe liso y 41 m de longitud de ademe ranurado. Con esto se observa que la unidad explota corresponde a la unidad 2.

Para el cálculo de la Conductividad hidráulica se utilizó la siguiente expresión:

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

Dónde:

T: Transmisividad

b: espesor del acuífero.

Resultando:

$$K = \frac{882.48 \text{ m}^2/\text{d}}{55 \text{ m}} = 16.04 \text{ m/d} = 1.857\text{E-}04 \text{ m/s}.$$

$$K = \frac{425.18 \text{ m}^2/\text{d}}{55 \text{ m}} = 7.73 \text{ m/d} = 8.94\text{E-}05 \text{ m/s}.$$

Con base en el análisis de los cortes litológicos, la conductividad hidráulica calculada de la unidad 2 y bibliográfica especializada, se estimó la conductividad de la unidad 1.

Resultado para la unidad 1 una conductividad de 9.0E-05 a 8.0E-06 m/s.

6) Conclusiones: Modelo Conceptual Hidrogeológico.

Es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea que se utiliza incorporando toda la información geológica e hidrogeológica disponible en un simple esquema del modelo a realizar (Anderson & Woessner, 1992). La primera fase consiste en elaborar un modelo conceptual definiendo litología dominante, espesores, continuidades y estructuras de los acuíferos y de las continuidades dominantes de manera que se pueda identificar los límites, las características y el comportamiento del acuífero a estudiar. Con esta previsualización se logra identificar el sistema de flujo característico, el cual es esencial para entender el movimiento del agua a través del sistema hidrogeológico.

Un modelo conceptual no reproduce la realidad, sólo permite realizar estimaciones o análisis comparativos de comportamiento posibles.

De acuerdo con los estudios geológicos y geofísicos realizados anteriormente en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible inferir que el acuífero se encuentra alojado en su porción superior, en los sedimentos fluviales, eólicos y lacustres, de granulometría variada que constituyen el lecho y la llanura de inundación de ríos Jamapa, Cópala, Atoyac otros arroyos tributarios y la zona de lagunas, así como areniscas, conglomerados.

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte el relleno de depresiones. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua en la región.

Unidades hidrogeológicas.

Recordando que una unidad hidrogeológica es un conjunto de materiales geológicos con propiedades hidráulicas comunes, con base en la información geológica y SEV's y la información geológica se distinguieron 3 unidades hidrogeológicas, en función de sus características resistivas y geológicas (U1, U2, U3), por lo que el acuífero exhibe estratificación de agua de diferente calidad; ya que, mientras aproximadamente a partir de los 80 m de profundidad se encuentra la unidad U3 saturada con agua salada, producto de intrusión marina, la U2 está saturada con agua dulce representando el horizonte acuífero que es explotado por los pozos y algunas norias, la cima de la unidad 2 se ubica en promedio a los 10 m de profundidad, en tanto que la Unidad U1 representa acuíferos colgados que en general alimentan a la U2 y en menor proporción es explotada mediante norias.

A partir de las pruebas hidráulicas se calculó la conductividad hidráulica para la unidad 2 la cual corresponde a $1.857E-04$ m/s, $8.94E-05$ m/s y con base en el análisis de los cortes litológicos, la conductividad hidráulica calculada de la unidad 2 y bibliográfica especializada, se estimó la conductividad de la unidad 1.

Resultado para la unidad 1 una conductividad de $9.0E-05$ a $8.0E-06$ m/s.

Debido a la constitución de los materiales, se considera que todos ellos funcionan como un solo acuífero costero de tipo libre. La recarga del acuífero tiene como principal componente la precipitación que se manifiesta en el área conjugada con la permeabilidad vertical de los estratos superficiales, y en menor proporción ocurre la recarga horizontal proveniente del Oeste donde se ubica la parte más alta del área. (Se estima que existe continuidad en el material hacia el Oeste). Las salidas del agua subterránea ocurren mediante descarga en el Golfo de México, la extracción por medio de pozos y norias y la evapotranspiración debido a que el acuífero presenta niveles freáticos poco profundos, por lo general menores a 5 m, dejando expuesto el nivel del agua a este proceso.

A partir del censo de aprovechamientos hidráulicos se estimó la salida a través de pozos y norias la cual corresponde a $645137 \text{ m}^3/\text{año}$, las otras salidas corresponden a la evapotranspiración con 75% de la de la lámina de precipitación. Con respecto a las entradas se estimó que 18 % de lo que precipita, se infiltra a él acuífero.

El área de estudio tiene fronteras naturales, hacia el Este, el río Jamapa, el cual sirve como vaso regulador, ya que el acuífero descarga o recarga dependiendo de la temporada y la fluctuación de la profundidad del nivel del agua, por lo que se infiere que dicho escurrimiento superficial (río) contribuye a mantener en equilibrio el acuífero y hacia el Noroeste limita con el arroyo Puente Moreno (Límites que funcionan como fronteras o condiciones de borde naturales del acuífero).

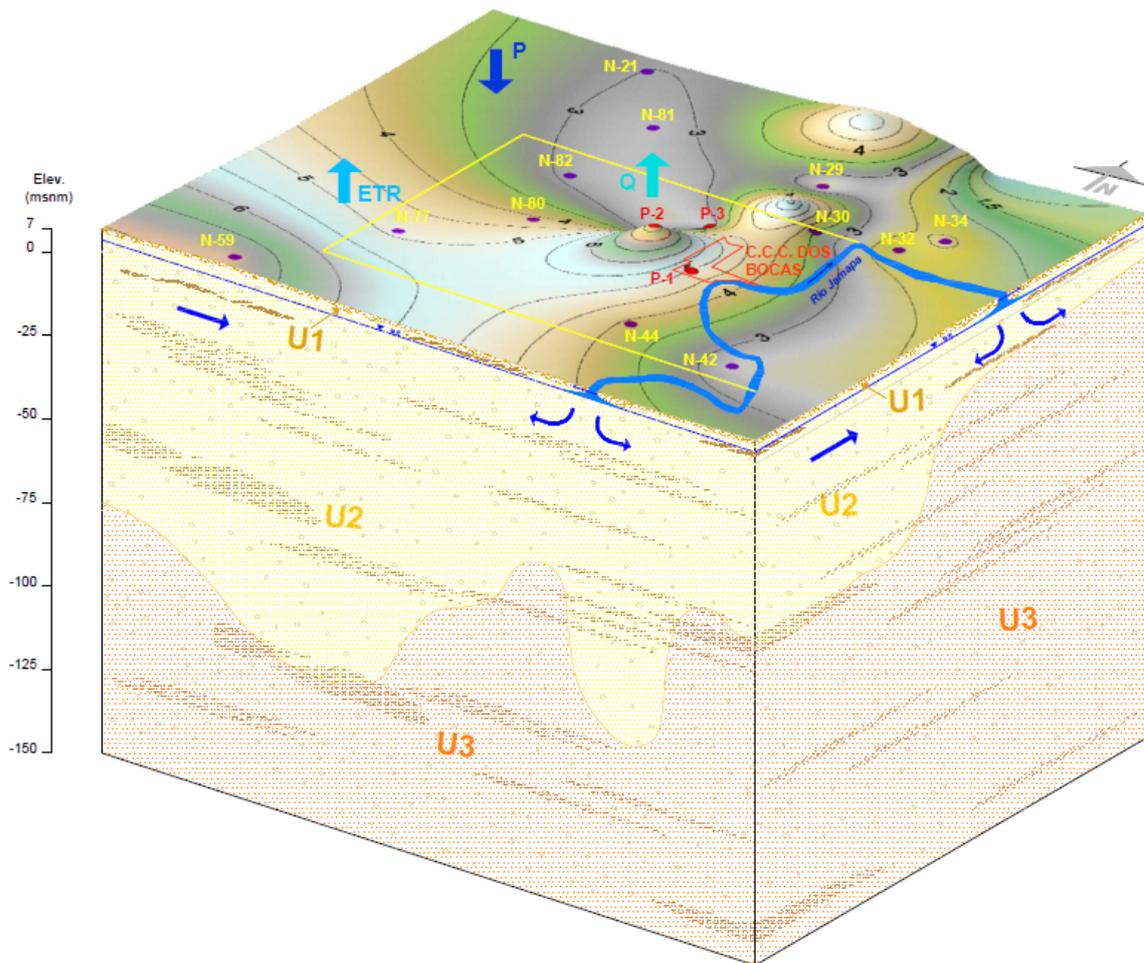
No se aprecian abatimientos significativos en los niveles del agua debido a que el volumen de agua dulce extraída, lo ocupa el agua salada (Intrusión salina).

Interface agua salada y dulce.

Se observó que hacia el Noroeste de la planta en dirección Boca del Río, el agua salada está poco profunda (menor a 10m) profundizándose importantemente hacia el Oeste (más de 100m) en dirección de la autopista Veracruz-Córdoba.

Es importante hacer notar que el límite entre agua dulce-agua salada es dinámico y que la sobre explotación puede generar su ascenso como lo que se empieza a observar en la batería de los pozos propiedad de la Comisión Regional de Agua y Saneamiento ubicada al sur de la Estación el Tejar donde la interface se haya a una profundidad aproximada de 70m.

La figura 27 muestra en forma esquemática el funcionamiento del acuífero que explota la Central de ciclo combinado Dos Bocas. La recuperación del nivel por efecto de la precipitación, su abatimiento por bombeo y la evolución del límite agua dulce- agua salada.



SIMBOLOGÍA

- N-82 Noria
- P-2 Pozo CFE
- Dirección de flujo subterráneo
- Q ↑ Descarga (extracción) media anual (m³/año)
- P ↓ Precipitación media anual (mm)

- ETR ↑ Evapotranspiración media anual (mm)
- U1 Suelo residual (alternancia de arena fina, limo, arcilla y materia orgánica, incluye zonas de relleno y gravillas)
- U2 Alternancia de arenas, gravas y arcillas, saturadas con agua dulce
- U3 Alternancia de arenas, gravas y arcillas, saturadas con agua salada

Figura 27: Modelo Conceptual Hidrogeológico de la Central de Ciclo Combinado Dos Bocas, Veracruz.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar pruebas de permeabilidad, ya que, al conocer la litología que conforma el área de estudio, se pueden obtener parámetros hidráulicos de cada horizonte geológico deseado.
- Realizar mediciones de perfiles de salinidad, ya que con este método se mediría in situ la salinidad a diferentes profundidades y sería más preciso indicar la profundidad de la zona de interfaz del agua dulce-salada.
- Cuando existan pozos o norias abandonados, estos deben sellarse con cemento para prevenir flujos.

7) Trabajos citados.

- Anderson, M., & Woessner, W. (1992). *Applied Groundwater Modeling*. Gulf Professional Publishing.
- Auge, D. M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la prospección de agua subterránea*. Obtenido de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>
- Bentacour, T., Palacio, A., & Escobar, F. (2012). Conceptual Models in Hydrogeology. En A. P. Teresita Bentacour, *Hydrogeology* (pág. 222).
- Castellón, U. J. (enero de 2010). *Hidráulica*. Obtenido de <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ06.pdf>
- CFE. (1992). *Estudio Geohidrológico para determinar posibles fuentes de abastecimiento de agua para la Termoeléctrica Dos Bocas*. Veracruz: CFE.
- CFE. (1999). *Informe anual de control y seguimiento geohidrologico de la CCC Dos Bocas*.
- CFE. (2014). *Informe anual de control y seguimiento gehidrológico CC Dos Bocas, Veracruz*. Veracruz.
- CFE. (2014). *Procedimiento interno para la ejecución del censo de aprovechamiento*. México: CFE.
- CFE. (2016). *Procedimiento interno para realizar una campaña piezométrica*. México.
- CONAGUA. (2009). *Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Cotaxtla, estado de Veracruz*.
- CONAGUA. (2015). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cotaxtla (3008), Estado de Veracruz*. México.
- CONAGUA. (s.f.). *Servicio Mereorológico Nacional*. Recuperado el 08 de Septiembre de 2015, de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=164:veracruz&catid=14:normales-por-estacion
- D'Elia, M. (28 de Noviembre de 2013). *Conceptos básicos sobre Hidrología subterránea*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/cuencapooipo/conceptos-bsicos-sobre-hidrologa-subterrnea>
- Hernández, M. (2001). Desarrollo de un modelo hidrogeológico mediante herramientas de Información Geográfica.
- Ley de Aguas Nacionales. (2016). *DOF*, (pág. 110). México.

- López-Geta, J., & Fornés Azcoiti, J. (2009). *Las aguas subterráneas*. Madrid, España.
- Martinez Santos et al. (2010). *Modelling the effects of groundwater-based urban supply in low-permeability aquifers: Application to the Madrid Aquifer, Spain*. Madrid: Springer Science.
- Rebollo, L. (2000). *Hidrogeología*. Obtenido de Propiedades Hidráulicas elementales de los medios sólidos: https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T2-Propiedades%20hidr%E1ulicas%20elementales.pdf
- Salas, D. P.-J.-M. (Agosto de 2001). *Regiones Hidrológicas*. Obtenido de Hidrología.
- Wagener, T. (2007). *Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox*. Pennsylvania: Elsevier.