



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Caracterización de la intrusión salina anómala en Boca del Río, Veracruz

TESINA

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

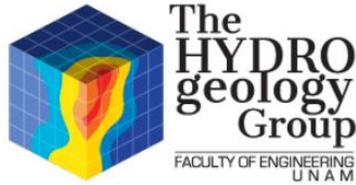
Alonso Soberon Sainz Trapaga

DIRECTOR DE TESINA

Dr. José Antonio Hernández Espriú



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la Tesis No. 20 del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación cuantitativa de acuíferos.

This bachelor's dissertation represents the Thesis No. 20 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM) as part of our scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.

www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology

Twitter: @hydrogeologymx

Agradecimientos y dedicatoria

Este proyecto fue financiado gracias a la investigación binacional realizada por el Grupo de Hidrogeología, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, junto con la empresa holandesa Arcadis.

A la UNAM por proveerme de una excelente educación, grandes experiencias y muy buenas oportunidades.

A mi papá, por enseñarme a ser el mejor ejemplo de auto superación y trabajo, con quien compartí muchos gustos de todo ámbito, incluyendo hoy el de nuestra alma máter. Me queda un gran trabajo para alcanzar el cariño y admirable carácter que llegaste a tener, gracias por enseñarme el camino. A mi mamá, por ser el mejor modelo de una persona trabajadora y responsable, pero más que eso cariñosa. Gracias a ti en especial por recordarme siempre la vocación de un ingeniero que consta del bienestar de la sociedad. Por último, a los dos, por darme toda libertad y facilidad en el momento de tomar mis decisiones y proveerme de las mejores oportunidades sin que fuera su obligación.

A mis hermanos e inquilinos jarochos de Cerro del Horno por tolerarme, enseñarme y volverme siempre más competitivo además de ser ejemplos a seguir.

A mis abuelas por su apoyo y compañía a lo largo de estos años.

A Francisco Mier por su apoyo y su interés a lo largo del desarrollo de éste proyecto.

A mi profesor, tutor y amigo José Antonio Hernández Espriú por compartir su tiempo, consejo y experiencia a lo largo de estos años. Un grande maestro hoy y sin duda para las futuras generaciones.

A mis tutores Alberto Arias, Noé Santillán, Isabel Domínguez, Gabriel Salinas y Antonio Espriú quienes conociéndome ya sea mucho o poco han sido de gran apoyo por sus indicaciones en la elaboración de éste trabajo tan importante para mi futuro. Ayudándome siempre con la mejor disponibilidad.

A mis amigos Fabián, Alex, Víctor, Omar, David, David Méndez, Paolo, Alan, Víctor Morales, Emigdio, Raúl, Luis, Gerardo, Xavier y Marcelo con quienes compartí muchas risas, buenos recuerdos y experiencias tanto en clase como en campo.

Al municipio de Boca del Río, al SAS, Club de Golf Villa Rica, y Dos Riberas Residencial, por su ayuda constante durante la elaboración del proyecto.

En especial a los profesores Gustavo Tolson, Javier Arellano, Carlos Garza, Carlos Schulze, Claudia Mendoza, Moisés Dávila, Francisco Romero, Ricardo Castrejón, Elena Centeno, Luis Espinosa, Dante Morán y Sergio Macías.

Contenido

Abstract

Resumen

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Localización.....	3
1.3 Población y actividad económica.....	4
Capítulo 2. Marco teórico de referencia.....	5
2.1 Generalidades acuíferos costeros.....	5
2.2 Intrusión de agua salada.....	5
2.3 Métodos Analíticos.....	7
2.3.1 Modelo Ghyben-Herzberg.....	7
2.3.2 Modelo de Glover.....	8
2.4 Métodos Geofísicos.....	9
2.5 Caudales máximos de explotación en zonas costeras.....	10
2.6 Tecnologías para agua subterránea en acuíferos costeros.....	12
Capítulo 3. Metodología.....	13
3.1 Estructura.....	13
3.2 Recopilación de información.....	14
3.3 Trabajo de campo.....	14
3.4 Prueba de bombeo.....	16
Capítulo 4. Geología e hidrogeología.....	18
4.1 Geología regional.....	18
4.1.1 Geología local.....	20
4.2 Clima.....	20
4.3 Hidrología.....	21
4.3.1 Hidrología superficial.....	21
4.3.2 Hidrología subterránea.....	22
4.4 Usos de agua.....	23
Capítulo 5. Discusión y resultados.....	24
5.1 Parámetros fisicoquímicos.....	24
5.2 Parámetros hidráulicos.....	28

5.2.1 Prueba de bombeo.....	28
5.2.2 Prueba de recuperación.....	29
5.4 Interfaz de agua dulce – agua salada.....	30
5.5 Caudal máximo de extracción.....	31
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	32
Capítulo 7. Referencias.....	35

Abstract

Arcadis Netherlands contacted the Hydrogeology Group of the Faculty of Engineering (UNAM), in order to elaborate a business case on saline intrusion on the municipality of Boca del Río in Veracruz. The data obtained on field level uncovered an anomalous saline intrusion pattern, which contradicted the theoretical model where higher salinity problems were expected. This created the need to elaborate a model to understand saline intrusion occurrence in the study area. This work presents a hydrogeological conceptual model that aims to characterize the saline intrusion phenomena in the Eastern part of the Costera de Veracruz Aquifer.

The following measurements and procedures were done to elaborate the conceptual model: Depth to dynamic level and physicochemical parameters were measured in each well with conventional soundings and a HANNA HI 9828 multiparameter respectively. The obtained data was processed to develop two maps (groundwater flow, total dissolved solids distribution). The hydraulic parameters ($T=1,309.7 \text{ [m}^2\text{/d]}$, $k = 32.7 \text{ [m/d]}$) were calculated through the interpretation of a pumping test performed, at a constant rate of 11.8 l/s, in a salinized well. Analytical methods (Ghyben-Herzberg, Glover) used the hydraulic parameters of the pumping test to locate the saltwater-freshwater interface in the study area. This enabled the estimation of the critical pumping rates for the study area.

Once the data interpretation was over, the conclusion states that the occurrence of saline intrusion in the Costera de Veracruz aquifer, in Boca del Río, is very low and it is due to the upconing of saltwater. The biggest rates of extraction are related to the most salinized wells, meaning that they are operating over the critical pumping rate. This work suggests the use of subsurface water technologies to safeguard the wells that are not salinized yet.

Resumen

El Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM), fue contactado por la empresa Arcadis Netherlands con el fin de desarrollar un caso de estudio acerca de intrusión salina en la zona de Boca del Río, Veracruz. La obtención de datos en campo contradijo a lo esperado con lo visto en teoría (salinidad baja y puntual), por lo que el problema de intrusión salina se calificó como anómalo. Así surgió la necesidad de la elaboración de un modelo con la intención de descifrar la ocurrencia de intrusión salina en la zona. En este trabajo es presentado un modelo hidrogeológico conceptual con el fin de caracterizar el fenómeno de intrusión salina en la parte oriental del acuífero Costera de Veracruz.

Se midieron los parámetros fisicoquímicos y el nivel dinámico de cada pozo con el multiparámetros Hanna HI 9828 y una sonda convencional respectivamente; posteriormente fueron utilizados para elaborar un mapa de distribución de sólidos disueltos totales y también una red de flujo. Los parámetros hidráulicos ($T=1,309.7 \text{ [m}^2\text{/d]}$, $k = 32.7 \text{ [m/d]}$) se calcularon por medio de una prueba de bombeo, en un pozo sujeto a intrusión salina, a un caudal constante de 11.8 [l/s] . Se emplearon los parámetros obtenidos en la prueba y junto con métodos teóricos (Ghyben-Herzberg, Glover) se definió la posición de la interfaz de agua salada en la zona de estudio y se utilizó determinar el caudal crítico de extracción.

Tras realizar la interpretación de los datos, se concluyó que la fuente de intrusión salina en el acuífero Costera de Veracruz, la zona de Boca del Río, es baja y se debe sólo al ascenso del cono de agua salada por un caudal de extracción mayor al caudal crítico. En el presente trabajo se sugieren caudales máximos de extracción, así como el uso de tecnologías para salvaguardar los pozos de extracción de consumo humano de posibles eventos futuros de salinización.

1.- Introducción

El uso de agua subterránea para el consumo es cada día más desafiante y demandante, particularmente en zonas costeras donde se emplaza el 70% de la población mundial (Cheng et al., 1999). La vulnerabilidad de los acuíferos costeros se ve incrementada por la extracción del agua del subsuelo (Ferguson y Gleeson, 2012). Hoy en día se ve el efecto de éste problema, ya que, en las zonas costeras del mundo, los acuíferos son vulnerables a la intrusión salina. Es un problema del cual México no ha sido la excepción. La tasa anual de crecimiento poblacional para México ha disminuido de 3.2% a 1.3% en los últimos 55 años (1960-2015) (Banco Mundial, 2016). La importancia de que la tasa haya decrecido, así como una gestión adecuada de acuíferos costeros, serán elementos claves para prevenir la intrusión salina en zonas costeras.

La mezcla de tan solo 3% o 4% de agua salada en agua dulce torna inservible el recurso para muchas actividades y provoca también, un fuerte impacto ambiental (Custodio, 2002). Este ha sido uno de los motivos para que se realicen estudios de todo tipo alrededor del mundo, incluyendo: estudios geofísicos y geoquímicos (Eissa et al. 2016), Isotopos ambientales y geoquímica (Ma et al., 2007), monitoreo e imagen de agua salada por medio de un electrodo ERT (Ronezka et al., 2015) entre otros. Otro campo de suma importancia es el desarrollo de tecnologías para agua subterránea (Stuyfzand y Raat, 2009), donde se busca optimizar la calidad del agua y prevenir la intrusión salina en acuíferos costeros.

En acuíferos costeros, el incremento de la salinidad del agua subterránea a distancias cercanas a la línea de costa, supone la tendencia usual. En México suele ser el caso observado en Yucatán, Baja California y Sonora. Sin embargo, esta tendencia no es el caso para el acuífero Costera de Veracruz en Boca del Río, ya que hay un patrón inverso entre la salinidad y la distancia a la línea de costa.

Conagua (2016) menciona que una vez actualizado el inventario de pozos en 1998, la extracción por bombeo es de 86.77 Mm³/año tras haber determinado la extracción de cada pozo. El acuífero Costera de Veracruz tiene sus extracciones más importantes en las zonas municipales con 54.6 Mm³/año. Más del 50% de dicha extracción es realizado para abastecer a la ciudad de Veracruz, ciudad donde se encuentra el municipio Boca del Río (Flores, 2007).

Este documento tratará de descifrar la ocurrencia de la intrusión salina en el acuífero Costera de Veracruz. Los objetivos de este trabajo son: (1) caracterizar la intrusión salina en el acuífero Costera de Veracruz a través de un modelo hidrogeológico conceptual y (2) Proponer un plan de en los sectores más afectados por agua salada, en el entorno Municipal de Boca del Río.

1.1- Justificación

La empresa Arcadis que es líder en consultoría de proyectos e ingeniería para el equilibrio de la comunidad y el medio ambiente, contactó con el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM con el fin de elaborar un caso de estudio en Boca del Río. El objetivo era justificar la implementación de tecnologías para agua subterránea a través del caso de estudio.

Es así como surge la necesidad de desarrollar una caracterización hidrogeológica lo más detallada posible de la zona de estudio. En especial en términos de calidad de agua y la vulnerabilidad que presenta el acuífero. Sin embargo, los parámetros obtenidos no fueron los esperados sino anómalos. Así fue como tomó más relevancia la caracterización apropiada de la zona de estudio y es lo que se intenta descifrar en éste trabajo, el por qué a la obtención de dichos parámetros, así como posibles soluciones a los distintos problemas que se presenten.

En la zona oriental del acuífero será fundamental realizar el modelo más aproximado a la realidad con el fin de poder desarrollar planes de gestión de acuífero para mejorar la sustentabilidad en la zona de estudio, así como en sus cercanías.

1.2- Localización

Boca del Río es un municipio que pertenece a la ciudad de Veracruz. Las coordenadas del sitio son $19^{\circ} 08' 32''$ N, $96^{\circ} 06' 41''$ W (CONAGUA, 2015a). El área de estudio es de aproximadamente 22 km^2 . Con el fin de mejorar el análisis e interpretación, se incluyeron el municipio Veracruz y parte de Alvarado. La figura 1.1 muestra la ubicación del municipio Boca del Río, así como los pozos muestreados en dicha región. Ambos municipios adicionales están prácticamente incluidos dentro del acuífero Costera de Veracruz.

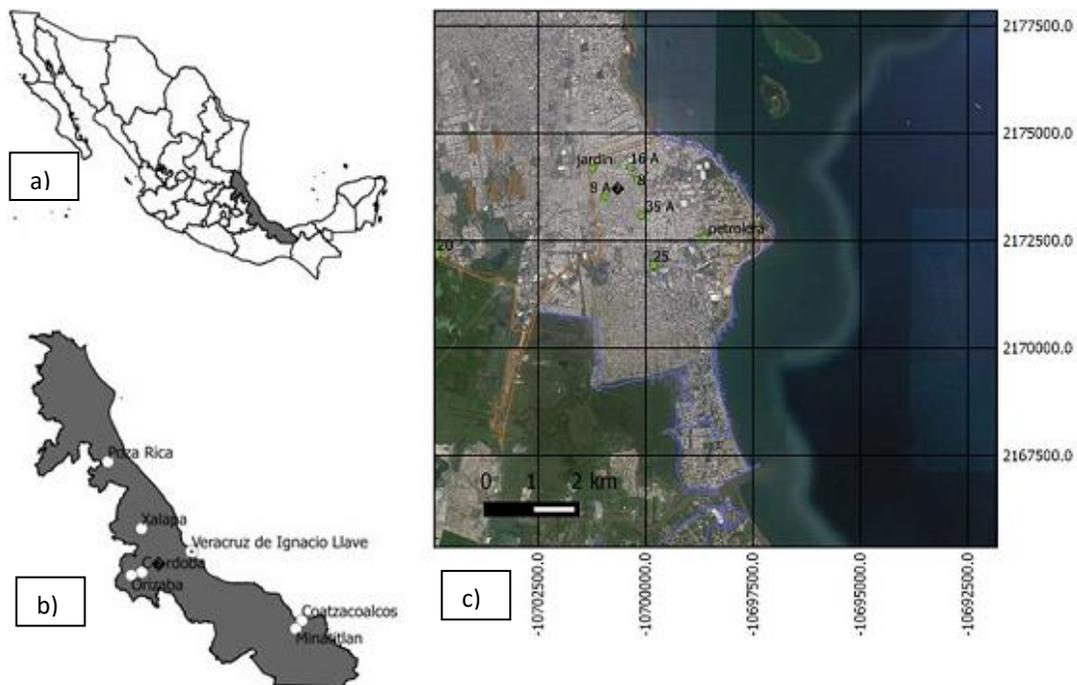


Figura 1.1 (a) Ubicación del estado de Veracruz, (b) Ciudades de Veracruz, (c) Municipio de Veracruz (marrón) y Boca del río (azul), pozos visitados (puntos verdes)

1.3- Población y actividad económica.

El municipio de Boca del Río cuenta con una población total de 142,207 habitantes donde 75,490 habitantes son mujeres y el resto 66,717 son hombres. Alrededor del 96% de la población habita la zona urbana mientras que el resto se encuentra en un ambiente rural. La figura 1.2 muestra la variación de la población a lo largo de los últimos veinte años (SEFIPLAN, 2016).



Figura 1.2 Población vs. Tiempo

La población económicamente activa para los sectores primario, secundario y terciario corresponde con el 0.7%, 20.8% y el 77.2% respectivamente. Los tres sectores representan aproximadamente un total de 61,402 individuos. La población no económicamente activa se divide en estudiantes (18,431), incapacitados permanentes (24,944), jubilados (8,719) y quienes se dedican a quehaceres del hogar (24,944) (SEFIPLAN, 2016).

La ganadería no es la actividad central de Boca del Río ya que su producción de ganado bovino, porcino, caprino, ovino y de aves es de producción baja en comparación a los municipios restantes del estado. La agricultura es también baja. Lo más destacado en la zona son pastizales y en particular actividades pesqueras, como mojarra, ostiones, camarones y almejas entre muchos otros que son mencionados por (Inegi, 2014).

2.- Marco teórico de referencia

2.1- Definición de acuíferos costeros

Los acuíferos costeros son acuíferos de agua dulce que interactúan hidráulicamente con zonas que tienen agua de mayor densidad, en planicies costeras e islas. Suelen ser la única fuente de agua potable en planicies costeras (Custodio, 2002).

2.2- Intrusión de agua salada

La intrusión de agua salada se define como el transporte de aguas salinas hacia zonas previamente ocupadas por agua dulce (Cheng et al., 1999). La intrusión de agua salina a agua dulce puede ser tanto temporal como permanente (Custodio y Llamas, 1976). El incremento de salinidad en acuíferos costeros se puede deber a diversas fuentes. Estas fuentes pueden ser tanto naturales como antropogénicas (Kumar, 2001). En la figura 2.1 se muestran las principales fuentes de salinidad sin embargo, otros autores como (E Custodio, 2002) mencionan otras fuentes adicionales como dispersión del agua de mar debido a fuertes vientos en la línea de costa, drenaje de minas e instalaciones de enfriamiento. Las condiciones a las que está sujeto un acuífero implican que puede haber presente uno o más mecanismos de los mencionados anteriormente que estén afectando el acuífero. Es por ello que la identificación acertada de la intrusión de agua salada es crucial, pues los planes de prevención y remediación se desarrollan sobre la precisa identificación de la fuente de salinidad (Prinos, 2013).

La intrusión salina en México ha sido estudiada en varios acuíferos (Bauer-Gottwein et al. 2011; Cardona et al. 2004; Steinich et al. 1998). El común denominador que se presenta en la mayoría de estos trabajos es la combinación de una gestión deficiente, así como aseveraciones erróneas con respecto a la fuente de salinidad, lo que ha ocasionado los mayores problemas de salinización.

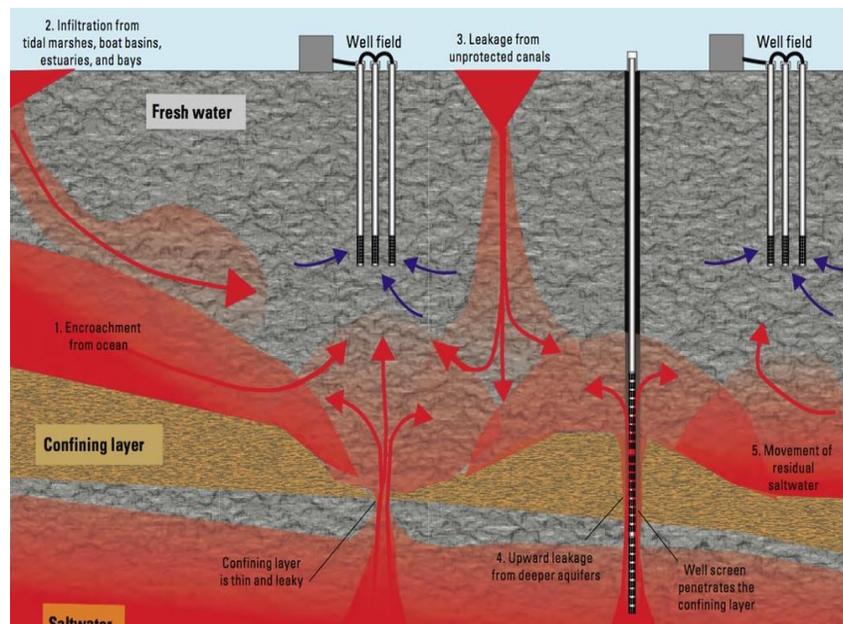


Figura 2.1 Fuentes de agua salada (Prinos 2013)

Desde hace ya más de un siglo, distintos autores han realizado estudios con relación a intrusión salina (Ghyben 1889; Herzberg 1901; y Glover 1965). Estos se basan en la determinación de la posición de

la interfaz agua dulce-agua salada por medio de modelos analíticos (sección 2.3). A dicha interfaz se le denomina cuña de agua salada (figura 2.2).

La cuña de agua salada es una masa de agua salada en forma de cuña que está apoyada en la base del acuífero, con el vértice hacia el continente. Dado que el agua dulce y el agua salada son miscibles, implica que existe una zona de transición gradual y que es gobernada por la densidad del agua y propiedades hidráulicas del fluido original (Custodio y Llamas, 1976). La zona de transición incluye los límites superior e inferior de la cuña de agua salada.

Una buena aproximación de la posición de la interfaz es importante ya que, se pueden optimizar los caudales de extracción y prevenir riesgos de salinización. La posición de la interfaz de agua salda se puede estimar a través de diferentes métodos. Los más comunes en la práctica son los métodos directos y luego los geofísicos, pero los teóricos ya mencionados (Ghyben-Herzberg, Glover) son utilizados con alta frecuencia.

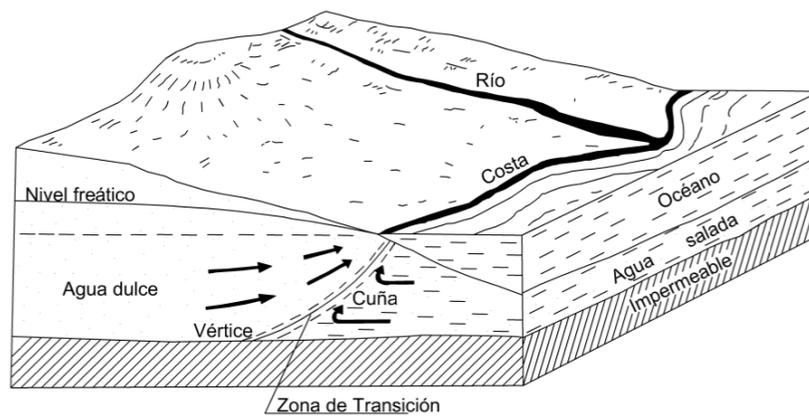


Figure 2.2 (Custodio y Llamas, 1976)

El movimiento del agua hace que la zona de transición sea dinámica. Los movimientos de dicho fluido dependen de las diferencias de densidad y de los cambios en la carga hidráulica. El agua dulce tiene una viscosidad menor que el 30% que el agua salada a la misma temperatura (Custodio y Llamas, 1976). La tabla 2.1 muestra los valores de sólidos totales disueltos según Davis y Dewiest (1971) para distinguir los diferentes tipos de agua.

Concentración	Tipo de agua
0-1000	Agua dulce
1000-10000	Agua salobre
10000-100000	Agua salada
Mayores a 100000	Salmuera

Tabla 2.1 Tipos de agua (Davis y DeWiest, 1971)

2.3 Métodos Analíticos

2.3.1 Modelo Ghyben-Herzberg

Como se mencionó antes, el estudio de agua salada subterránea ha estado presente desde hace cien años. Badon-Ghyben (1888) y Herzberg (1901) descubrieron por separado que la cuña de agua salada (figura 2.3) se encuentra a una profundidad de 40 veces la carga hidráulica del agua dulce.

El modelo Ghyben-Herzberg es explicado (Cheng et al., 1999):

Carga hidráulica del agua salada:
$$h_s = \frac{p}{\rho_s * g} + z \dots \dots \dots (1)$$

Carga hidráulica del agua dulce:
$$h_f = \frac{p}{\rho_f * g} + z \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

P es presión, g es la aceleración de la gravedad, ρ_s y ρ_f corresponden a las densidades de agua salada y dulce respectivamente. Se descarta la presión de poro porque el equilibrio dinámico necesita que p sea continuo a lo largo de la interfaz agua dulce-agua salada. (3) se obtiene tras eliminar de p de (1) y (2) entonces:

$$\rho_f h_f = \rho_s h_s + (\rho_s - \rho_f) \xi \dots \dots (3)$$

Donde:

ξ profundidad de la interfaz al nivel freático. Ghyben-Herzberg asumen que el agua salada es inactiva, lo que implica que la presión se vuelve hidrostática, por lo que en (1) $h_s=0$. Esto reduce (3) a:

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = \alpha h_f \dots \dots (4)$$

Donde:

α es adimensional y representa la relación de las densidades, tiene un valor aproximado de 40 debido a que las densidades promedio de agua salada y agua dulce son 1.25 y 1.00 [g/cm³] respectivamente, en condiciones ideales.

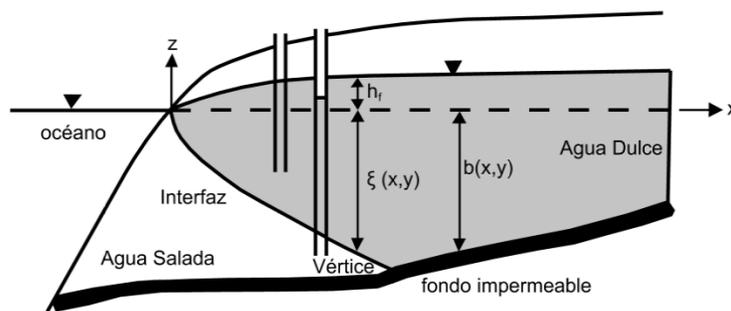


Figura 2.3 Interfaz agua dulce-agua salada (Cheng et al., 1999)

2.3.2- Modelo de Glover

Glover (1964) formuló un método que integra las componentes del flujo vertical y la descarga de agua dulce al mar (Fetter, 2001). La ecuación (5) representa también un patrón de flujo (figura 2.4) cercano a la costa.

$$z = \sqrt{\frac{G^2 q'^2}{K^2} + \frac{2Gq'x}{K}} \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

Z es la profundidad de la interfaz al nivel freático, G equivale $\alpha \approx 40$ (ver Ghyben-Herzberg), q' es la descarga del acuífero hacia la costa (Fetter, 2001).

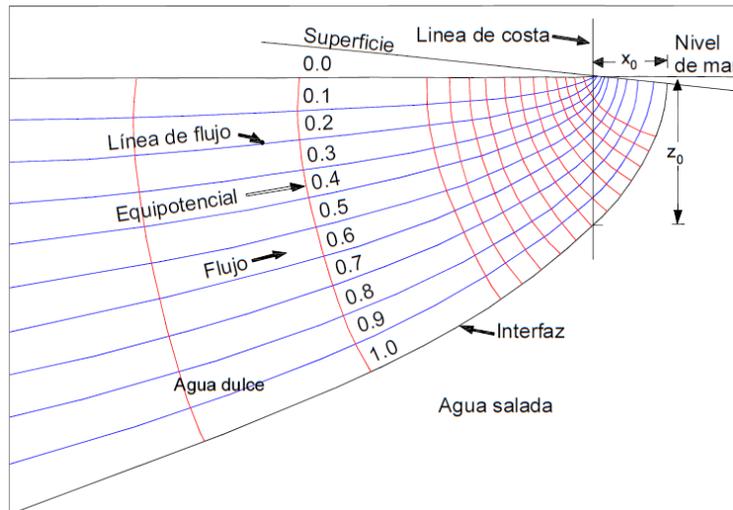


Figura 2.4 Flujo de agua dulce en una zona costera (Glover,1964)

La amplitud de salida, conocida como x_0 , se calcula:

$$x_0 = -\frac{Gq'}{2K} \dots\dots\dots (6)$$

Finalmente, el nivel piezométrico a una distancia (x) de la costa:

$$h = \sqrt{\frac{2q'x}{GK}} \dots\dots\dots (7)$$

2.2.3- Nuevos modelos

Yongcheol Kim (2016) crearon un nuevo método de monitorear el cambio de la interfaz agua dulce-agua salada lo largo de un tiempo (t). El desempeño del modelo, así como los modelos recursivos de

predicción pueden ser útiles para la estimación del nivel freático a largo plazo, así como de la interfaz agua dulce-agua salada.

2.4 *Métodos geofísicos*

El mapeo de las plumas de agua salada a través de perforación convencional es muy difícil y costoso. Los métodos geofísicos son de gran ayuda para los hidrogeólogos debido a la información que recopilan y es utilizada posteriormente para elaborar un marco físico de la intrusión salina así como identificar las diferentes unidades presentes en el área de estudio (Cheng et al., 1999).

Los métodos indirectos no se restringen sólo al campo de la geofísica ya que métodos de teledetección y SIG se están utilizando hoy en día para delimitar las rutas de intrusión salina (Dhakate et al., 2016). Los métodos geofísicos se pueden categorizar como invasivos y no invasivos; la tabla 2.1 muestra algunos ejemplos de dichos métodos. Todos los métodos geofísicos tienen limitaciones en cuanto a la resolución por lo que es importante definir qué equipo se puede usar en el sitio de estudio, así como la precisión que se quiere obtener del mismo (Jansen, 2011).

No invasivos	Invasivos
Métodos eléctricos	Registros eléctricos
Resistividad de corriente directa	Uso de registros de pozo
Métodos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia	Prospección geofísica integrada
Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo	

Tabla 2.1 Métodos geofísicos para mapeos de agua salina subterránea

Tras observar la tabla 2.1 se puede apreciar que los métodos geofísicos con mayor efectividad para la gestión de agua subterránea son los eléctricos y electromagnéticos. Estos métodos son capaces de localizar la cuña de agua salada, así como de estimar el espesor del acuífero (Souplos, 2009).

El agua salada tiene una mayor concentración de sodio y cloro que el agua dulce. Esta diferencia se aprecia muy bien a través de métodos eléctricos con los que se calcula la conductividad de un volumen y también se delimita la calidad de agua (Cheng et al., 1999). Los métodos resistivos también se aplican con mucho éxito para caracterizar la interfaz de agua salada como se menciona en Wilson et al. (2006).

Los métodos geofísicos pueden delimitar las plumas de agua salada en el subsuelo en tres dimensiones más rápido y barato que realizando perforaciones. Es importante también correlacionar la información geofísica con la geológica observada en pozo para tener una buena calibración de los instrumentos y distinguir cambios estratigráficos de variaciones en salinidad (Jansen, 2011).

2.5- Caudales máximos de explotación en zonas costeras

Es de gran importancia la variación de la carga hidráulica producidas por bombeo, debido a que es uno de los factores que gobiernan la movilidad del agua. Bajo el supuesto de que exista en un acuífero un nivel de agua salada inferior, puede ocurrir un fenómeno conocido como cono de agua salada figura 2.5 (Custodio y Llamas, 1976). Dicho evento depende de la tasa de extracción de agua dulce, el flujo regional, la distancia a la costa y la posición del pozo sobre la interfaz (Jakovic et al., 2016). Si se incrementa la penetración del pozo, el caudal de extracción o la combinación de ambos, el agua del pozo es más propensa a llegar a una salinización máxima.

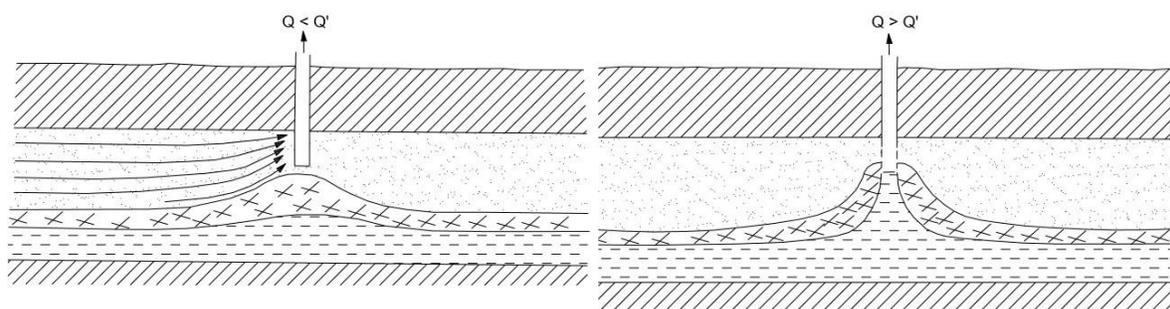


Figura 2.5 La figura muestra la formación de conos de agua salada y salobre debajo un pozo parcialmente penetrante. Si el caudal es menor que el caudal crítico (Q_c) y a un caudal mayor en el lado derecho. En el lado izquierdo se observa como la extracción a un caudal menor que Q_c limita el ascenso del cono de agua salada. En cambio, del lado derecho se muestra el ascenso del cono de agua salada hasta el pozo debido a una extracción mayor a Q_c (Custodio y Llamas, 1976).

Tras ver los efectos mostrados en la figura 2.5, se entiende entonces que hay un ascenso del cono de agua salada asociado a un caudal Q_c . Se puede determinar a partir de dicho ascenso un caudal crítico Q_c que sirve de referencia para establecer caudales de bombeo menores al crítico para prevenir la subida de sal al pozo (Custodio y Llamas, 1976). La figura 2.6 muestra los efectos del caudal de extracción sobre el ascenso del cono de agua salada.

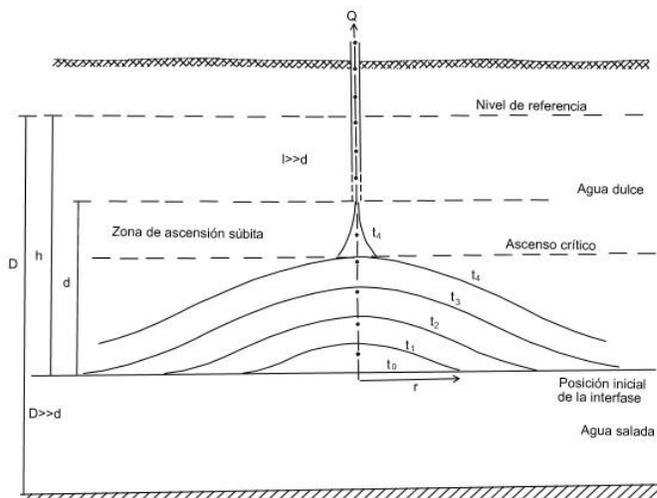


Figura 2.6 Formación del cono salino ascendente modificada (Schmorak y Mercado, 1969) en (Custodio y Llamas, 1976)

El ascenso se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\xi(r)_{max} = \frac{Q}{2\pi k_h d \alpha} \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

ξ = ascenso sobre la interfaz inicial

R = distancia radial desde el eje de pozo

T = tiempo desde el inicio del bombeo

Q = caudal bombeado

D = distancia desde el final de la zona filtrante a la posición inicial de la interfaz

$\alpha = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_d$

K_v y k_h = permeabilidades vertical y horizontal

Dado que el ascenso máximo es proporcional al caudal, se despeja Q considerando que $\xi(r)_{max}$ debe ser $d/3$. La ecuación para caudal máximo crítico de extracción para tiempos infinitos, se plantea como:

$$Q_{max} = \frac{2\pi k_h d^2}{3\alpha} \dots \dots \dots (9)$$

2.6- Tecnologías para aguas subterráneas en acuíferos costeros

Hay tres aspectos que gobiernan la reversibilidad de la intrusión salina: las condiciones de recarga, la cantidad de agua salina que intrusionó y la geología del acuífero (Han et al., 2015). Estos aspectos gobiernan periodos tanto rápidos como lentos para acuíferos afectados por intrusión salina. Es por ello que hay diversos mecanismos que se han implementado para restaurar los acuíferos. Algunos de estos métodos son la reducción de las tasas de extracción, la recarga artificial, la extracción de agua salda, y también un aumento en la recarga natural (Kumar, 2001).

Sin embargo, el hecho de que exista esta variedad de parámetros ha ocasionado que se desarrollen tecnologías subterráneas que incrementen y protejan el volumen de agua dulce en un acuífero costero. Estas tecnologías (figura 2.7) se pueden utilizar en diferentes condiciones hidrogeológicas, lo que es una solución atractiva para acuíferos costeros alrededor del mundo. Las tres tecnologías (Freshmaker, ASR-Coastal, Freshkeeper) propuestas por Zuurbier et al. (2016) tienen como objetivo el almacenaje temporal y seguridad de los pozos de extracción. El recuadro inferior de la figura 2.7 muestra en (a) el Freshmaker, en (b) el ASR-Coastal y en (c) el Freshkeeper.

A pesar de que las tres tecnologías tienen la misma meta de mejorar la calidad del agua del subsuelo, cada tecnología opera de manera diferente. Por ejemplo, (a) y (b) utilizan recarga artificial mientras que (c) no lo hace, (a) utiliza pozos horizontales en tanto que (b) y (c) implementan múltiples pozos parcialmente penetrantes. Estas tecnologías para aguas subterráneas son relativamente nuevas, pero no se ha limitado su estudio. Trabajos previos (Van Ginkel et al., 2014; Olsthoorn, 2014) reportan diferentes pruebas similares a la expuesta anteriormente, en las que mencionan tener resultados positivos.

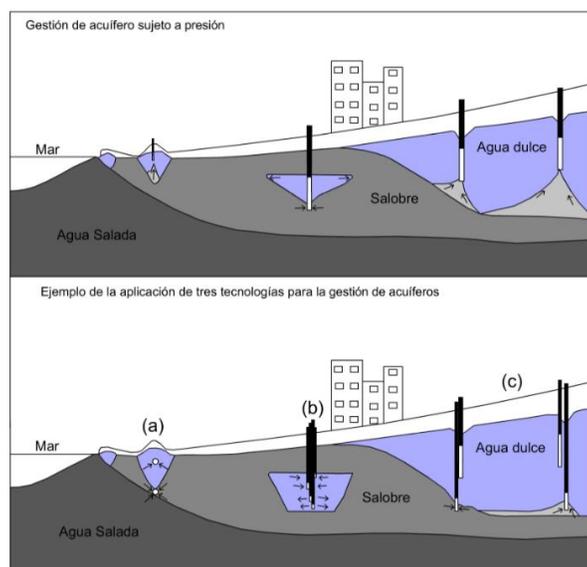


Figura 2.7 Diferencia de utilizar las tecnologías vs. no utilizarlas. Las tecnologías mostradas en el recuadro inferior de la figura son (a) Freshmaker, (b) ASR-Coastal y (c) Freshkeeper (Zuurbier et al., 2016).

3.- Metodología

3.1- Estructura

Durante el proyecto se siguió una metodología de trabajo. A continuación, se muestra en la figura 3.1, un diagrama de flujo que representa la metodología utilizada.

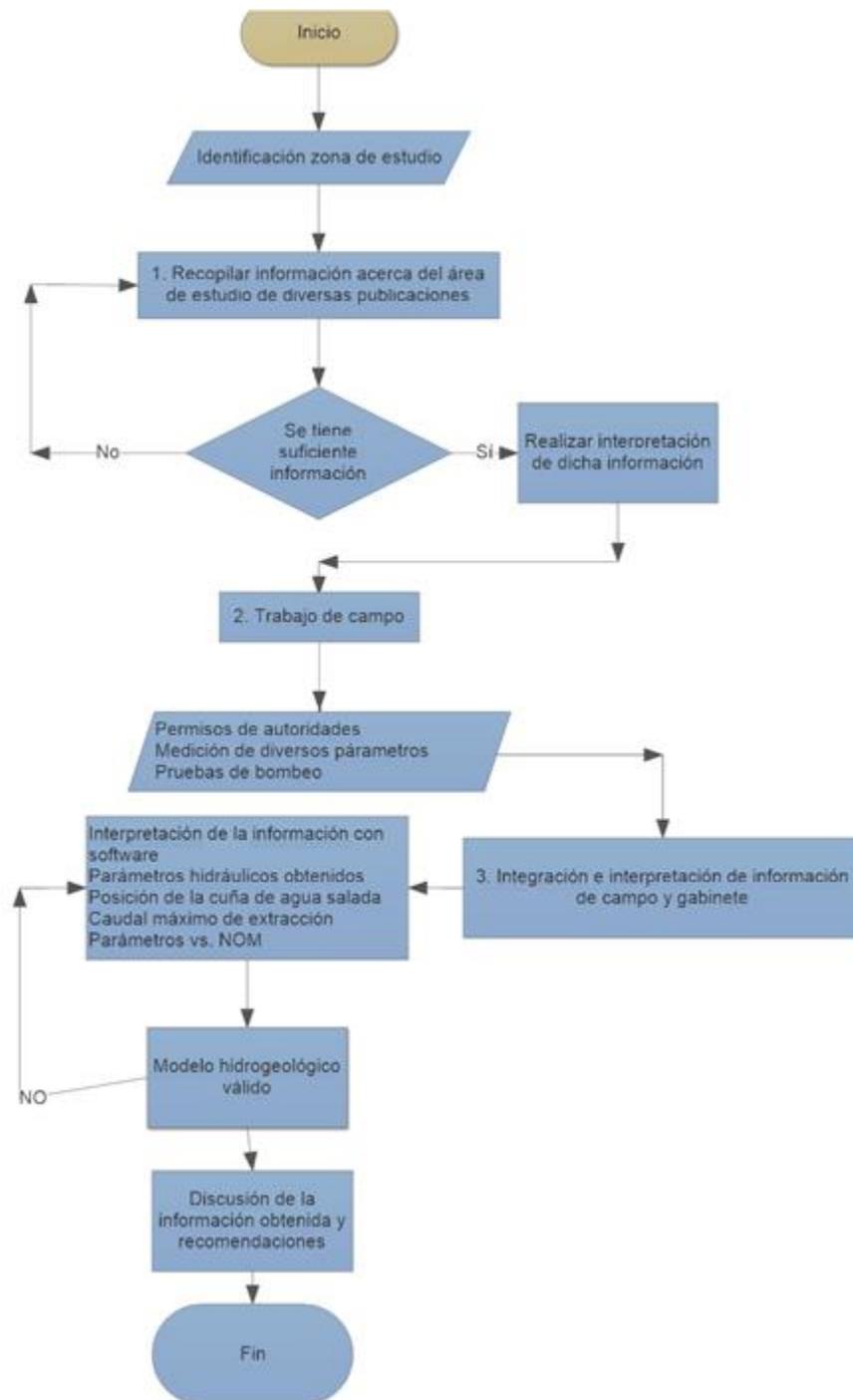


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología del presente trabajo

3.2- Recopilación de información

El paso más importante a seguir durante la elaboración de este trabajo fue el reunir toda la información disponible acerca del área de estudio. La información recopilada está compuesta por publicaciones que abarcan instituciones públicas, privadas y académicas donde se incluyen artículos, informes, libros, reportes técnicos, tesis y cartas geológicas.

El primer capítulo está basado en su mayoría por la información obtenida por INEGI. El marco teórico de referencia fue basado principalmente en dos libros (Cheng et al., 1999) y (Custodio y Llamas, 1976). En cambio, el capítulo de hidrogeología y geología de la zona de estudio está soportado por tesis, reportes técnicos de CONAGUA (2015a), cargas geológicas SGM (2002), informes como el de Exploración y Gil (2013) y libros como Pereyra Díaz et al. (2010). El resto del texto se desarrolló con la información que fue obtenida en campo.

3.3- Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en tres etapas diferentes. La primera etapa (mayo, 26-28, 2015) consistió en una visita de reconocimiento al área de estudio. En dicha visita se contactó con las autoridades del municipio, así como con el Sistema de Aguas y Saneamiento (SAS), quienes proporcionaron la información disponible del área.

En dicha etapa se visitaron 7 pozos con la ayuda de personal del SAS. En los pozos se tomaron los datos ubicación con receptor GPS GARMIN. La profundidad al nivel dinámico (PND) fue medida con una sonda convencional (figura 3.2). Los parámetros físico-químicos del agua: Temperatura [C], potencial de hidrógeno (ph), potencial Redox, sólidos disueltos totales (SDT), oxígeno disuelto (OD), salinidad y conductividad eléctrica (C.E.) [$\mu\text{S}/\text{cm}$] se midieron con lector multiparámetros Hanna HI9828 (figura 3.2).



Figura 3.2 a) Sonda convencional, b) Hanna HI9828.

La segunda etapa (julio 28- 02 agosto, 2015) fue programada en época de lluvias con la intención de observar cambios en los parámetros debido a la alta recarga natural. Se visitaron nuevamente los pozos de la etapa uno y se le añadieron 15 pozos nuevos visitados en esta etapa. A todos los pozos se les realizaron las mismas mediciones que se hicieron en la etapa uno. Los pozos adicionales no pertenecen al municipio de Boca del Rio, pero ayudan a la elaboración de una mejor interpretación de lo que ocurre en la zona. Por medio de la construcción de una red de flujo y otra serie de materiales para un análisis más completo. La ubicación de los aprovechamientos en el área de estudio se muestra en la figura 3.3.

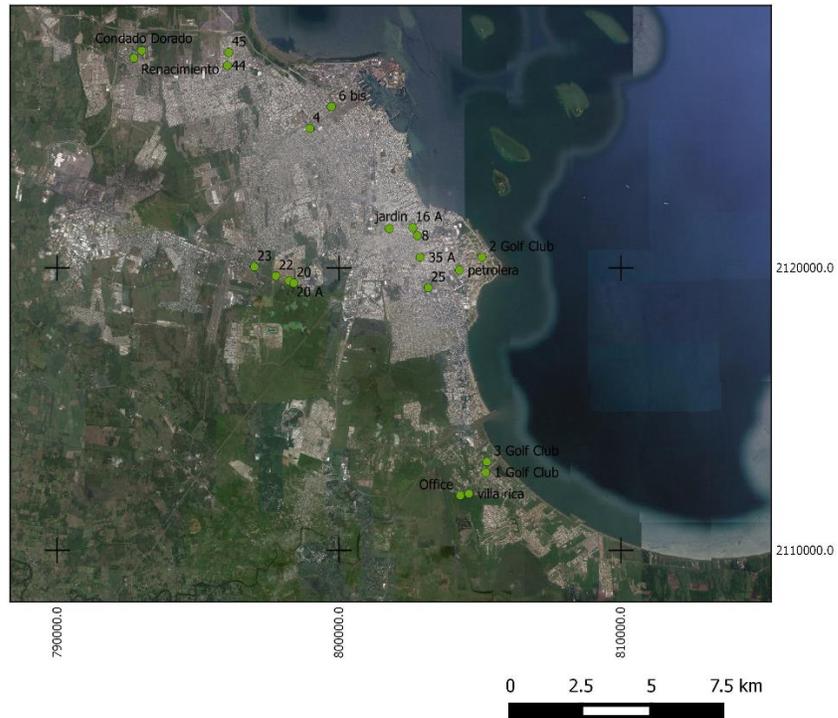


Figura 3.3 Ubicación de los aprovechamientos en la zona de estudio.

Finalmente, la tercera etapa (junio, 08-10, 2016) se realizó una prueba de bombeo en uno de los pozos con transductores levellogger y barologger. El levellogger mide datos de temperatura y cambios en la dimensión de la columna de agua mientras que el barologger registra la temperatura y presión ambiental.

3.4 Prueba de bombeo

Las pruebas de bombeo en acuíferos son utilizadas para obtener una buena aproximación de los parámetros hidráulicos de un acuífero. El cálculo de la interfaz de agua dulce-agua salada, así como el de caudal de máxima extracción depende de los parámetros hidráulicos, por lo que concretar una prueba de bombeo fue crucial para el presente trabajo.

Para realizar la prueba de bombeo en un pozo de Boca del Río hacía falta una orden federal. Dado que el alcance de este trabajo no era tal, se contactó con el club de golf La Villa Rica y se logró pactar una prueba de bombeo para uno de los pozos dentro del club de golf. La prueba de bombeo se realizó en el pozo 3 Golf Club cuyo diseño se muestra en la figura 3.4. El día 8 de julio de 2016 se midió el nivel dinámico tras meses ininterrumpidos de bombeo. Previo a la prueba de bombeo, se permitió una recuperación de 7 horas. Este pozo fue el elegido debido a sus altos niveles de salinidad. La prueba de bombeo comenzó a las 7:00:00 am del día 9 de julio de 2016 y concluyó el mismo día sobre las 17:32:00 pm.

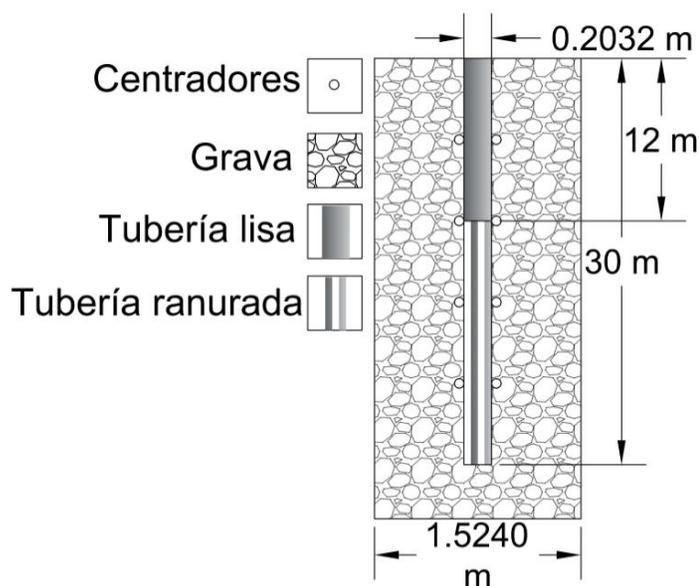


Figura 3.4 Diseño del pozo (3 Golf Club) donde se realizó la prueba de bombeo. El pozo cuenta con una tubería de 12 [m] lisos y 18 [m] ranurados. La tubería tiene un diámetro de 0.2032 [m]. La bomba del pozo se encuentra a los 24.8 [m] de profundidad.

El levellogger y barologger fueron programados (figura 3.5) a las 6:30:00 am y colocados en su posición respectiva a las 6:45:00 am. Cada instrumento registró medidas en intervalos de tres segundos. Fue una prueba realizada a caudal constante de 1,019.52 [m³/d] durante 7 horas, el resto del tiempo se utilizó para medir recuperación.

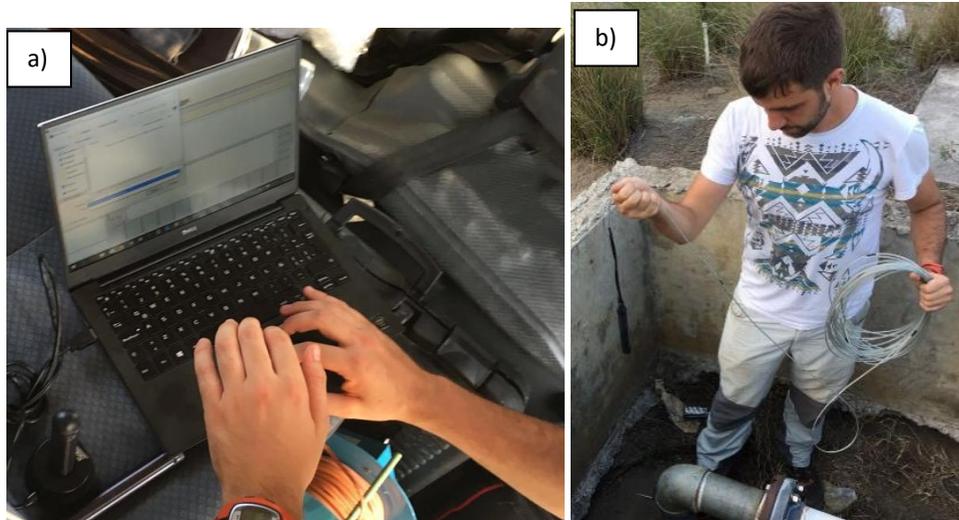


Figura 3.5 a) Programación de los transductores con software y b) Colocación del levellogger en el pozo a una profundidad de 15 [ml] y el barologger se colocó en un envase en el suelo.

Una vez capturada la información, ésta fue procesada en AQTESOLV (Duffield, 2007). Se trata de un paquete especial para la interpretación de pruebas de bombeo. A través de dicho software se pudieron estimar los valores de transmisividad y posteriormente de conductividad. Se interpretó la prueba de bombeo en dos fases distintas, la fase de bombeo y la fase de recuperación.

Se analizaron los datos con el modelo de Cooper y Jacob (1946), identificando previamente el sector de flujo radial con ayuda de la derivada del abatimiento. Para la recuperación, se trabajó con el tiempo de Agarwal (1980) que, tras una ligera transformación en los datos, permite interpretar las pruebas de recuperación como pruebas de bombeo. Con esta metodología se pudo obtener una comparativa de los parámetros hidráulicos obtenidos para cada fase.

Se utilizó QGIS (2009) para la obtención de áreas, distancias y elaboración de redes de flujo. Una vez que se realizaron los dos procesos anteriores, se procedió a compilar toda esa información bajo los métodos analíticos para así poder determinar la posición de la cuña de agua salada y el cálculo del caudal óptimo de extracción. Los parámetros de calidad de agua fueron procesados con el ENVIROINSITE (2016).

4.- Geología e Hidrogeología

4.1- Geología regional

Hay una gran cantidad de eventos geológicos que influenciaron la consolidación de la zona de Veracruz. Sin embargo, dos eventos de los más importantes para el área de estudio serían: la formación de la planicie costera del Golfo durante el Eoceno y el inicio del volcanismo la Faja Volcánica Transmexicana entre el Mioceno Tardío y Plioceno Temprano (Rodríguez & Morales, 2010) El acuífero pertenece a la provincia geológica llamada Cuenca Deltaica de Veracruz (Ortega-Gutiérrez, 1992). En Exploración & Gil (2013) se describen las diferentes formaciones (Tabla 4.1) que conforman el acuífero.

Periodo	Formación	Litologías
Cretácico Inferior	Xonomanca Tamaulipas Inferior	Calizas, calizas de plataforma y calizas pelágicas
Cretácico (Abliano- Cenomaniano)	Orizaba	Calizas de mudstone-grainstone con miliolidos
Cretácico Superior (Coniaciano- Santoniano)	Caliza Maltrata San Felipe Atoyac	Calizas arcillosas, lutitas aceitíferas y margas
Paleoceno	Velasco	Lutitas
Eoceno Tardío	Tantoyuca	Conglomerados de calizas, pedernal, areniscas y margas

Tabla 4.1 Formaciones que conforman el acuífero (Exploración y Gil, 2013)

El área de estudio está ubicado en la Cuenca Terciaria de Veracruz, formada por una depresión de dirección NW-SE (Mendoza Millán, 2015). CONAGUA (2015) reporta que en general, el acuífero está compuesto por rocas volcánicas y sedimentarias. Los sedimentos de origen continental se clasificaron con tamaños de grano entre arcillas y bloques. La descripción de la geología del acuífero en una dirección W-E se encuentran rocas de origen volcánico, areniscas, conglomerados, depósitos lacustres, depósitos eólicos y depósitos de paleocanal. Flores et al. (2010) proponen una sección hidrogeológica (figura 4.2) basada en topografía, geología, correlación estratigráfica de pozos profundos y elevación del nivel estático. Es una sección de 80 km de largo con dirección NW-SE y alcanza profundidades de hasta 500 m.

La zona urbana del municipio Boca del Río se desarrolló en el límite oriental del acuífero, sobre los depósitos eólicos y de paleocanal. El espesor promedio de los medios granulares es del orden de 200 m en el área de estudio, lo que resalta la importancia de entender el medio pues los pozos revisados son prácticamente someros.

Flores (2007) menciona que las diferentes cartas elaboradas por Coremi (1994), SARH (1980 a), Morales (1979) y SARH (1980b) no son consistentes entre ellas en cuanto a los límites de las diferentes litologías. Es por ellos que para éste trabajo se utilizó la información más reciente provista por el SGM

(2002) y con los límites del acuífero dado por CONAGUA (2016) se realizó la figura 4.1 para ilustrar la geología general del acuífero y la figura 4.3 para la geología local del área de estudio.

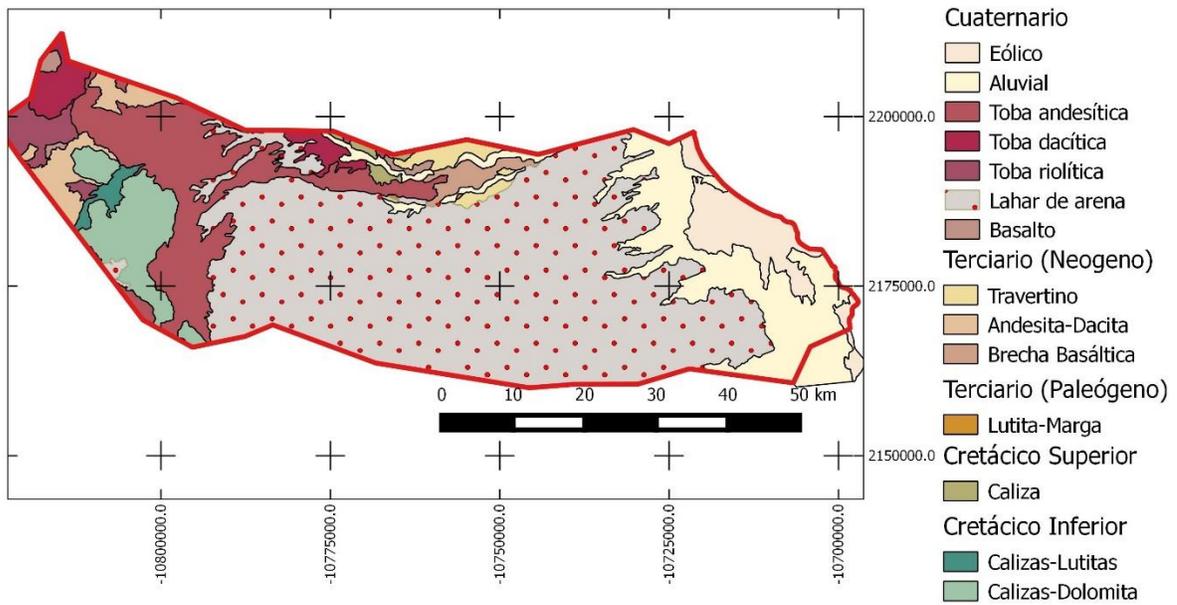


Figura 4.1 Geología del acuífero conforme al (SGM, 2002)

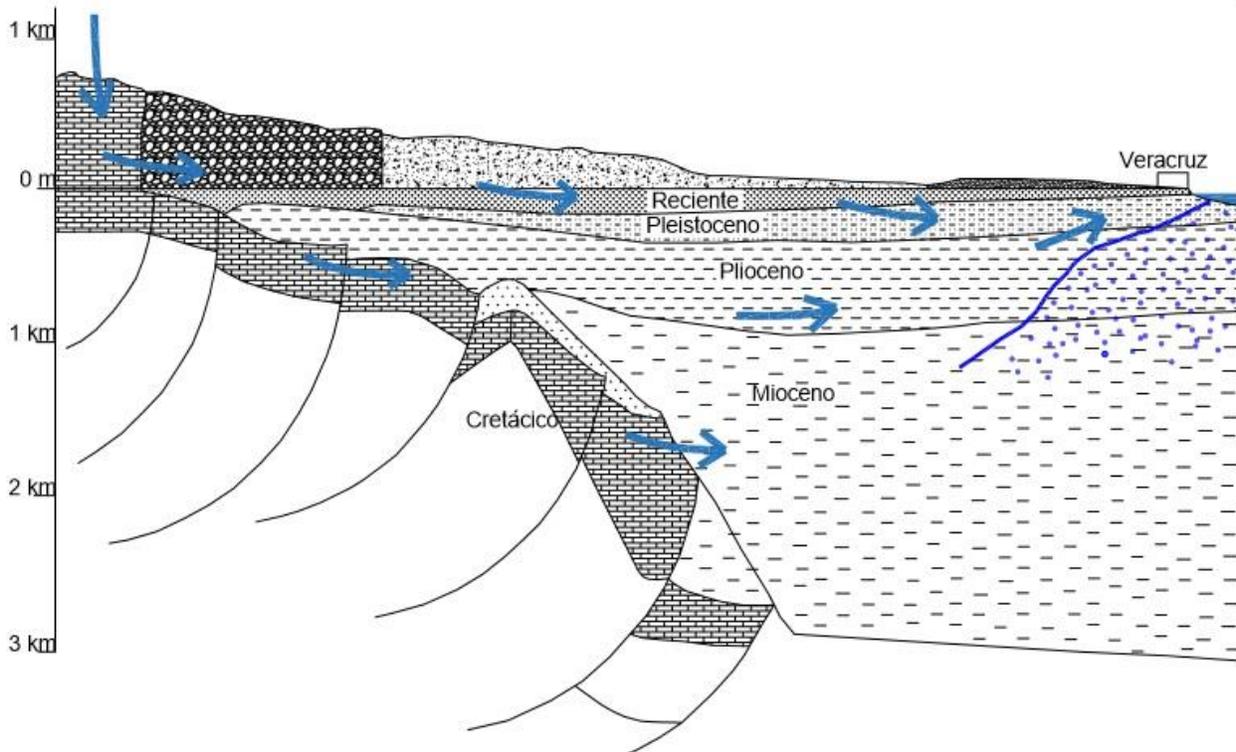


Figura 4.2 Sección hidrogeológica conceptual (Flores et al., 2010)

4.1.1- Geología local

La geología del área de estudio (figura 4.3) está compuesta por depósitos eólicos, aluviales y abanicos aluviales según lo reportado por CONAGUA (2016). Los depósitos eólicos están clasificados como bien redondeados. La descripción menciona un sistema de dunas paralelas a la línea de costa orientadas N-S. La figura 3.2 muestra la geología local conforme al SGM (2002), que confirma de alguna manera lo identificado por Morales (1979) quien describió la zona costera con elementos como: dunas, aluviales, conglomerados y areniscas.

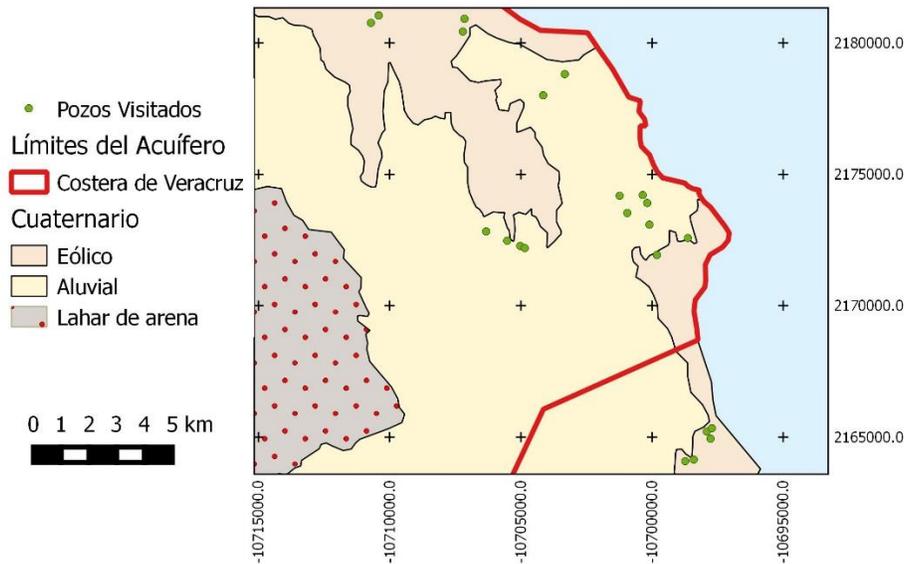


Figure 4.3 Geología del área de estudio (SGM, 2002)

4.2- Clima

El clima del área ha sido monitoreado por una red de estaciones meteorológicas que son manejadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). El área tiene un clima variante en dirección E-W. Climas cálidos a subhúmedos por la zona costera y climas muy fríos por la zona montañosa en el límite occidental. La lluvia es un factor importante pues tiene un promedio anual de 1,247 mm. La evaporación potencial media varía entre 723 a 1,962. Sin embargo, el valor apropiado para el área de estudio es mayor al promedio debido a su cercanía a la costa (CONAGUA, 2012).

Solamente cuatro estaciones meteorológicas (figura 4.4) son consideradas en este trabajo debido a su cercanía y relación con la zona de estudio. En conjunto, las estaciones han recopilado información de la zona sobre temperaturas y precipitación alrededor de 50 años. La temperatura media anual para la zona de estudio es de 28 °C.

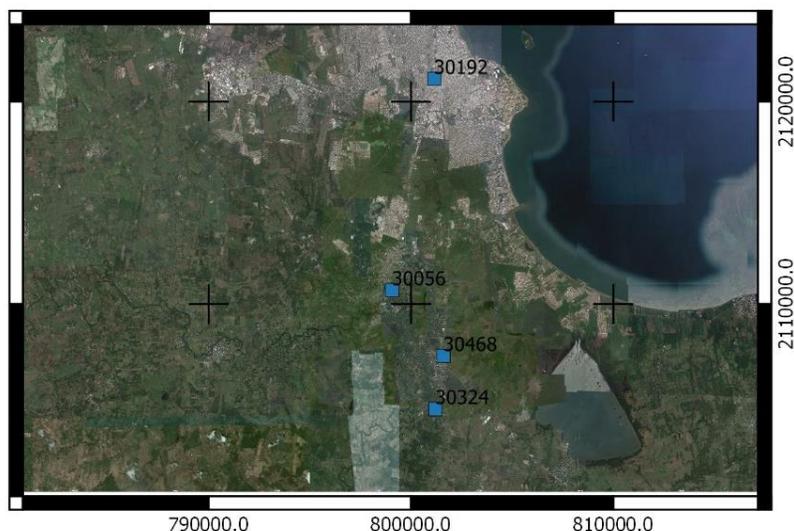


Figura 4.4 Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. La estación 30192 proporciona la información más próxima del área de estudio.

4.3- Hidrología

4.3.1- Hidrología superficial

El Consejo del Sistema Veracruzano del Agua dividió el territorio de Veracruz en cinco regiones principales llamadas: Coatzacoalcos, Centro, Papaloapan, Bajo Pánuco y Norte de Veracruz. El acuífero 3006 (clave otorgada por CONAGUA) forma parte de la región hidrológica 28 (Papaloapan). La escorrentía de superficie es por ríos y lagunas permanentes.

La Región del Papaloapan cuenta con dos cuencas principales, La Antigua y Río Jamapa; dichas cuencas corresponden con los límites N-S del acuífero en el área de estudio. La Antigua está en el límite norte y el Río Jamapa el en límite sur. Ambos ríos descargan en el Golfo de México. En el área de estudio se encuentran también grandes cuerpos de agua en forma de lagunas. A pesar de que hay una cantidad importante de lagunas, la más importante debido a su cercanía con el área de estudio es la de Mandinga (CONAGUA, 2016).

El río Jamapa tiene una extensión de 3,912 km² y abastece de agua al Municipio de Boca del Río, Veracruz, y Medellín de Bravo (CONAGUA, 2016). El modo de abastecimiento es a través de un acueducto conocido como El Tejar-Veracruz (Pereyra Díaz et al., 2010). Por otro lado, el río La Antigua tiene una extensión de 2,827 km² y cuenta con una planta hidroeléctrica que tiene una capacidad de producción de dos megawatts y se encuentra cerca de Teocelo, Veracruz (Pereyra Díaz et al., 2010).

4.3.2- Hidrología subterránea

El acuífero Costera de Veracruz tiene una extensión total de 3,059 km². se encuentra limitado por los acuíferos Valle de Actopan y Jalapa-Coatepec al norte, Cotaxtla al sur, Libres-Oriental y Perote-Zalayeta al oeste y el Golfo de México al este (CONAGUA, 2016) (figura 4.5).



Figure 4.5 Fronteras del acuífero Costera de Veracruz (rojo) (CONAGUA 2016)

CONAGUA (2016) reporta que el acuífero es libre, heterogéneo y anisotrópico. La parte superior del acuífero está conformada por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos, areniscas y conglomerados. El espesor promedio de los sedimentos eólicos es de 30 m. Debido a la alternancia que hay entre arcillas y material calcáreo, hay regiones en la parte superior del acuífero donde puede presentar carácter de semi-confinado. La parte inferior del acuífero está compuesta por calizas y rocas volcánicas. Dichas rocas tienen porosidad secundaria debido a procesos de fracturamiento posteriores a su formación.

El área de recarga del acuífero se encuentra en el límite con el valle, pero no se han hecho estudios acerca de su potencial. El flujo preferencial del acuífero es en dirección W-E a través de un medio granular que favorece la descarga hacia la zona costera y también hacia las lagunas. El acuífero tiene un espesor saturado entre 5-50 m. La profundidad al nivel freático en la zona costera es muy somera, pero aumenta considerablemente al oeste debido a los cambios en la topografía (CONAGUA, 2016).

CONAGUA (2015a) reporta valores de los parámetros hidráulicos para la zona de estudio. Los valores de transmisividad son de $10 \cdot 10^{-3}$ [m²/s] y no reporta valores de conductividad. Un coeficiente de almacenamiento de 0.025 para las dunas y del 0.085 para las gravas y arenas. Sin embargo, la conductividad hidráulica están entre $0.01 \cdot 0.86 \cdot 10^{-3}$ [m/s] según un estudio de (CONAGUA, 2015b) que reporta dicho valor en una zona que pertenece prácticamente al área de estudio.

4.4 Usos de agua

INGEI (2009) reporta que el uso de suelo es principalmente urbano (52%), pastizales (34%), agricultura (6%) y el resto en diversas actividades. Dicho esto, se entiende que la mayor demanda del agua extraída se dirige hacia los primeros dos rubros, siendo el primero el más importante. Dado que el mayor uso de suelo es urbano, el agua ejerce su función para satisfacer necesidades domésticas, así como probablemente de consumo. SAS (2015) contiene información sobre el número de beneficiados de los pozos de extracción que se visitaron en el municipio de Boca del Río mostrados en la tabla 4.2. Cabe señalar que los pozos visitados en el municipio satisfacen las necesidades de casi un tercio de la población (capítulo 1) de Boca del Río. El promedio de la calidad química del agua de los últimos cinco años se muestra en la tabla 4.3 y son comparados con la NOM 127 (Salud, 1994) y la guía de consumo de agua de la WHO (2011).

No.	Pozo	Habitantes Beneficiados
1	8	32,700
2	8 A	
3	8 BIS	
4	16 A	
5	25	
6	35 A	
7	PETROLERA	

Tabla 4.2 Abastecimiento de agua (SAS, 2015)

Los números presentados en éstas tablas muestran unos buenos valores de calidad de agua para consumo para la mayoría de los aprovechamientos. De los seis mostrados, sólo hay dos que parecen estar sujetos a problemas de intrusión salina pese a su cercanía con el Golfo de México además de trabajar con un bombeo indefinido desde su construcción. Sólo el pozo 8 A tuvo un incremento en los últimos 5 años en cuanto a su concentración de cloruro (SAS 2015).

Propiedad química	Límite permisible WHO/NOM [mg/l]	POZO					
		8	8 A	16 A	25	35 A	Petrolera
Dureza de calcio		166.6	381	196	199	429.6	216.4
Dureza total como CaCO ₃	--/500	267.8	687.2	293.2	283.4	708.4	306
Alcalinidad Total	--/400	131.8	129.2	131.2	117.6	120.4	132.6
Aluminio	0.2/0.2	0.0088	0.0082	0.0138	0.007	0.006	0.0284
Cloro (Cl)	250/250	109.2	630.2	120.6	72.2	829.4	31
Cobre (Cu)	2/2	0.064	0.11	0.072	0.0604	0.04	0.136
Cromo Hexavalente	0.05/0.05	0.0068	0.008	0.0094	0.0082	0.0122	0.0072
Hierro	0.3/0.3	0.086	0.096	0.058	0.19	0.034	0.05
Fluoruro	1.5/1.5	0.434	0.392	0.32	0.394	0.568	0.158
Manganeso	0.4/0.15	0.0548	0.1066	0.1308	0.0966	0.0826	0.1088
Nitrato	50/10	0.98	0.794	0.92	0.94	2.08	2.9
Nitrito	3/1	0.0466	0.0108	0.0192	0.012	0.0158	0.0134
Nitrógeno Amoniacal	--/0.5	0.194	0.296	0.354	0.638	0.18	0.08
Sulfato	400/400	13.8	68.8	17.2	42	85	26.2
Sufractante aniónico	--/0.5	0	0	0	0	0	0
Cinc	5/5	0.06	0.074	0.04	0.04	0.046	0.064
Solidos disueltos totales	1000/1000	416.8	1152.6	448.8	294	1395	308.6
Conductividad		833.8	2305.4	890.4	708.8	2793.8	619
ph	6.5-9.5/6.5-8.5	7.57	7.574	7.686	7.558	7.708	7.66

Tabla 4.3 Comparativa de los límites permisibles vs. Concentración promedio (de 5 años) para los pozos mostrados (SAS, 2015)

5.- Discusión y Resultados

5.1- Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros medidos para cada pozo con el Hanna HI9828 son mostrados en la tabla 5.1. Cinco de los pozos muestran concentraciones en sólidos disueltos mayores a los permitidos por la NOM-127 (Salud, 1994) y la WHO (2011). Sin embargo, los pozos de club de golf (1 Golf Club, 2 Golf Club y 3 Golf Club) son utilizados exclusivamente para riego. El resto de los pozos exhibe valores muy similares de salinidad y sólidos totales disueltos, pero se aprecia un poco más de variación con respecto a la conductividad eléctrica.

Pozo	PND [m]	OD (mg/L)	pH	Temp (°C)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	C.E. (mS/cm)	SDT (mg/L)	Salinidad	Redox (mV)
35 A	34.58	4.17	7.58	30.26	3.41	2937	1468	1.51	-130.9
8 A	30.58	3.88	7.42	30.23	2.66	3757	1878	1.96	-26.9
8	41.38	0.7	7.4	30.26	11.87	842	421	0.41	-17.6
16 A	29.94	0.64	6.96	30.21	10.52	951	475	0.46	-123
jardin	32.72	3.15	7.53	30.04	15.05	665	332	0.32	24.8
25	40.24	1.35	7.16	30.89	14.22	703	352	0.34	-29.2
petrolera	NPS	2.63	7.22	29.78	15.97	626	313	0.3	53.7
4	10.6	3.26	7.06	31.13	15.77	634	317	0.3	87.4
6 bis	32.5	2.55	7.29	29.86	11.84	845	422	0.41	-52.2
20 A	9.69	3.76	7.03	28.39	13.88	720	360	0.35	65.7
20	8.74	3.26	7.15	28.04	13.68	731	365	0.35	-14.8
22	NPS	1.95	6.7	28.03	11.44	874	437	0.43	56.8
23	NPS	5.13	7.46	29	14.11	709	354	0.34	56
44	30.82	3.23	7.37	32.66	17.16	583	291	0.28	123.3
45	25.16	3.35	7.38	34.5	14.81	675	338	0.32	178.7
condado dorado	17.26	5.49	7.06	30.64	14.63	683	342	0.33	160
renacimiento	9.4	4.74	7.27	31.92	15.65	639	319	0.31	156.5
villa rica	NPS	2.95	6.4	29.88	9.43	1060	530	0.52	182.6
1 Golf Club	12.71	2.34	7.34	29.78	2.48	4025	2013	2.11	-30.2
2 Golf Club	NPS	0.83	6.64	29.25	3.95	2534	1267	1.3	114.6
3 Golf Club	12.48	3.52	7.5	37.78	5.28	1892	946	0.94	166.6
Office	17.34	4.74	6.93	27.01	14.22	703	352	0.34	163

Tabla 5.1 Parámetros fisicoquímicos medidos para cada pozo. En rojo se destacan los valores que sobrepasan los límites permisibles de SDT mencionados en la NOM-127 (1994).

Analizando nuevamente la tabla 5.1 destaca el carácter anómalo de la intrusión salina en la zona. La mayoría de los pozos muestran parámetros muy similares. Sin embargo, los destacados

en rojo están muy por encima de la media de los demás. Dada la distribución de los pozos y los parámetros, se puede inferir que el proceso de salinización se debe ascenso del cono de agua salada.

A continuación, se muestran una red de flujo y la variación de sólidos disueltos totales. La red de flujo mostrada en la figura 5.1 comprende sólo el municipio de Boca del Río al igual que la figura 5.2 que muestra la variación de sólidos disueltos totales. Los mapas ilustran de una mejor manera la distribución de los parámetros, así como del flujo. Se cambió la nomenclatura de los pozos 8 y 25 por a y b respectivamente para la elaboración de las configuraciones con el software.



Figura 5.1 Flujo de agua subterránea se observa en la parte Este, la descarga va hacia la costa y en la parte Oeste el efecto en el flujo debido mayor abstracción por los pozos 35 A y 8 A

Se puede observar en la figura 5.2 la variación de los sólidos disueltos en el área de estudio. Dentro de la figura, los pozos 35 A y 8 A están en la zona que sobrepasa los límites permitidos conforme la NOM 127. Son dos de los pozos que tienen mayor caudal de extracción (23 l/s) y 22 l/s) (SAS, 2015), por lo que se podría asumir que están sobrepasando el caudal crítico de extracción en la zona. El hecho de que sean los dos pozos con mayor salinidad y caudal que los otros pozos,

justifica la teoría de que el pozo está sujeto a intrusión salina por medio del ascenso del cono de agua salada.

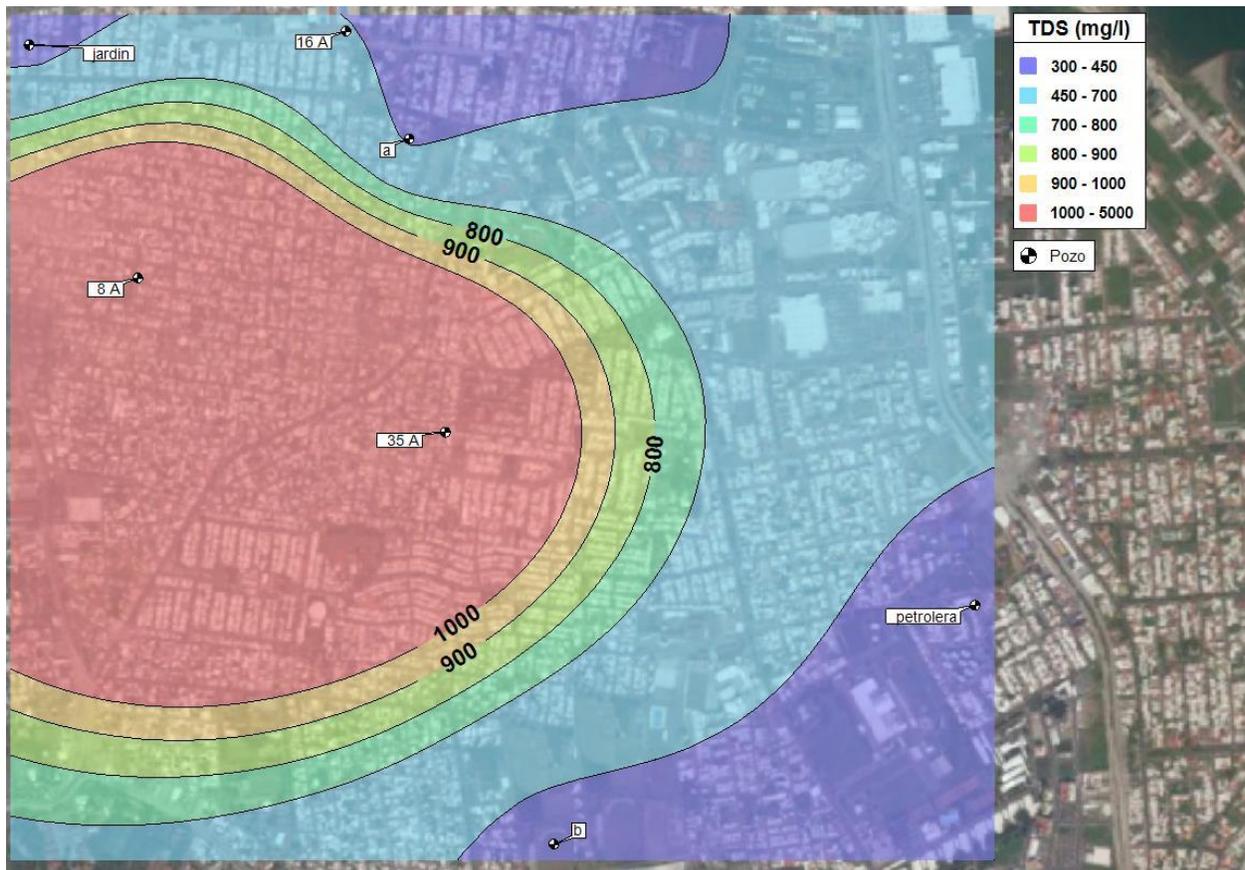


Figura 5.2 Variación de los sólidos disueltos en la zona de estudio

En la figura 5.3 se muestra la sección A-A' con dirección NW-SE muestra a los pozos del área de estudio bajo el modelo supuesto de intrusión salina al que el área está sujeto. En la sección se muestran los pozos, así como los dos casos de salinización mencionados. La capa impermeable está conformada por arcillas. Bajo este modelo se puede justificar la salinización de los pozos a lo largo del tiempo, así como el porqué de la anómala salinización en la zona.

Si se le añade la información de los pozos del municipio de Veracruz, resalta todavía más como la intrusión salina no es un gran problema para los municipios visitados, conforme a la información obtenida en los pozos. Se reduce sólo a dos casos puntuales 35 A y 8 A. También al añadir los del Club de Golf sólo se tiene intrusión en dos pozos que están muy cercanos a la costa, pero hay otros que se encuentran entre la costa y bajo la influencia de una infiltración de agua hipersalina de la laguna de Mandinga y no presentan problemas de salinización

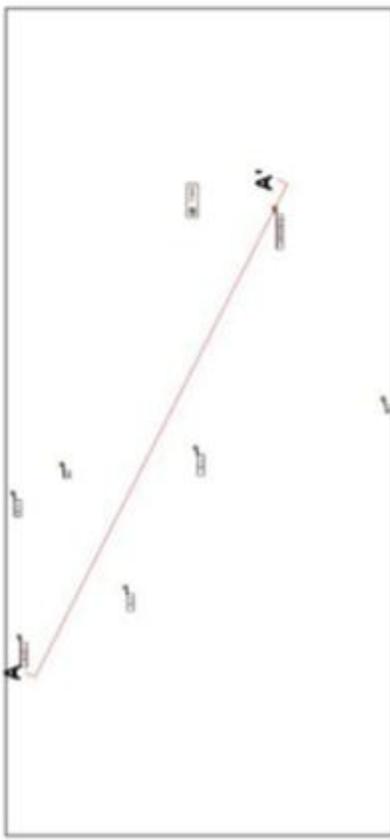
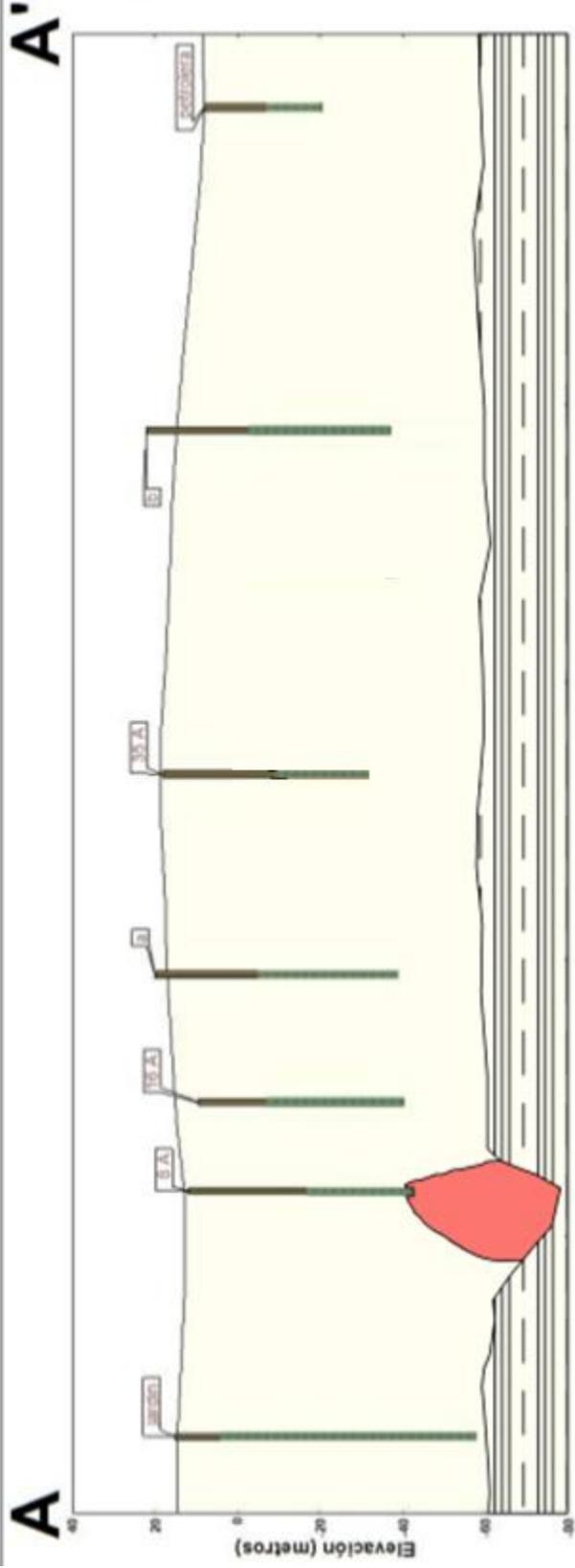


Figura 5.3 El recuadro de la izquierda muestra la sección A-A' realizada sobre la zona de estudio en Boca del Río. La sección presenta los tramos lisos y ranurados de cada pozo, así como su ubicación. El pozo 8 A se muestra afectado por ascenso del cono de agua salada en una zona delgada de la zona impermeable, misma suposición para el pozo 35 A. El resto de los pozos extrae agua de calidad dentro de la NOM 127 y la WHO.

Se tiene entonces que, al incorporar los tres municipios con la información de cada uno, que parece haber un juego de barreras impermeables que provocan limitan en gran manera el nivel de la interfaz de agua dulce-agua salada. Mismas barreras que en el tiempo pudieron preservar agua fósil. Es aquí donde un estudio de geoquímica del agua sería fundamental para poder distinguir un evento de otro y concretar un modelo hidrogeológico más apegado a la realidad.

5.2- *Parámetros hidráulicos*

5.2.1- *Prueba de bombeo*

El análisis de la prueba de bombeo se realizó mediante el gráfico 5.1 que representa el abatimiento (s) en [ml y el tiempo (t) [min]. El gráfico se obtuvo tras procesar la información obtenida en campo. AQTESOLV (Duffield, 2007) permite el análisis del resultado a través de diversos métodos analíticos, ya sea para acuíferos confinados, libres o semiconfinados.

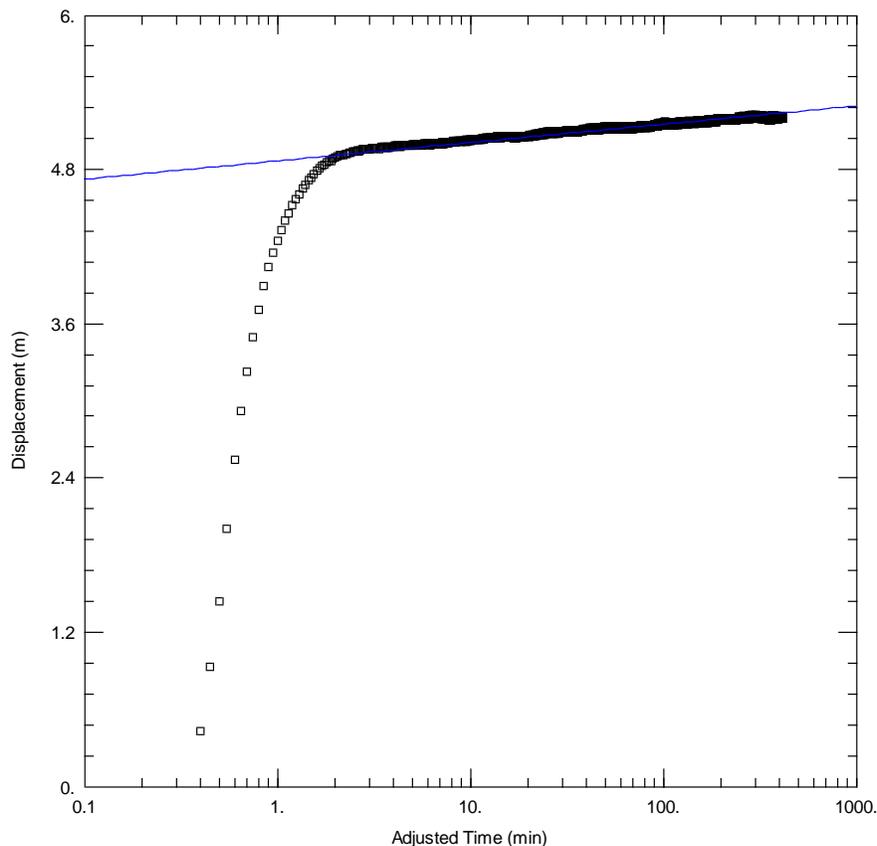


Gráfico 5.1 Gráfica semilog de los datos obtenidos con solución Cooper Jacob

Para esta prueba de bombeo se utilizó la solución de Cooper Jacob para acuíferos confinados. La transmisividad (T) obtenida fue de 1,309.7 [m²/d]. La conductividad (k) se calculó como T/espesor saturado (40 [m]), obteniéndose un valor de 32.7 [m/d]. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los establecido por CONAGUA. Sin embargo, ellos reportan que la transmisividad debería ser menor en la zona de estudio.

5.2.2- Prueba de recuperación

Como se mencionó en el capítulo 3, la interpretación de una prueba de recuperación utilizando el método de Agarwal, permite que se realice una transformación de la información obtenida de tal manera que se pueda interpretar a través de los métodos que se utilizan para pruebas de bombeo. El resultado de dicha transformación se muestra en el gráfico 5.2 que fue procesado en AQTESOLVE.

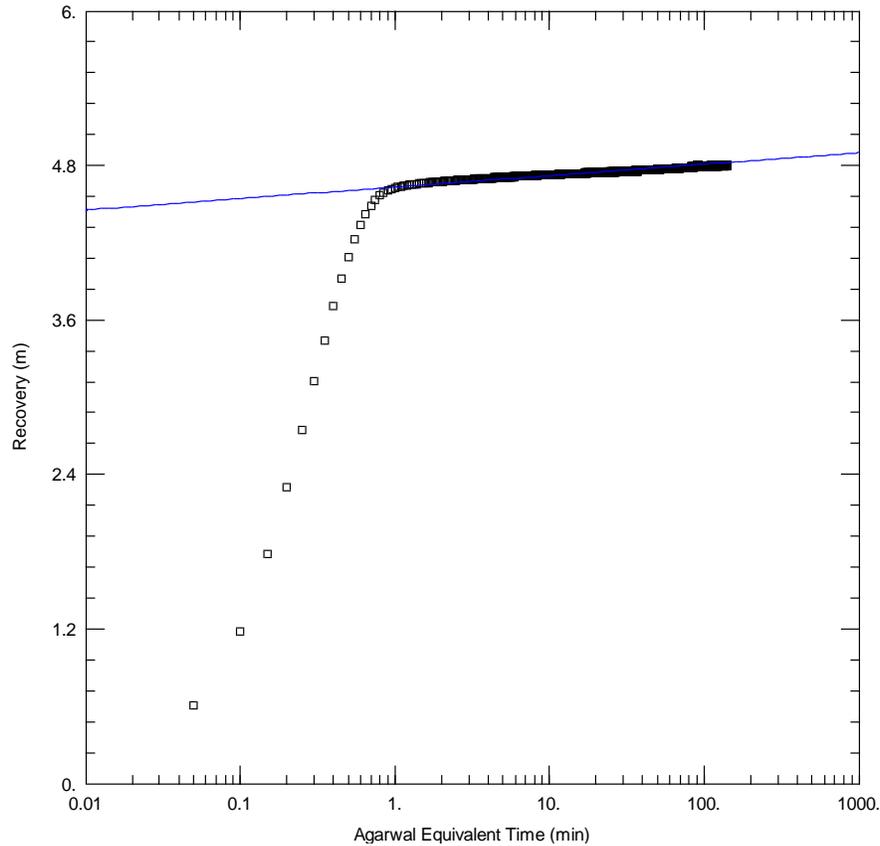


Gráfico 5.2 Interpretación de la recuperación con método Agarwal

La recuperación reporta valores del mismo orden a los de la etapa de bombeo, transmisividad de 2098.3 m^2/d y una conductividad hidráulica de 52.45 m/d . Sin embargo, dada la duración de la etapa de bombeo vs. recuperación parece ser más consistente con los valores reportados previamente, por lo que serán los utilizados para cálculos de la posición de la interfaz, así como de caudal máximo de extracción.

5.3 Interfaz de Agua dulce-Agua salada

En el capítulo 2 se describieron los métodos teóricos para calcular la posición de la cuña salada. Los métodos descritos incluyen en de Ghyben-Herzberg y el de Glover. Las ecuaciones utilizadas fueron de la (4) a la (7) según el método utilizado. Se realizó el cálculo de la interfaz conforme los siguientes valores:

$\alpha=40$ (valor conforme las densidades teóricas de agua dulce y agua salada)

$R_v = 8.39E-4$ [m/d] (valor reportado por CONAGUA)

$K = 32.4$ [m/d] (obtenido a partir de pruebas de bombeo)

$l = 24$ [km] (medido en (QGIS 2009))

$q_0 = 0.06$ [m³/d/m] (calculado con ecuación (6))

Se utilizó una hoja de cálculo de Excel donde se introdujeron los datos mencionados previamente y el resultado se muestra en la tabla 5.2. La distancia promedio de los pozos en la zona de Boca del Río al Golfo de México es de alrededor de 2000 m (QGIS, 2009), de ahí que sea el valor de (X) más importante a considerar en éste trabajo.

X (m)	Z Glover total	Z (G-H, m)
10000	36.74317774	36.74311574
5000	25.98139399	25.9813063
2134	16.97370393	16.97356971
1000	11.61938949	11.61919341
550	8.617288849	8.617024456
500	8.216287746	8.216010449
250	5.809988854	5.809596703
50	2.599007388	2.59813063
10	1.16387851	1.161919341
1	0.373580362	0.367431157
0	0.067502828	0

Tabla 5.2 Posición de la interfaz conforme Glover y G-H

El valor obtenido para la interfaz es muy bajo, más aún cuando se compara con el de Flores (2007) que propone que la posición de la interfaz para la zona de Boca del Río es de 80 [ml]. Sin embargo, la variación de ambos resultados se debe a la diferente metodología empleada para el cálculo de los parámetros hidráulicos ya que, la transmisividad del trabajo presente fue obtenido mediante una prueba de bombeo y la de Flores (2007) mediante la digitalización de un mapa.

Los pozos visitados en Boca del Río tienen una profundidad promedio de 78 [ml] (salvo petrolera que tiene 30 [ml]). Con los valores obtenidos para la interfaz tanto en éste trabajo e incluyendo los de (Flores, 2007) para Boca del Río añadido a los caudales altos de extracción en la zona, la intrusión salina debería ser mucho más pronunciada bajo estas condiciones

5.4 Caudal Máximo

El caudal crítico fue determinado para el pozo 3 Golf Club como se mencionó en el capítulo dos, por medio de la ecuación (9). Para éste cálculo, se utilizaron los siguientes valores:

$$k_h = 34.6 \text{ m/d}$$

$$d = 8.81 \text{ (distancia de la bomba a la interfaz)}$$

$$\alpha = 40 \text{ (relación de densidades agua dulce-agua salada)}$$

Distancia interfaz-bomba [m]	Qcrítico [l/s]
8.8	0.64763351

El valor obtenido tiene sentido dado que el pozo está sujeto a un problema fuerte de intrusión salina. El caudal crítico es la veinteva parte del de la operación actual. Se podría proponer un rango de extracción de hasta 0.5 l/s pero es muy probable que no se pudiera abastecer la necesidad de agua para la utilidad que le da el Club de Golf. El orden del caudal crítico para los pozos 1 y 2 del club de golf debe ser muy similar ya que guardan actualmente tasas de extracción muy similares, así como la misma profundidad total, con tan sólo ligeras variaciones en torno a las tuberías ranuradas y lisas de los pozos.

Para los pozos de la zona de estudio en Boca del Río, sólo los dos pozos con mayor extracción presentan problema de intrusión salina. El resto opera a caudales menores de 19 l/s y los salados operan con caudales mayores a 22 l/s. Aquí se puede entender que la intrusión se debe a que ambos pozos (35 A y 8 A) están sobre un adelgazamiento de la capa impermeable y son afectados por el ascenso del cono de agua salada. A partir de los valores de pozos cercanos y sin problemas de calidad de agua, se infiere que el caudal crítico de la zona puede estar en un rango de 16-18 l/s. Existe la posibilidad de que se pueda extraer a mayor caudal del actual en el resto de los pozos, esto sólo si la salinización presente en la zona se debe sólo si se delimitara propiamente el subsuelo con métodos geofísicos.

6.- Conclusiones y recomendaciones

El municipio de Boca del Río presenta un problema de salinización bajo si se compara con los existentes en Yucatán y Baja California reportados por (Bauer-Gottwein et al., 2011; Cardona et al., 2004). La calidad de agua obtenida de todos los pozos que se utilizan para uso doméstico está dentro de los límites permisibles de la NOM 127 y de la WHO, con la excepción del 35 A y 8 A. Es así como se tiene un acuífero con altas posibilidades de una buena explotación.

El modelo principal que acusa de intrusión salina en Veracruz parece ser el de ascenso del cono de agua salada. Es probable que exista una barrera impermeable grande en la zona que esté interfiriendo con la intrusión de agua de mar y por tanto con la interfaz de agua dulce-agua salada, reubicando la misma a una profundidad mayor a las propuestas previamente. La interfaz de agua dulce-agua salada presentada en éste trabajo quedó muy limitada a sólo una prueba de bombeo por lo que no se puede considerar como un valor concluyente para la zona de estudio.

Los caudales de extracción en los municipios de Veracruz y Boca del Río parecen ser los adecuados ya que han bombeado por un tiempo indefinido y no presentan en su mayoría problemas asociados a intrusión salina de ningún tipo.

Los pozos 3 Golf Club y 2 Golf Club (utilizados para riego) parecen seguir el proceso normal de intrusión salina dados los parámetros obtenidos en campo. Son pozos someros, muy cercanos a la costa y con salinidad alta.

Se recomienda que los pozos 35 A y 8 A del municipio de Boca del Río suspendan operaciones por lo menos durante un año con el fin de que el acuífero pueda recuperarse. Mismo tiempo en que se sugiere realizar mantenimiento de pozo dado que llevan operando más de quince años de manera ininterrumpida a caudales altos. Realizar una prueba de bombeo de cinco días con caudales de extracción menores al actual monitoreando la variación en conductividad y con una recuperación de al menos 10 días.

Se recomienda una operación intermitente para que la sobreexplotación de los pozos durante la temporada cálida no tenga un impacto grande y ocasione problemas más globales de intrusión de agua salada.

Dado que el campo de golf cuenta con pasto de Bahamas (resistente al agua salada) no parece necesario una recomendación, sin embargo, la elaboración de un pozo con los estudios necesarios (geofísica somera) en la zona permitiría obtener la misma cantidad de agua y de mejor calidad además de utilizar menos energía eléctrica.

Hacer uso de las tecnologías para agua subterránea, en particular la del Freshkeeper (Zuurbier et al. 2016) dada su capacidad de salvaguardar a los pozos de la intrusión salina. Dado el modelo presente en la zona de estudio añadido a éstas tecnologías, se puede concebir una extracción mejor en la zona a caudales un poco más altos.

La implementación de técnicas de exploración geofísicas previo a la construcción de pozo. Los tipos de intrusión presentes pueden ser disminuidos en gran parte por un buen planeamiento de perforación y construcción. En especial para la elaboración de un pozo sustituto al 35 A, dado que el abastecimiento a la población por el mismo pozo es muy alto. Con dicho pozo se podría reducir el caudal de extracción en el pozo 35 A y dado que el otro tendría los estudios necesarios, podría operar a un caudal de extracción alto (bajo el caudal crítico de extracción de la zona) y abastecer así a más parte de la población sin problemas de la calidad del agua.

7.- Referencias

- Banco Mundial (2016). Crecimiento de la población (% anual) | Data. [online] Available at: <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.GROW?end=2015&locations=MX&start=1960> [Accessed 8 Sep. 2016].
- Bauer-Gottwein, P. et al., 2011. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), pp.507–524.
- Cardona, A. et al., 2004. Salinization in coastal aquifers of arid zones: An example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environmental Geology*, 45(3), pp.350–366.
- Cheng, A.H.-D. et al., 1999. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and Practices* E. Perez, ed., Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15003161> \n<http://cid.oxfordjournals.org/lookup/doi/10.1093/cid/cir991> \n<http://www.scielo.cl/pdf/tdeca/v15n26/art06.pdf> \n<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84861150233&partnerID=tZOtx3yL>.
- CONAGUA, 2015a. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Costera de Veracruz (3006), Estado de Veracruz. *Diario Oficial de la Federación*, 53(9), pp.1689–1699.
- CONAGUA, 2015b. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cotaxtla (3008), Estado de Veracruz. *Diario Oficial de la Federación*, 53(9), pp.1689–1699.
- CONAGUA, 2016. Costera de Veracruz. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp.1689–1699.
- CONAGUA, 2012. Estadística descriptiva Estación 30192. *Servicio Meteorológico Nacional*.
- Custodio, E., 2002. COASTAL AQUIFERS AS IMPORTANT NATURAL HYDROGEOLOGICAL STRUCTURES.
- Custodio, E., 2002. Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. *Groundwater and human development*, pp.1905–1918.
- Custodio, E. & Llamas, M.R., 1976. Hidrología subterránea. , II, pp.1318–1381.
- Dhakate, R. et al., 2016. Demarcating saline water intrusion pathways using remote sensing, GIS and geophysical techniques in structurally controlled coastal aquifers in Southern India. *Environmental Earth Sciences*, 75(5), p.363. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-015-4940-3>.
- Duffield, G.M., 2007. AQTESOLV.
- Eissa, M.A. et al., 2016. Journal of African Earth Sciences Geophysical and geochemical studies to delineate seawater intrusion in Bagoush area , Northwestern coast , Egypt , , 121, pp.365–381.
- Exploración, S. De & Gil, C.A.M., 2013. Provincia Petrolera Veracruz Pemex Exploración y Producción Director de Pemex Exploración y Producción. , pp.1–38.
- Ferguson, G. & Gleeson, T., 2012. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 2(5), pp.342–345. Available at: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=3C6E1M04GHHM78cfBEI&page=3&doc=25&cacheurlFromRightClick=no.
- Fetter, C. w., 2001. Applied Hydrogeology - Fetter 4th Edition.pdf. , p.615.
- Flores, I.N., 2007. *Identificación de Zonas Vulnerables a Intrusión Salina en una Zona Costera de Veracruz*.
- Flores, I.N. et al., 2010. Marco Hidrogeológico del acuífero costero de Veracruz. *AcademiaJournals.com*, 7, pp.61–67.
- Han, D., Post, V.E.A. & Song, X., 2015. Groundwater salinization processes and reversibility of seawater intrusion in coastal carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 531, pp.1067–1080. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.013>.
- Inegi, 2014. *Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave*, Available at: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&s=inegi&upc=702825201982&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=13&pg=0&ct=106030000>.

- Jakovovic, D. et al., 2016. Saltwater upconing zone of influence. *Advances in Water Resources*, 94, pp.75–86. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170816301270>.
- Jansen, J., 2011. Geophysical Methods to Map Brackish and Saline Water in Aquifers. *Proceedings of the 2011 Georgia Water Resources Conference*, p.4. Available at: <http://smartech.gatech.edu/handle/1853/46031>.
- Kumar, C.P., 2001. Management of Groundwater in Salt Water Ingress Coastal Aquifers. , pp.1–20.
- Ma, F. et al., 2007. Study of shallow groundwater quality evolution under saline intrusion with environmental isotopes and geochemistry. *Environmental Geology*, 51(6), pp.1009–1017.
- Mendoza Millán, J.A., 2015. ESTUDIO ACUÍFERO COSTERA DE VERACRUZ ”.
- Pereyra Díaz, D., Pérez Sesma, J.A. & Salas Ortega, M. del R., 2010. Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz. , pp.85–122.
- Prinos, S.T., 2013. Saltwater Intrusion in the Surficial Aquifer System of the Big Cypress Basin , Southwest Florida , and a Proposed Plan for Improved Salinity Monitoring. *USGS*, p.70.
- QGIS, D.T., 2009. QGIS. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. , Versión 5.(2016).
- Rodríguez, S. & Morales, W., 2010. Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz. , p.64.
- Roncza, M., Vo??, T. & G??nther, T., 2015. Cost-efficient imaging and monitoring of saltwater in a shallow aquifer by using long electrode ERT. *Journal of Applied Geophysics*, 122, pp.202–209.
- Salud, S. de, 1994. NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Última reforma publicada DOF 03-02-1995*, p.Pp.1-7.
- SAS, 2015. Composición química anual de pozos. , pp.1–7.
- SEFIPLAN, 2016. Cuadernillos municipales, Boca del Río. , pp.1–11.
- SGM, 2002. Carta Geologica-Minera de Veracruz E14. , 1, p.1.
- Steinich, B., Escolero, O. & Marín, L.E., 1998. Salt-water intrusion and nitrate contamination in the Valley of Hermosillo and El Sahuaral coastal aquifers, Sonora, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 6(4), pp.518–526.
- Stuyfzand, P.J. & Raat, K.J., 2009. Benefits and hurdles of using brackish groundwater as a drinking water source in the Netherlands. *Hydrogeology Journal*, 18(1), pp.117–130. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-009-0527-y>.
- Zuurbier, K.G. et al., 2016. How Subsurface Water Technologies (SWT) can Provide Robust, Effective, and Cost-Efficient Solutions for Freshwater Management in Coastal Zones. *Water Resources Management*. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-016-1294-x>.