



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE GEOFÍSICA

**“SOLUCIÓN ANALÍTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA
INTERFASE AGUA SALADA-AGUA DULCE EN ACUÍFEROS
COSTEROS”**

TESIS

PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN:

INGENIERÍA GEOFÍSICA

PRESENTA:

GIOVANNA ZECHINELLI LEZAMA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ROGELIO VÁZQUEZ GONZÁLEZ

CO-DIRECTOR:

M.C. YLEANA CLAUDIA MARTÍNEZ MIRÓN

PUEBLA, PUEBLA. OCTUBRE, 2018

AGRADECIMIENTOS:

A Dios por darme las herramientas necesarias en mi vida.

A mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo han permitido concluir esta etapa de mi vida, por inculcarme el ejemplo de esfuerzo, dedicación y de no decaer ante los obstáculos de la vida, por sembrar en mi la humildad y cada uno de los valores que hoy me significan.

A mis hermanos Caterina y Gabriel por siempre estar para mí en cada momento, a mí prima Arlette por ser un pilar importante en mi vida, a los miembros de mi familia que me han apoyado en cada meta que me he propuesto.

A mi tía M.C. Claudia Hernández Merlo ya que sin ella este proyecto no se hubiera realizado, por el amor, el apoyo y las palabras de aliento que día con día me ha brindado, por haber creído en mí.

A mis amigos por estar en los momentos más importantes de mi vida, por la paciencia y el amor brindado.

A mis profesores en especial a la M.C. Yleana Martínez quien con sus conocimientos me hizo crecer día a día como profesional y persona.

Quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Rogelio Vázquez González, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y paciencia permitió el desarrollo de este trabajo.

Gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo y el continuo recordatorio para concluir este trabajo.

ÍNDICE

INDICE DE GRÁFICAS	6
INDICE DE TABLAS	6
RESUMEN	7
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1. Antecedentes	9
1.2. Introducción	10
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo general.	11
1.3.2. Objetivos específicos.	12
1.4. Justificación	12
2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA	13
2.1. Hidrogeología	13
2.1.1. Acuíferos.	13
2.1.2. Clasificación de acuíferos.	16
2.1.2.1. Características Litológicas.	16
2.1.2.2. Tipo de porosidad.	17
2.1.2.2. Presión hidrostática.	18
2.1.3. Movimiento del agua en los acuíferos.	20
2.1.4. Acuíferos costeros.	22
2.1.4.2. Mecanismos de descarga de los acuíferos costeros.	23
2.1.4.2. Explotación de acuíferos costeros.	24
2.2. Intrusión Salina	26
2.2.1. Relación agua salada – agua dulce.	26
2.2.2. Zona de mezcla.	28
2.2.3. Fuentes de salinidad.	29
3. METODOLOGÍA	30
3.1. Bases teóricas	30
3.2. Condiciones Geohidrológicas en acuíferos costeros	32
3.3. Ley de Darcy	33

3.4.	Suposición de Dupuit	34
3.5.	Aproximación de Ghyben-Herzberg	37
3.6.	Determinación de la interfase	41
4.	DATOS Y RESULTADOS OBTENIDOS	47
4.1	Solución numérica para $N = 0$	47
4.2	Solución numérica para $N \neq 0$	55
5.	CONCLUSIONES	63
6.	RECOMENDACIONES	66
7.	BIBLIOGRAFÍA	68

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Modelo conceptual de un acuitardo; modificada de Leyva Suárez (2010)</i>	14
<i>Figura 2. Modelo conceptual de un Acuicludo; modificada de Leyva Suárez (2010)</i>	15
<i>Figura 3. Modelo conceptual de un acuífugo; Leyva Suárez (2010)</i>	15
<i>Figura 4. Tipos de acuíferos según su textura; González de Vallejo, 2002</i>	
<i>Figura 5. Tipos de acuíferos según la presión hidrostática; González de Vallejo (2002)</i>	18
<i>Figura 6. Diagrama de Acuífero libre (Modificación de González de Vallejo, 2002)</i>	19
<i>Figura 7. Diagrama de Acuífero confinado (Modificado de González de Vallejo, 2002)</i>	19
<i>Figura 8. Perfiles y movimiento del agua en el suelo y sub-suelo. Modificada, González de Vallejo, 2002.</i>	20
<i>Figura 9. Circulación del agua subterránea dulce y salada en la zona de difusión en un acuífero costero; Fetter (2001)</i>	27
<i>Figura 10. Cuña de intrusión marina en un acuífero costero. Modificada de Custodio y Llamas (1976).</i>	29
<i>Figura 11. Tubería horizontal con arena para demostrar el experimento de Darcy (Fetter, 2001).</i>	33
<i>Figura 12. Unidad de agua respecto a un plano de referencia</i>	
<i>Figura 13. Hipótesis de Dupuit. Modificada de Hidráulica de Pozos, Rodríguez y Sánchez (s.f).</i>	36
<i>Figura 14. Hipótesis de Dupuit. Modificada de Hidráulica de Pozos, Rodríguez y Sánchez (s.f).</i>	37
<i>Figura 15. Relación de Ghyben-Herzberg</i>	
<i>Figura 16. Relación de la carga del agua dulce y la profundidad a la interfase de agua salada Modificada de J. Bear (1984).</i>	41
<i>Figura 17. Sección esquemática de un acuífero costero. Modificada de J. Bear (1984).</i>	42

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Posición de la intrusión salina con un flujo de $Q_f(0) = 1,530.70\text{m}^2/\text{año}$	49
Gráfica 2. Posición de la intrusión salina con un flujo de $Q_f(0) = 3,061.4\text{m}^2/\text{año}$	49
Gráfica 3. Posición de la interfase a $Q_f(0) = 4,592.1\text{ m}^2/\text{año}$	50
Gráfica 4. Posición de la interfase a diferentes valores de flujo	52
Gráfica 5. Posición de la superficie freática a diferentes valores de flujo	53
Gráfica 6. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N=0.2\text{ m/año}$	57
Gráfica 7. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N = 0.4\text{ m/año}$	58
Gráfica 8. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N=0.075\text{ m/año}$	58
Gráfica 9. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N=0.01\text{ m/año}$	59
Gráfica 10. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial	60
Gráfica 11. Posición de la superficie freática a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de la longitud de la intrusión salina a diferentes valores de flujo.	51
Tabla 2. Valores de longitud de la intrusión salina a diferentes valores de flujo	52
Tabla 3. Valores de precipitación pluvial según Conagua (2016).....	56
Tabla 4. Valores de longitud de la intrusión salina a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial	59

RESUMEN

El presente trabajo consistió en el desarrollo de una solución analítica de la delimitación del contacto de la interfase agua salada - agua dulce presente en acuíferos costeros como herramienta para estudiar el comportamiento del cuerpo salino intrusivo a diferentes condiciones geohidrológicas. El interés de este trabajo surge por la relación que existe entre las matemáticas y la complejidad del fenómeno asociado al flujo de agua subterránea en el medio costero; siendo un medio con muchos factores complejos que lo caracterizan, los cuales no se mantienen constantes en la realidad dificultando el análisis de la respuesta del sistema geohidrológico y es por esto que surge la necesidad de utilizar las matemáticas como un apoyo.

Una propiedad muy común en México y en otros países con litoral, es la cercanía a la cual se encuentran los acuíferos explotados a las zonas costeras, los cuales son utilizados para abastecer poblaciones y para el ámbito agrícola. Debido a la cercanía y al contacto del acuífero a zonas saturadas con agua de mar, se origina el problema de la contaminación por medio de intrusión salina; el agua salada tiene una densidad mayor comparada con la densidad del agua dulce. En condiciones estacionarias de la descarga de agua dulce al mar, se establece una distribución de las aguas de diferente densidad en forma de cuña. El agua salada, por su mayor densidad se va profundizando conforme avanza hacia el terreno formando una cuña, sobre la cual se ubica el agua dulce que descarga el océano.

Para el análisis que se presenta en este trabajo se utilizó como apoyo el método propuesto por Jacob Bear (1984), el cual determina el comportamiento de la fase salina en un estado estacionario, utilizando como apoyo la ley de Darcy, la suposición de Dupuit

y el principio de Ghyben Herzberg, principios que en conjunto facilitan el análisis del comportamiento de la intrusión salina en acuíferos costeros.

Los resultados obtenidos mostraron que uno de los factores más importantes para la determinación del comportamiento de la intrusión salina es el flujo de agua dulce hacia la costa. Esta variable presente de forma explícita en la Ley de Darcy, se encuentra presente en las ecuaciones desarrolladas en este trabajo, y su magnitud es uno de los factores principales que determinan la posición de la intrusión salina, permitiendo o delimitando la posición del contacto entre el agua salada y el agua dulce al interior del acuífero costero. De acuerdo con los resultados se observó que a mayor valor del flujo de agua dulce hacia la costa, la longitud máxima de la intrusión salina disminuía y que en condiciones con presencia de recarga por precipitación pluvial, conforme se consideraba un aumento de la infiltración el flujo aumentaba y por consiguiente, la longitud de la intrusión salina disminuía. Las ecuaciones desarrolladas se utilizaron para calcular la posición de la interfase para diferentes condiciones de flujo hacia la costa, y la presentación gráfica de los resultados permiten el análisis espacial en la zona costera.

1. Planteamiento del problema

1.1. Antecedentes

Los acuíferos costeros están en contacto con los océanos y bajo condiciones naturales el agua dulce descarga en el mar. La zona de contacto entre estos dos cuerpos de agua (agua salada - agua dulce) de densidades diferentes, está controlada por el balance hidrológico del acuífero costero.

En condiciones estacionarias de la descarga de agua dulce al mar, se establece una distribución de las aguas de diferente densidad en forma de cuña. El agua salada, por su mayor densidad, profundiza conforme avanza hacia el terreno formando una cuña, sobre la cual se encuentra ubicada el agua dulce que descarga al océano. Cuando el flujo de agua dulce hacia el mar cambia, la interfase responde a estos cambios en consecuencia, su ubicación es modificada provocando la intrusión o recesión de la interfase, según la disminución o aumento del flujo subterráneo hacia la costa. Dentro de los factores más comunes que puede provocar la intrusión de agua salada al acuífero, se consideran:

- La extracción de agua dulce por el bombeo de pozos
- Disminución de la recarga natural de los acuíferos.

La posición de la interfase agua salada - agua dulce, es un tema importante para la gestión de los recursos hidráulicos subterráneos en zonas costeras.

Para evitar la contaminación de los acuíferos costeros provocado por un desequilibrio en el nivel piezométrico a causa de la extracción de agua por bombeo, es necesario estudiar la evolución de la intrusión salina para comprender los cambios en las condiciones geohidrológicas que se generan cuando se explota un acuífero y determinar las

estrategias para mantener el nivel piezométrico en equilibrio y evitar una contaminación por salinización.

La densidad del agua dulce en comparación a la del agua salada es diferente, haciendo más complejo el modelado del flujo de aguas subterráneas en acuíferos costeros. Una aproximación que simplifica el análisis de este fenómeno, es considerar que la separación entre los dos cuerpos de agua se da en una interfase abrupta (Sharp interface). Para lograr este análisis se han desarrollado muchos modelos matemáticos logrando una simulación del movimiento del agua subterránea en acuíferos costeros, como lo son, según Uddameri (2013): Vappicha & Nagaraja (1976), Bear et al (1984), Essaid (1990), Mahesha & Nagaraja (1996), (Robinson et al., 2007), Kourakos & Mantoglou (2001), entre otros. En estos modelos se asume una interfase brusca entre el contacto del agua dulce y el agua salada de las costas, utilizando el principio de Ghyben-Herzberg y la aproximación de Dupuit para poder construir la expresión matemática que relaciona la posición de la interfase con el flujo de agua dulce hacia la costa y las propiedades geohidrológicas del medio.

1.2. Introducción

En la actualidad el estudio del agua subterránea ha tomado gran importancia, debido a que es un recurso vital; Jacob Bear (1984) menciona que del agua presente en la tierra, se estima que el 99.4% pertenece a agua superficial, de lo cual, solo el 0.6% del total pertenece a aguas subterráneas. Sin embargo, la mayor parte del agua superficial está presente como agua salada en los océanos y mares (97%) por lo que deja solo un 2% de agua dulce. Los acuíferos más aprovechados se encuentran en las zonas costeras, zona

en la cual se encuentra un mayor número de población, por consiguiente, aumenta la explotación de acuíferos originando diversos problemas relacionados con la gestión del agua subterránea. Estos acuíferos son los más vulnerables a la contaminación en comparación con los continentales. La vulnerabilidad de un acuífero está relacionada con su capacidad para resistir el impacto antropogénico y natural, Foster & Hirata (1991).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo de tesis es realizar un análisis de la delimitación de la intrusión salina presente en acuíferos costeros de tipo libre en un estado estacionario con ayuda de las ecuaciones matemáticas que describen las leyes de comportamiento y los fenómenos relacionados al flujo de agua subterránea, obteniendo un modelo simplificado que representa el medio complejo en un medio más comprensible.

Para poder analizar el comportamiento de la intrusión salina esta tesis se basó en la solución propuesta por J. Bear (1984) el cual se basa en la suposición que el flujo del agua dulce va hacia el mar en cualquier distancia de la costa y asume un balance de agua dulce en un estado estacionario. Utilizando como apoyo la Ley de Darcy, la suposición de Dupuit y el principio de Ghyben Herzberg.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general.

Encontrar una solución analítica, en condiciones estacionarias, para la determinación de la interfase agua salada - agua dulce en acuíferos costeros de tipo libre utilizando como apoyo el método propuesto por J. Bear (1984).

1.3.2. Objetivos específicos.

1. Utilizar como apoyo las matemáticas para facilitar el estudio de los fenómenos de flujo de agua subterránea en zonas costeras.
2. Identificar y describir el comportamiento de la interfase agua salada - agua dulce en diferentes condiciones geohidrológicas.
3. Estudiar y analizar las ecuaciones que describen la Interfase.
4. Realizar la representación gráfica con ayuda del programa MATLAB de los resultados obtenidos para diferentes condiciones del flujo de agua, para de manera visual analizar la forma y posición de la interfase.

1.4. Justificación

La intrusión salina es un problema que afecta a los acuíferos costeros en muchos lugares de México; la longitud de costa de nuestro país, es de 11,122Km; 7,828Km en el Litoral del Pacífico y Golfo de California y 3,294Km en el Golfo de México y Mar Caribe (CONABIO s.f) y los acuíferos costeros son la principal, y en ocasiones, la única fuente de agua dulce para abastecer poblaciones. La demanda de agua dulce en estas zonas costeras supera fácilmente la disponibilidad de recursos hídricos disponibles cuando estas áreas no son alimentadas directamente por ríos y cuando la escasez en el suministro de agua es común (Custodio, 1987).

Dada la sobreexplotación a la que se ven expuestos los acuíferos costeros, es necesario desarrollar conocimientos más amplios de la presencia y comportamiento de la intrusión salina en acuíferos que están en contacto con el mar. Al presentarse una sobreexplotación sostenida se generaría a futuro una contaminación en el agua

subterránea por efecto de la salinización. También resulta importante comprender el comportamiento de la intrusión en diferentes condiciones geohidrológicas como lo sería con presencia de recarga por infiltración de precipitación pluvial o en tiempos de sequía.

2. Marco teórico de referencia

2.1. Hidrogeología

2.1.1. Acuíferos.

Un acuífero se define como una unidad geológica o formación porosa con permeabilidad no nula, la cual es capaz de almacenar y transmitir agua por medio de sus poros, fracturas, o grietas.

El origen del agua subterránea surge por la lluvia, parte de la cual se infiltra a través del suelo por los poros, fracturas o grietas de las rocas, hasta alcanzar un nivel impermeable el cual no permite descender más. Ésta agua se acumula con el paso del tiempo llenando los acuíferos periódicamente, circulando a favor del gradiente hidráulico hasta encontrar una salida a la superficie, convirtiendo estos puntos en manantiales o fuentes.

Algunos ejemplos de rocas formadoras de acuíferos son: Aluviones de ríos formados por una mezcla de gravas y arenas, gravas no consolidadas, areniscas poco cementadas, arenillas, limos y dolomías; algunos tipos de rocas volcánicas; formaciones calcáreas muy karstificadas, así como rocas metamórficas y plutónicas fracturadas (Custodio y Llamas 1976).

Los acuíferos presentan tres zonas de interés, la *zona de alimentación* la cual es aquella en donde el agua de precipitación se infiltra, *la zona de descarga* en donde el agua sale del acuífero (como puede ser un manantial o la descarga al mar o a un río) y *la zona de circulación* es la parte comprendida entre la zona de alimentación y la zona de descarga, Peralta y Sardi (2012)

Las formaciones o unidades geológicas que limitan a los acuíferos, se pueden clasificar en cuanto a grupos principales como: Acuitardo, Acuicludos y Acuífugos.

Un *acuitardo* es una formación capaz de almacenar una gran cantidad de agua pero transmitirla de forma lenta. Su capacidad de drenaje es media a baja (Limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.) González de Vallejo (2002). Son formaciones geológicas de baja permeabilidad pero no nula, un ejemplo típico según Custodio y Llamas (1976) es un material arcilloso, el cual tiene una alta porosidad, pero muy baja permeabilidad.

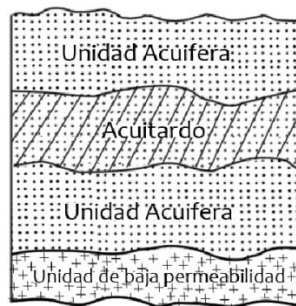


Figura 1. Modelo conceptual de un acuitardo; modificada de Leyva Suárez (2010)

Un *Acuicludo* es una formación poco permeable la cual puede almacenar agua en gran cantidad pero la transmisión es nula, estas formaciones se drenan con mucha dificultad (Arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc) González de Vallejo (2002).

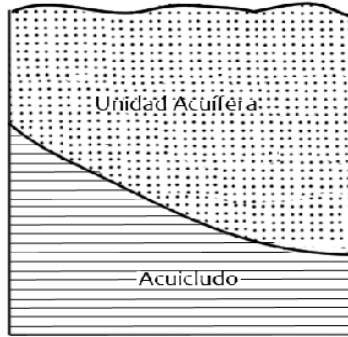


Figura 2. Modelo conceptual de un Acuícludo; modificada de Leyva Suárez (2010)

Los *Acuífugos* son formaciones incapaces de almacenar y transmitir el agua, están formadas por rocas compactas, como lo puede ser granitos y gneis, pueden existir fracturas que permiten el flujo del agua dentro de las formaciones. (Custodio y Llamas, 1976) pero su transmisión es nula.

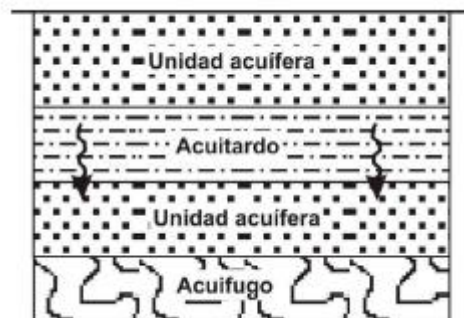


Figura 3. Modelo conceptual de un acuífugo; Leyva Suárez (2010)

2.1.2. Clasificación de acuíferos.

Los acuíferos se pueden clasificar desde el punto de vista de su textura, de sus características litológicas y de la presión hidrostática en:

- Según las características litológicas:
Detríticos, carbonatados, aluviales y volcánicos
- Según el tipo de huecos:
Poroso, Kárstico y fisurado
- Según la presión hidrostática:
Libres, confinados y semiconfinados

2.1.2.1. Características Litológicas.

Según las características litológicas se pueden clasificar en: Detrítica, carbonatada aluvial y volcánica (Custodio y Llamas, 1976):

Un *acuífero detrítico* está formado por masas de rocas fragmentadas, como arenas o gravas las cuales almacenan el agua en sus poros y su capacidad de transmitir y almacenar el agua depende del porcentaje de huecos presentes entre sus partículas.

Un *acuífero carbonatado* es un estrato con porosidad alta, como lo pueden ser las calizas y dolomías; su permeabilidad está en relación a su porosidad secundaria la cual es desarrollada a través de procesos de disolución química a lo largo de fracturas, a lo cual se le conoce como *Karstificación*.

Un *acuífero aluvial* es un estrato o capa formada en un ambiente fluvial y de abanico con una permeabilidad no nula, apoyado sobre un material con menor permeabilidad.

Un *acuífero volcánico* está formado por rocas volcánicas con alta permeabilidad y presencia de cavidades o vesículas, más o menos comunicadas entre sí, producto de la liberación de gases o circulación hídrica durante los procesos efusivos (Custodio y Llamas, 1976)

2.1.2.2. Tipo de porosidad.

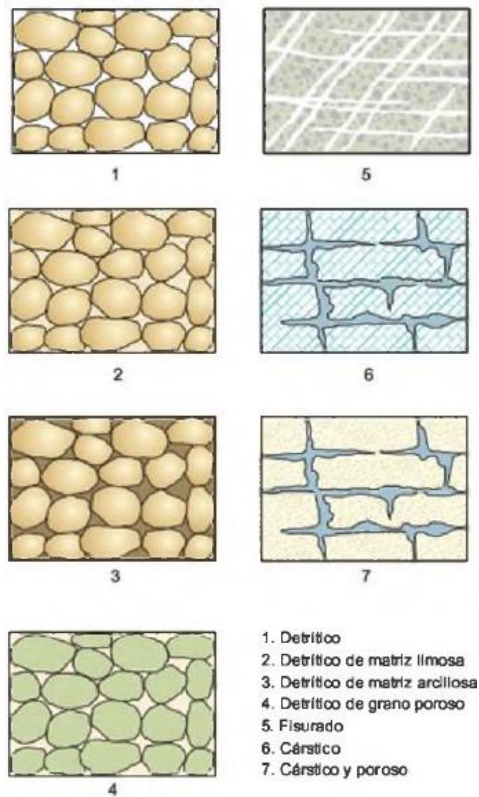


Figura 4. Tipos de acuíferos según su textura; González de Vallejo (2002)

Desde el punto de vista de su textura, existen fundamentalmente tres tipos de materiales acuíferos, que se representan para su mejor comprensión en la figura 4 (González de Vallejo, 2002)

Los *acuíferos porosos* presentan permeabilidad debida a sus poros intergranulares, permitiendo que el agua circule y se almacene en los huecos intergranulares. De acuerdo al autor González de Vallejo (2002) los materiales característicos de estos acuíferos se

encuentran las gravas, arenas, arcosas y en general todos los materiales detríticos con tamaño de grano de arena como mínimo. De acuerdo a la figura 4, corresponden al material detrítico, detrítico de matriz limosa y matriz arcillosa y detrítico de grano poroso.

Los *acuíferos kársticos y fisurados* son aquellos que la permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto por origen mecánico como de disolución (correspondiente al número 5 y 6 en la figura 4). Los materiales más importantes se encuentran las calizas, dolomías, granitos, basaltos, etc.

Los *acuíferos kársticos y porosos* están formada por sedimentos granulares (correspondiente al número 7 en la figura 4), González de Vallejo menciona que las calcarenitas son típicas.

2.1.2.2. **Presión hidrostática.**

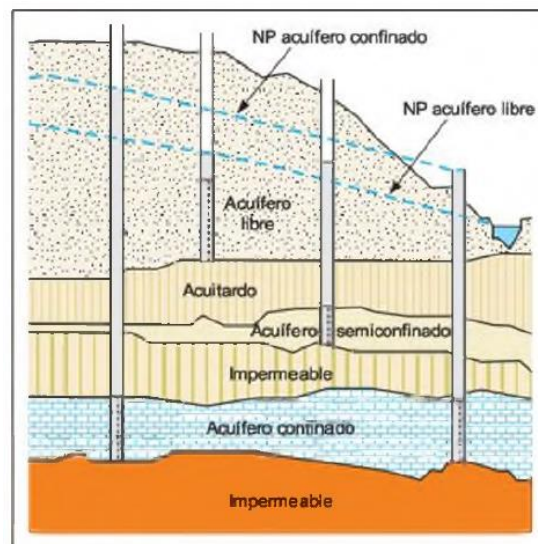


Figura 5. Tipos de acuíferos según la presión hidrostática; González de Vallejo (2002)

Acuíferos libres o no confinados

Corresponden al esquema más simple, una zona impermeable sirve de base a una zona permeable saturada de agua; más arriba existe una franja permeable, sin saturar.

La zona no saturada se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático, nivel que define el límite de saturación del acuífero y este coincide con la superficie piezométrica, superficie que no presenta una posición fija ya que varía dependiendo de las condiciones geohidrológicas y de operación del acuífero, como la recarga por infiltración de precipitación pluvial y el bombeo de pozos, entre otros factores.

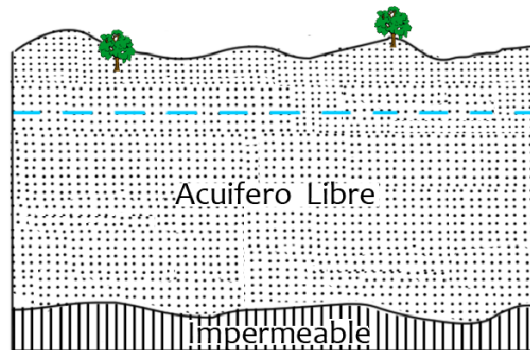


Figura 6. Diagrama de Acuífero libre (Modificación de González de Vallejo, 2002)

Acuíferos confinados

Estos se encuentran limitados por materiales impermeables y no existe una zona no saturada, el agua se encuentra sometida a una presión mayor a la presión atmosférica y ocupa en su totalidad a los poros de la formación geológica, saturándola por completo.

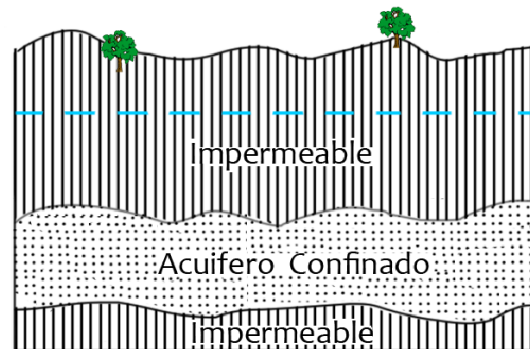


Figura 7. Diagrama de Acuífero confinado (Modificado de González de Vallejo, 2002)

Acuíferos Semiconfinados

Los materiales que los delimitan no son todos impermeables, es decir, la capa superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, las cuales permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores.

2.1.3. Movimiento del agua en los acuíferos.

El movimiento del agua en el suelo está caracterizado por los fenómenos de almacenamiento, evaporación y transpiración (González de Vallejo, 2002)

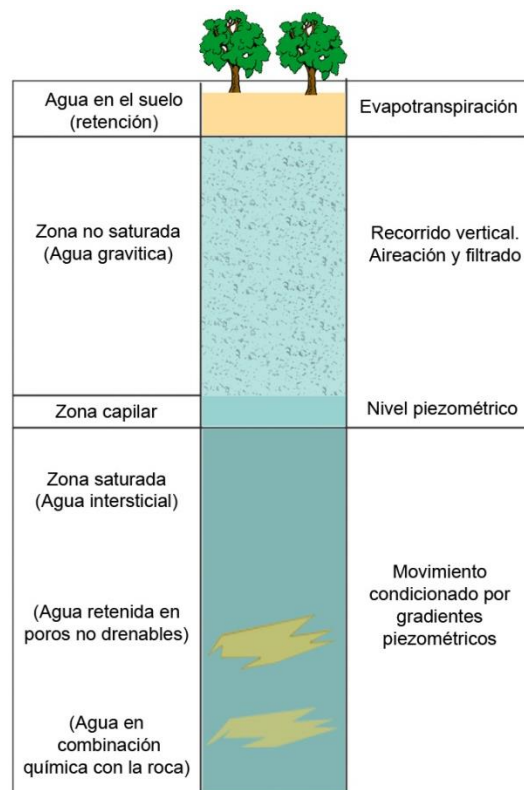


Figura 8. Perfiles y movimiento del agua en el suelo y sub-suelo. Modificada, González de Vallejo, 2002.

Movimiento del agua en la zona no saturada

El movimiento en esta zona es vertical descendente y en ella existe absorción. (González de Vallejo, 2002)

Movimiento del agua en la zona saturada

En esta zona el nivel piezométrico nunca es inferior a la altura de posición, en la parte más alta, junto a la franja capilar, el nivel piezométrico y la altura de posición son coincidentes y nula la altura de la presión (González de Vallejo, 2002). Conforme se desciende en la zona saturada, el nivel piezométrico se mantiene, pero las pérdidas de altura de posición se compensan con el incremento de altura de presión.

La superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos de igual nivel piezométrico dentro de la formación. Hay que distinguirla de la superficie freática, que es el lugar geométrico de los puntos del acuífero en que la altura de presión es nula y que coincide con la superficie del agua en los acuíferos libres, González (2002).

El agua en las zonas saturadas se mueve de puntos de mayor nivel piezométrico a puntos de menor nivel, es por eso que el agua presente en las zonas saturadas puede moverse en sentido horizontal y vertical, ascendente o descendente.

2.1.4. Acuíferos costeros.

Los acuíferos costeros presentan diferentes particularidades en comparación a los acuíferos continentales, debido a que estos se encuentran conectados hidráulicamente con el mar y esto conlleva un contacto con el agua salada.

El comportamiento de los acuíferos costeros, además de depender de las características geológicas que pueden derivarse de los procesos de sedimentación en un entorno interfásial, están condicionados por la carga hidráulica fija impuesta por el mar y la densidad mayor del agua marina.

Como menciona Custodio y Llamas (1987), la zona costera se puede entender como el área de transición entre los medios, continental y marino, así como la transición de agua dulce a agua salada. Los acuíferos costeros constituyen embalses subterráneos de volumen variado, en donde el agua circula lentamente, según Pendás (1993), desde cm/día en los acuíferos más superficiales hasta cm/año en los acuíferos más profundos.

En la mayoría de los acuíferos costeros el agua subterránea fluye de forma natural hacia el mar, esto debido al potencial de carga hidráulica, producto de la recarga natural. Custodio (2002), menciona que, el nivel medio del mar es prácticamente constante, en este no existe flujo inducido excepto por las fluctuaciones periódicas de las mareas que son de corta duración.

2.1.4.2. Mecanismos de descarga de los acuíferos costeros.

Los acuíferos costeros se recargan directamente o en las zonas terrestres interiores, el agua dulce fluye y se descarga por diversos mecanismos en las zonas costeras. La cantidad de agua que circula y se mezcla en el acuífero, es una función del volumen de recarga del acuífero y la cantidad de agua que puede escapar a favor del gradiente mediante los mecanismos disponibles, Pendás (1993).

Pendás (1993), menciona que los acuíferos costeros se pueden agrupar en dos tipos:

Acuíferos no consolidados detríticos: Presentan porosidad y permeabilidad alta, la cual le permite almacenar y transmitir el agua con gran facilidad, estos acuíferos están constituidos por gravas y arenas de cauces de arroyada y fluviales meandriformes o trenzados, o por Limos y arcillas que ocupan las llanuras de inundación procedentes de la erosión y transporte de los relieves circundantes.

Acuíferos consolidados carbonatados: El agua presente en estos acuíferos, además de los intersticios entre granos, ocupa los huecos creados por la fracturación de la roca y los originados por proceso de disolución de la caliza y diagénesis en la dolomitización.

Los acuíferos carbonatados suelen poseer esta porosidad dual y la red de fisuras y conductos en las zonas costeras suele estar tan desarrollada que puede haber flujos muy importantes y la descarga se realiza por conductos preferentes en grandes manantiales, Pendás (1993).

Los mecanismos de descarga de agua dulce en la costa son:

1. Evapotranspiración en marjales y acuíferos costeros con nivel piezométrico somero.
2. Drenaje por fuentes, cauces, llanuras mareales y fondo del mar.
3. Mezcla con agua subterránea salada.
4. Flujo a través de un estrato semipermeable a causa de la presión osmótica originada por un gradiente de salinidad.

2.1.4.2. Explotación de acuíferos costeros.

En un acuífero costero, el flujo del agua dulce al mar, ayuda a mantener un balance hidrostático, este equilibrio de fluidos está en función del caudal de agua dulce vertido del mar. Dado un caso, en el cual la extracción por bombeo excede la recarga, el equilibrio es interrumpido y por consiguiente, el agua del mar penetra de forma continua hasta alcanzar las captaciones trayendo consigo una contaminación por efecto de la intrusión.

En el caso en el cual se presenta penetración de agua salina, se puede limitar con barreras físicas o hidráulicas, o reubicando captaciones. Estas medidas son costosas, pero a veces necesarias para una buena administración de los recursos disponibles.

Cuando se presenta una reducción de flujo hacia el mar, la interfase agua dulce-agua salada avanza tierra adentro y se produce una reducción de reservas iniciales, y en el caso en el cual la explotación del acuífero sea mayor a la recarga de este, se produce una penetración de la fase salina. Una solución para este problema es reducir el bombeo hasta que se regrese a la condición de equilibrio inicial.

Las opciones mayormente utilizadas y conocidas para el control de la salinidad en explotación de acuíferos por bombeos son:

- Reubicación de los centros de bombeo
- Recarga Natural
- Barrera hidráulica de inyección: Si a lo largo de la costa se establece una recarga tal que en cualquier punto se tenga una elevación piezométrica superior al potencial de agua salada que corresponde al nivel del mar, condición necesaria para evitar el flujo de agua salada hacia el interior, se tiene un efectivo control de la intrusión (Fundación centro internacional de hidrología subterránea)
- Depresión de bombeo: La limitación de la penetración del agua salada también puede lograrse estableciendo una línea de bombeo dentro de la cuña salina a lo largo de la costa, es decir, dentro de la masa de agua salada en forma de cuña que se encuentra en la base del acuífero, tal que intercepte todo el flujo de agua salada hacia el interior (Fundación centro Internacional de Hidrología Subterránea)

En vista de ello, la necesidad de tener conocimientos del comportamiento de la intrusión salina en acuíferos costeros, y llevar un control del bombeo, para poder controlar y evitar una contaminación del acuífero por un bombeo mayor al a recarga.

2.2. Intrusión Salina

La intrusión de agua salada es el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando el agua dulce, Otálvaro (1999)

Esta intrusión es causada por el movimiento del agua salada de los océanos hacia el agua dulce de los acuíferos costeros, en su mayoría, producto del bombeo de agua subterránea en pozos costeros o por la construcción de canales petroleros o de navegación; de igual forma puede ocurrir por procesos naturales como oleadas causadas por huracanes. Esta intrusión salina ocurre en todos los acuíferos costeros que están en continuidad hidráulica con el agua salada, en dónde la diferencia de densidades y el desequilibrio de presiones genera una contaminación.

2.2.1. Relación agua salada – agua dulce.

El peso específico del agua dulce se puede tomar como $1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$ con desviación pequeña dentro del rango de temperaturas normales. El peso del agua salada es mayor y puede tomarse entre 1020 y $1030 \text{ Kg}/\text{m}^3$ según la salinidad y la temperatura, siendo el valor más usual de $s = 1025 \text{ Kg}/\text{m}^3$ y su viscosidad es un 30% mayor que la del agua dulce a igual temperatura, Otálvaro (1999).

Fetter (2001) menciona que los contenidos muy bajos de sólidos disueltos en el agua subterránea no afectan la física del flujo, sin embargo, si el agua subterránea dulce es adyacente al agua subterránea salada, la diferencia de densidad entre los dos fluidos se vuelve muy importante.

Debido a la diferencia en sólidos disueltos, la densidad del agua salada es mayor que la del agua dulce y el agua salada se encuentra adyacente al agua dulce en la superficie terrestre, a menudo en el mismo acuífero, así como también en las zonas costeras oceánicas e islas oceánicas. El agua con alto contenido salino en acuíferos continentales podría ser atrapada desde la formación de la unidad rocosa (agua congénita) u ocurrir a través de mineralización debido a las condiciones de flujo estancado, Fetter (2001).

En algunas situaciones, el contacto entre el agua dulce y el agua salada, con un aumento constante en el contenido de sólidos disueltos, puede ser bastante fuerte. Si el acuífero se encuentra sujeto a las fluctuaciones de la recarga hidráulica, causada por las mareas, la zona de mezcla se amplía. Fetter (2001) menciona que en los acuíferos costeros no confinados, hay un flujo de agua subterránea, la cual ocurre tanto en la zona de agua dulce como en la zona de agua salada. En el agua salada cerca de la interfase, existe un flujo cíclico de agua dulce, la cual fluye hacia arriba para descargar cerca de la línea de costa.

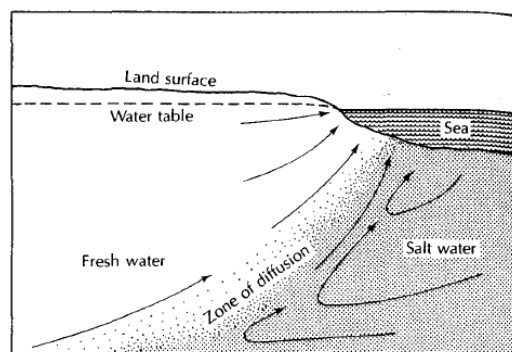


Figura 9. Circulación del agua subterránea dulce y salada en la zona de difusión en un acuífero costero;

Fetter (2001)

Otálvaro (1999) menciona que el estudio de la relación agua salada - dulce es compleja, debido a diferencias en las características de cada una, como lo es la densidad, viscosidad, temperatura y la miscibilidad de estos. Cuando dos fluidos están en contacto, y estos son inmiscibles, es decir, que no pueden ser mezclados, como lo son el petróleo y el agua, existe un límite definido y brusco el cual forma una interfase.

En el caso en el cual, los fluidos son miscibles, es decir, se pueden mezclar, como lo es el agua dulce y el agua salada, no existe una interfase brusca, sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla, la cual también se le conoce como zona de transición o de difusión.

2.2.2. Zona de mezcla.

Fetter (2001) menciona que el cambio de agua dulce a agua salada se produce por un constante aumento en el contenido de sólidos disueltos, y que, en algunas situaciones, el contacto puede ser bastante fuerte lo cual representa una zona muy delgada de mezcla de agua.

La zona de mezcla dentro de la cual se encuentra la interfase teórica, es una zona dinámica en la cual el agua se mueve no solo como consecuencia de las diferencias de densidad, sino también debido a cambios del nivel piezométrico en ambos líquidos.

Otálvaro (1999)

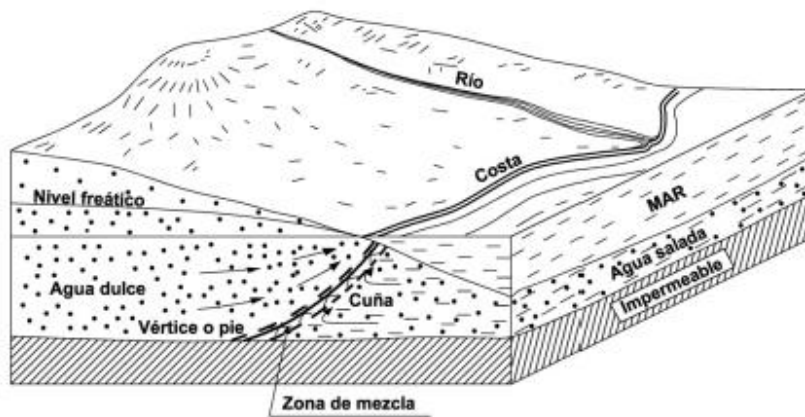


Figura 10. Cuña de intrusión marina en un acuífero costero. Modificada de Custodio y Llamas (1976).

Custodio (2002), Menciona que una serie de circunstancias genera el riesgo de la degradación de la calidad del agua subterránea en acuíferos costeros mediante la introducción de un exceso de sales disueltas. El agua salada es una de las más importantes fuentes de salinidad, pero no la única.

2.2.3. Fuentes de salinidad.

Las posibles fuentes de salinidad en los acuíferos costeros son:

- Intrusión de agua marina moderna.
- Mezcla de agua fósil marina no drenada en acuitardos o en sistemas acuíferos de flujo lento
- Spray de agua marina en zonas costeras con fuertes vientos
- La intensa evapo-concentración de aguas superficiales y subterráneas en climas secos.
- La intensa evaporación de agua subterránea en las zonas de descarga y humedales.

- La disolución de las sales de las evaporitas presentes en formaciones geológicas
- El desplazamiento de agua subterránea salina contenida en alguna formación profunda
- La infiltración salina del regreso de flujos de irrigación
- La contaminación por agua salina derivada de:
 - Drenado de minas y lixiviados, especialmente en minas de sales y potasio
 - Fugas de procesos industriales e instalaciones de refrigeración que utilizan agua salobre o agua salina.
 - Efluentes de plantas de desalinización y de desionización
 - Disolución de sal utilizada para el deshielo de caminos
 - Evaporización intensiva de agua de fábricas
- Agua salina importada de otras áreas, Custodio (2002).

3. Metodología

3.1. Bases teóricas

La capacidad que presentan los acuíferos para almacenar y liberar agua es determinada por los principales parámetros siguientes:

- 1) Conductividad hidráulica K (L/T): Indica la capacidad de un acuífero para conducir el agua bajo gradientes hidráulicos y depende de las propiedades tanto del medio como del fluido.

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

En donde g es la aceleración de la gravedad, k la permeabilidad del medio, ρ la densidad y μ la viscosidad.

- 2) Porosidad (%): Mide el volumen relativo de los poros o vacíos en una formación geológica. La parte más importante desde el punto de vista hidrogeológico es la porosidad eficaz (n_e) que mide el volumen relativo de agua que el acuífero puede liberar por acción de la gravedad, es decir el agua útil o realmente explotable.
- 3) Permeabilidad (L^2): Capacidad de un medio para almacenar y transmitir agua por medio de los vacíos que se encuentran comunicados entre sí.
- 4) Transmisividad T : Parámetro aplicable al caso de acuíferos confinados. Se define como el volumen de agua por unidad de tiempo (o caudal) que pasa a través de una sección vertical de ancho unitario y de altura b , siendo b el espesor del acuífero confinado.

De acuerdo a esta definición y a la de permeabilidad, puede escribirse que:

$$T = Kb$$

En donde K es la conductividad hidráulica y b es el espesor de la capa.

- 5) Coeficiente de almacenamiento: Se define como el volumen de agua que es liberado por un prisma del acuífero de sección unitaria y de altura igual a la parte saturada del mismo cuando se produce un cambio unitario de nivel piezométrico.

En los acuíferos libres el agua que se extrae a través de un pozo proviene esencialmente del agua liberada por efecto de la gravedad. En los acuíferos confinados, los cuales se encuentran completamente saturados y bajo otras condiciones de presión, el agua es

liberada debido a fenómenos de elasticidad que operan tanto sobre el material sólido o armazón del acuífero como sobre el agua misma. Otálvaron (1999)

3.2. Condiciones Geohidrológicas en acuíferos costeros

Se han desarrollado muchos modelos matemáticos para la simulación del movimiento del agua subterránea en acuíferos costeros, J. Bear (1984) menciona que la posición de la interfase así como su forma, puede variar de acuerdo a la variación del flujo de agua dulce hacia el mar. Bajo ciertas condiciones puede existir un equilibrio, con una interfase estacionaria y cierto flujo de agua dulce que permanece por encima de la interfase.

Actualmente en un acuífero explotado, y especialmente durante un periodo de desarrollo cuando el bombeo incrementa continuamente, la interfase nunca es estacionaria, siempre está en movimiento, dependiendo de los cambios introducidos en los componentes del balance del agua dulce y, por lo tanto, en el flujo de agua dulce hacia el mar por encima de la interfase, J. Bear (1984). Cerca de la costa, la zona correspondiente al agua dulce se sobrepone al agua salada, con el movimiento de la interfase sirviendo como un límite entre estas dos zonas.

En el desarrollo de las ecuaciones se supone que el flujo en estas dos zonas es esencialmente a lo largo de una línea perpendicular a la costa, y por encima de la interfase, el flujo siempre va en dirección hacia el mar.

En vista de que el hecho de la geometría de ambas zonas es tal que el grosor de cada zona es mucho más pequeño que la longitud horizontal de interés, el flujo en las dos zonas puede ser considerado como esencialmente horizontal. Esto permite la aplicación del enfoque hidráulico para el flujo de las dos zonas, J. Bear (1984).

3.3. Ley de Darcy

Principio básico que rige el movimiento de agua en el seno del acuífero. Establece que el flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga, a la sección considerada y la conductividad hidráulica, Fetter (2001).

Darcy encontró que la tasa de flujo de agua a través de un lecho de cierta “naturaleza dada” es proporcional a la diferencia en la altura del agua entre dos extremos de los lechos del filtro e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria de flujo, Fetter (2001). Determinó también que la cantidad del flujo además es proporcional al coeficiente K , el cual es conocido como el coeficiente de conductividad hidráulica.

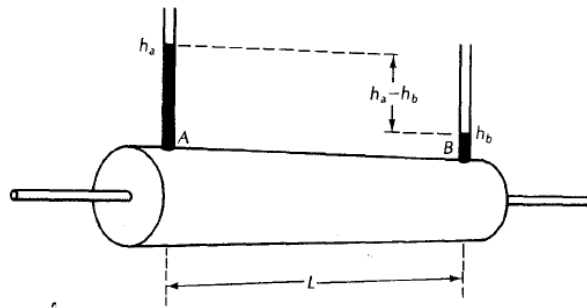


Figura 11. Tubería horizontal con arena para demostrar el experimento de Darcy (Fetter, 2001).

Algebraicamente la Ley de Darcy se expresa cómo:

$$Q = -KA \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad (1)$$

En donde:

$Q = \text{Caudal de agua}$

$A = \text{Sección de flujo}$

$K = \text{Conductividad hidráulica}$

$\frac{dh}{dl} = \text{Pérdida de carga}$

3.4. Suposición de Dupuit

Para conocer la velocidad u en cada punto del nivel freático, es necesario conocer principalmente su altura (h_f). En un acuífero libre, la velocidad y el nivel freático varían de un punto a otro y puesto que, rara vez es horizontal, las superficies equipotenciales no son verticales, por lo tanto no se conoce con exactitud la posición del nivel freático, complicando la solución.

Las superficies equipotenciales representan el lugar geométrico de los puntos en que el potencial hidráulico total tiene el mismo valor y el potencial hidráulico se denomina como la *energía total* por unidad de masa y es igual al producto de la altura de la columna de agua que se encuentra sobre la unidad por la aceleración gravitacional.

Considerando el volumen de una unidad de agua con una densidad δ a una altura z respecto a un plano de referencia y con una columna de agua w por encima de dicha unidad. Podemos determinar su energía potencial:

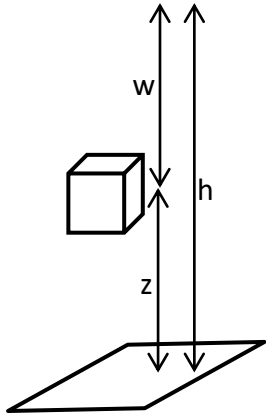


Figura 12. Unidad de agua respecto a un plano de referencia

$$\text{Energía potencial} = \text{masa} \cdot \text{gravedad} \cdot \text{altura}$$

$$\text{Energía potencial} = \delta gz$$

La presión a la cual el volumen unitario es capaz de soportar es igual al peso de la columna del agua dividida por la superficie.

$$\text{Peso} = \text{masa} \cdot g = \text{volumen} \delta \cdot g = \text{base} \cdot \text{altura} \cdot \delta \cdot g = w\delta g$$

$$\text{Energía de presión} = \frac{\text{Peso}}{\text{Superficie}} = \frac{w\delta g}{1}$$

$$\text{Energía total por unidad de volumen} = \text{Energía potencial} + \text{Energía de presión}$$

$$= \delta gz + w\delta g$$

Dividiendo por la densidad δ obtenemos la energía total por unidad de masa:

$$\begin{aligned} \text{Energía total por unidad de masa} &= \text{Energía potencial} + \text{Energía de presión} = z + wg \\ &= hg \end{aligned}$$

De lo cual se obtiene el potencial hidráulico ϕ :

$$\phi = z + wg = hg$$

Dupuit observó que las pendientes del nivel freático eran muy pequeñas, en condiciones en las cuales la recarga vertical del acuífero es nula, el nivel freático constituye una línea de corriente; definiendo línea de corriente a la trayectoria que siguen las partículas dentro de un flujo.

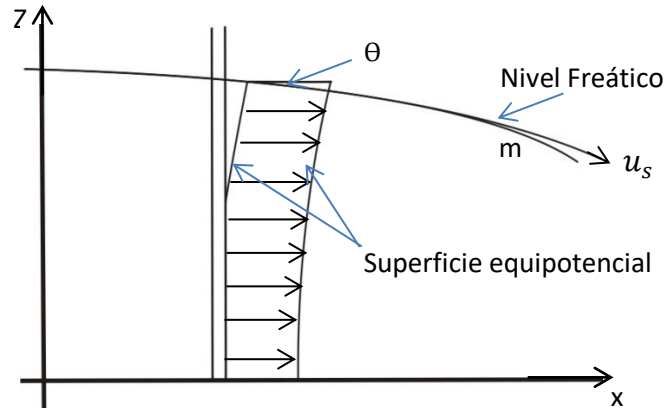


Figura 13. Hipótesis de Dupuit. Modificada de Hidráulica de Pozos, Rodríguez y Sánchez (s.f).

En un punto cualquiera del nivel freático, el cual llamaremos m , la velocidad u_s es tangente al nivel freático y tenemos que:

$$u_s = -K \frac{d\phi}{ds} = -K \frac{dz}{ds} = -K \text{sen}\theta \quad (2)$$

La presión en el nivel freático es la atmosférica, entonces $w = 0$, por lo tanto, de la ecuación $\phi = z + wg$ obtenemos que $\phi = z$. Rodríguez y Sánchez (s.f) mencionan que dado que θ es muy pequeño, lo cual equivale a considerar superficies equipotenciales verticales y el tener un flujo horizontal, Dupuit propuso reemplazar $\text{sen}\theta$ por $\text{tan}\theta = dh/dx$.

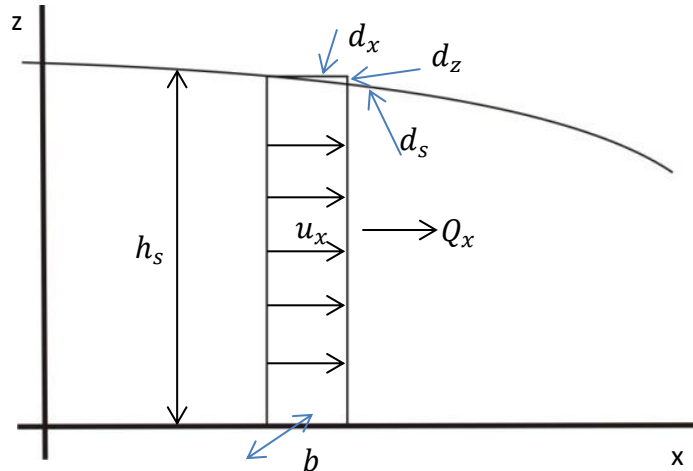


Figura 14. Hipótesis de Dupuit. Modificada de Hidráulica de Pozos, Rodríguez y Sánchez (s.f).

Por lo tanto, aplicando la ecuación de Darcy se cumple:

$$u_x = -K \frac{\partial h}{\partial x}; h_s = h_s(x, y) \quad (3)$$

El gasto total Q que atraviesa una sección transversal de ancho b es:

$$Q_x = -bKh_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \quad (4)$$

Se cumple que el gasto por unidad de ancho es:

$$\frac{\bar{Q}}{b} = -Kh_s \nabla h_s \quad (5)$$

3.5. Aproximación de Ghyben-Herzberg

Un gran número de científicos han hecho contribuciones significativas para el estudio de la interfase del agua dulce y agua salada en acuíferos costeros. Estudios como menciona Otálvaro (1999), por W. Baydon-Ghyben en 1888-1889 y A. Herzberg en 1901; en el final del siglo XIX han sido ampliamente citados y han dado lugar al principio de Ghyben-Herzberg.

En un acuífero costero no confinado, la profundidad a la que se extiende el agua dulce por debajo del nivel del mar es aproximadamente 40 veces la altura del nivel freático (h_f) por encima del nivel del mar, Fetter (2001).

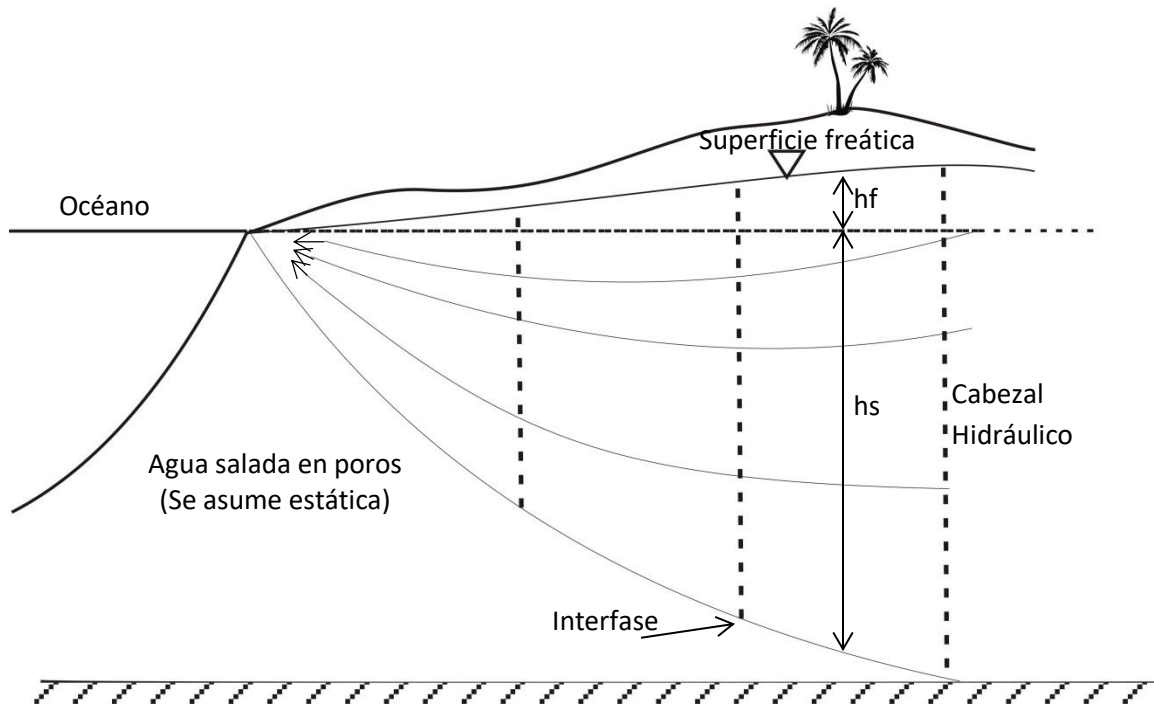


Figura 15. Relación de Ghyben-Herzberg

En la figura 15 se observan las líneas de descarga hacia el océano y la zona de mezcla, es decir la frontera entre agua dulce y salada, resultado de la mezcla de las dos zonas causada por las fluctuaciones de la marea y de las cargas hidráulicas, las cuales a su vez causan variaciones de flujo. Estos fenómenos transitorios causan que la interfase entre agua dulce y salada sufra variaciones y pueda incrementar el espesor de la zona de mezcla, Fitts (2002). Una aproximación que simplifica el análisis de este fenómeno,

es considerar que la separación entre los dos cuerpos de agua se da en una interfase abrupta (*Sharp Interface*).

En un punto de la interfase a una profundidad $z = h_s$, por debajo del nivel del mar, asumiendo la presión del agua salada como hidrostática, se establece:

$$P_s = \rho_s g h_s \quad (6)$$

En donde ρ_s es la densidad del agua salada, de la cuál en los océanos varía de $\rho_s = 1.030 \text{ g/cm}^3$ a 0°C a $\rho_s = 1.023 \text{ g/cm}^3$.

Y en el mismo punto la presión del agua dulce se asume hidrostática, y está dada por:

$$P_f = \rho_f g (h_s + h_f) \quad (7)$$

En donde ρ_f es la densidad del agua dulce, la cual normalmente se considera con un valor de $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$.

En la interfase, con la suposición de equilibrio hidrostático, en todo punto $P_f = P_s$, y a partir de la ecuación (6) y (7) obtenemos:

$$\rho_f g (h_s + h_f) = \rho_s g h_s \quad (8)$$

$$h_s (\rho_s g - \rho_f g) = \rho_f g h_f \quad (9)$$

$$h_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} h_f \quad (10)$$

De lo cual obtenemos el principio de Ghyben-Herzberg (explicado por Fetter, (2001)):

Considerando $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$ y $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$, obtenemos la relación descrita anteriormente:

$$h_s = 40h_f \quad (11)$$

Haciendo un cambio de variables dado por:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} = \delta \quad (12)$$

La ecuación 11 se convierte en

$$h_s = \delta h_f \quad (13)$$

En donde:

h_s – es la profundidad de la interfase con respecto al nivel del mar (ft o m)

h_f es la elevación del nivel freático por encima del nivel del mar (ft o m)

ρ_f es la densidad del agua dulce (g/cm^3)

ρ_s es la densidad del agua salada (g/cm^3)

La aplicación de este principio se limita a las situaciones en las que tanto el agua dulce como el agua salada mantienen un equilibrio hidrostático.

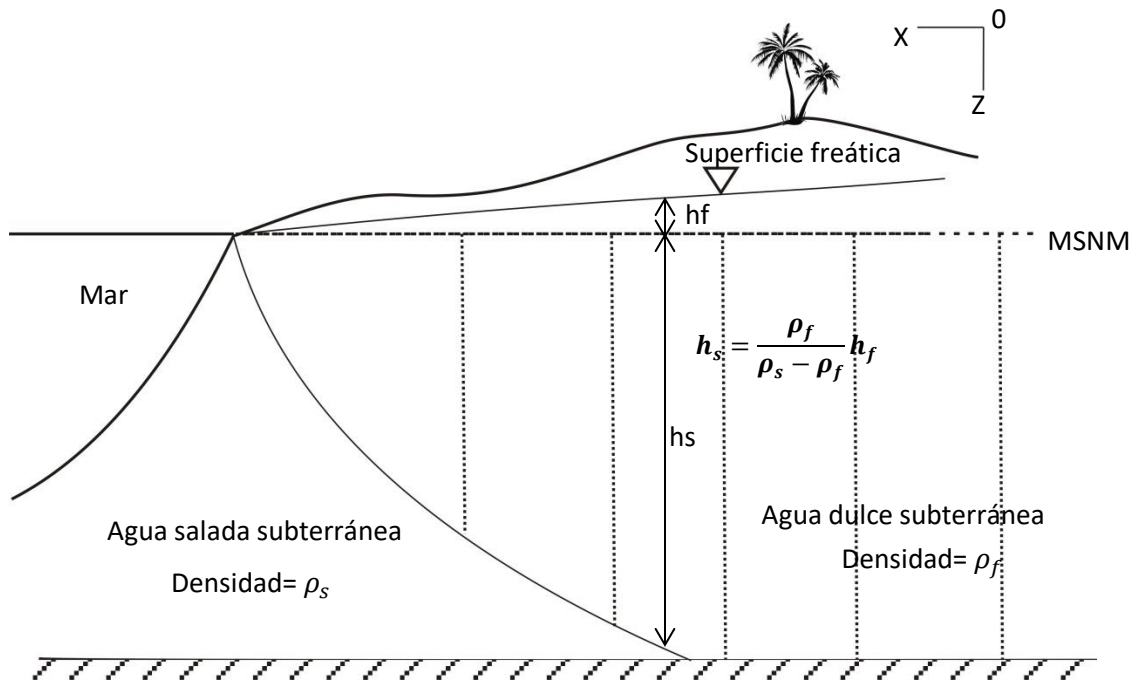


Figura 16. Relación de la carga del agua dulce y la profundidad a la interfase de agua salada Modificada de J. Bear (1984).

La figura 15 ilustra el principio de Ghyben-Herzberg para un acuífero costero no confinado.

3.6. Determinación de la interfase

J. Bear et al.,(1984) describieron un método aproximado para determinar la interfase freática de un acuífero costero, este método considera estados sucesivos estacionarios para calcular el movimiento de la interfase de agua dulce y agua salada durante un periodo determinado de tiempo, en función a condiciones iniciales y el cambio de flujo de agua dulce hacia el mar. El desarrollo de las siguientes ecuaciones se basa en este trabajo.

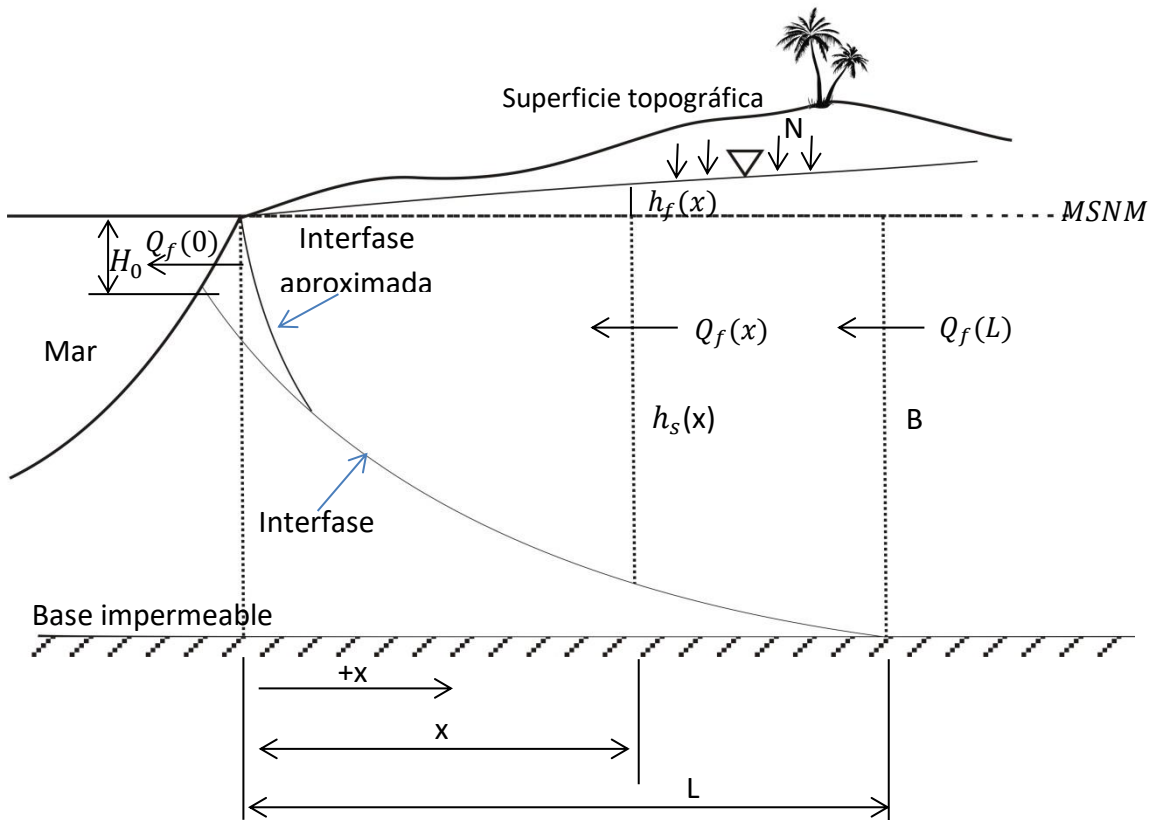


Figura 17. Sección esquemática de un acuífero costero. Modificada de J. Bear (1984).

La figura 17 muestra una sección esquemática de un acuífero costero freático, delimitado por una capa horizontal impermeable en la parte inferior, y en la parte superior, recargado por la infiltración natural, J. Bear (1984), de la cual:

N = Recarga Natural

Q_f = Flujo de agua dulce

h_f = Eevación de la superficie freática por encima del nivel del mar

h_s = Profundidad desde el nivel medio del mar hasta la interfase

B = Profundidad desde el nivel medio del mar hasta el límite inferior del acuífero

L = Máxima longitud de la intrusión

La longitud de la intrusión es medida desde la línea de costa hasta la línea de intersección de la parte inferior del acuífero costero y la interfase.

El análisis con base en lo dicho por J. Bear (1984), se limita para casos en donde la superficie freática se eleva monótonamente por encima de la longitud de la intrusión, de modo que significa que el flujo de agua dulce va hacia el mar a cualquier distancia de la costa.

De acuerdo a la sección esquemática del acuífero costero, se considera el eje horizontal positivo hacia la derecha, por consiguiente, el flujo hacia la costa tiene signo negativo.

Asumiendo un balance de agua dulce en un estado estacionario para un volumen de control de una sección unitaria extendido desde la costa hasta una distancia x .

$$Q_f(x) - Nx - Q_f(0) = 0 \quad (14)$$

La dirección de $Q_f(x)$ hacia $(-x)$ implica que su magnitud es negativa. $Q_f(0)$ se define como el flujo hacia el mar en la línea de costa $x = 0$. Asociando la ecuación de Darcy ecuación (1), bajo la aproximación de Dupuit ecuación (4) (de flujo esencialmente horizontal) y la relación de Ghyben-Herzberg ecuación (11), obtenemos:

$$Q_f(x) = -K(\delta + 1)h_f(x) \frac{dh_f(x)}{dx} \quad (15)$$

Sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (14):

$$Q_f(x) = -K(\delta + 1)h_f(x) \frac{dh_f(x)}{dx} - Nx - Q_f(0) = 0 \quad (16)$$

En donde K es la conductividad hidráulica.

Integrando la ecuación (16), y utilizando como condiciones de frontera $h_f(0) = h_0$, obtenemos:

$$-2Q_f(0)x - Nx^2 - K(\delta + 1)[h_f^2(x) - h_f^2(0)] = 0 \quad (17)$$

En lo siguiente asumiremos que $h_0=0$, lo cual se justifica en la mayoría de las circunstancias prácticas.

De la ecuación (17), podemos obtener el valor de $h_f(x)$ y utilizando la relación de Gyben-Herzberg, obtenemos el valor de $h_s(x)$, recordando que $h_f = h_s/\delta$ (de la ecuación (13)) el cual corresponde a la elevación de la superficie freática por encima del nivel del mar y la profundidad hasta la interfase respectivamente:

$$h_f(h) = \frac{\sqrt{\frac{-2Q_f(0)x - Nx^2}{K\left(\frac{1+\delta}{\delta^2}\right)}}}{\delta} \quad (18)$$

$$h_s(x) = \delta h_f(x) = \sqrt{\frac{-2Q_f(0)x - Nx^2}{K\left(\frac{1+\delta}{\delta^2}\right)}} \quad (19)$$

La selección del signo positivo al despejar la ecuación cuadrática es por consideraciones físicas.

De las ecuaciones (18 y 19) podemos obtener la forma parabólica de la superficie freática $h_f(x)$ y de la interfase $h_s(x)$ en un estado estacionario y la dependencia de estas funciones en $Q_f(0)$.

Uno de los indicadores calculados normalmente respecto a la intrusión salina, es la máxima coordenada horizontal de la interfase agua salada – agua dulce, es decir, a qué distancia de la costa la interfase intercepta al fondo impermeable del acuífero costero (Figura 16). A este indicador se le identifica en las referencias bibliográficas como L (*The toe of the interfase*), la punta de la interfase.

Para calcular el valor de L utilizamos la ecuación (17) y despejamos para la coordenada horizontal x , recordando que $h_f = h_s/\delta$:

$$x = \frac{Q_f(0)}{N} + \frac{\sqrt{Q_f^2(0) - N \left(K \frac{1 + \delta}{\delta^2} \right) (h_s^2(x))}}{N} \quad (20)$$

La selección del signo positivo al despejar la ecuación cuadrática es por consideraciones físicas.

Definiendo:

$$A = KN \left(\frac{1 + \delta}{\delta^2} \right)$$

Por lo que obtenemos:

$$x = N^{-1} \left[Q_f(0) + \{ Q_f^2(0) - A h_s^2(x) \}^{1/2} \right] \quad (21)$$

En $x = L$, la interfase intercepta el fondo impermeable del acuífero y por lo tanto:

$$h_s(L) = B$$

En dónde recordamos que B corresponde a la profundidad del fondo impermeable respecto al nivel del mar. Utilizando nuevamente la relación de Ghybern-Herzberg, obtenemos que:

$$h_f(L) = \frac{h_s}{\delta} = \frac{B}{\delta}$$

De $h_s = B$ en $x = L$ (=the toe of the interfase), obtenemos la siguiente expresión para la longitud máxima de la intrusión:

$$L = N^{-1} \left[Q_f(0) + \{Q_f^2(0) - AB^2\delta^2\}^{1/2} \right] \quad (22)$$

La cual se refiere a *la longitud de la intrusión salina* (en un estado estacionario estable) del flujo del agua dulce hacia el mar.

4. Datos y resultados obtenidos

4.1 Solución numérica para $N = 0$

La solución realizada en esta sección corresponde al análisis del comportamiento de las parábolas que describen a la superficie freática h_f y a la intrusión h_s . Partiendo de las suposiciones descritas en el capítulo 3, la suposición de Dupuit y a la aproximación de Ghyben-Herzberg, las cuales nos permiten simplificar el problema permitiendo un análisis más claro, se obtiene el comportamiento de las parábolas previamente mencionadas.

Para el caso en el que no se presenta recarga por infiltración natural en la parte superior, $N = 0$, $Q_f(L) = Q_f(0)$, es decir que el flujo se considera constante a lo largo de x .

Para obtener la ecuación que describe la longitud de la intrusión salina se integra la ecuación (16), haciendo un cambio de variables con $N = 0$ y siguiendo el análisis como para el caso de las ecuaciones (20) y (22), se obtiene la siguiente ecuación:

$$L = -K \frac{1 + \delta}{2\delta^2} \frac{B^2}{Q_f(0)} \quad (23)$$

Para obtener el valor de la longitud L se sustituyen los valores correspondientes en cada variable en la ecuación (23). De la misma forma, para conocer la forma parabólica de la superficie freática h_f y de la interfase h_s se evalúa en las ecuaciones (18) y (19).

De las ecuaciones (18), (19) y (23) se puede observar que el flujo es la única variable, tanto la constante de conductividad hidráulica (K), la diferencia de densidades (δ) y la profundidad del acuífero (B), son valores que permanecen constantes.

$$K = 8395 \frac{m}{\text{año}}$$

$$\delta = 40$$

$$B = 102 \text{ m}$$

Recordando la ecuación (14):

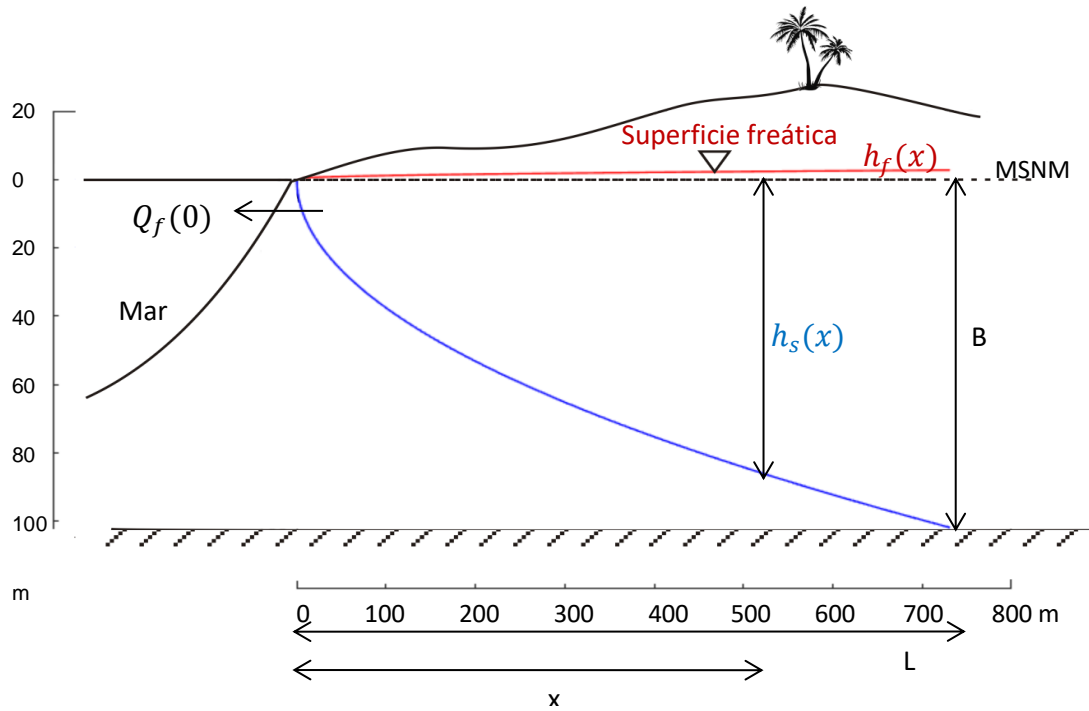
$$Q_f(x) + Nx - Q_f(0) = 0 \quad (24)$$

Con $N = 0$ se obtiene que $Q_f(x) = Q_f(0)$. Permitiendo considerar el flujo constante a lo largo de x en cada evaluación, obteniendo los valores de la longitud de la intrusión salina L a diferentes condiciones.

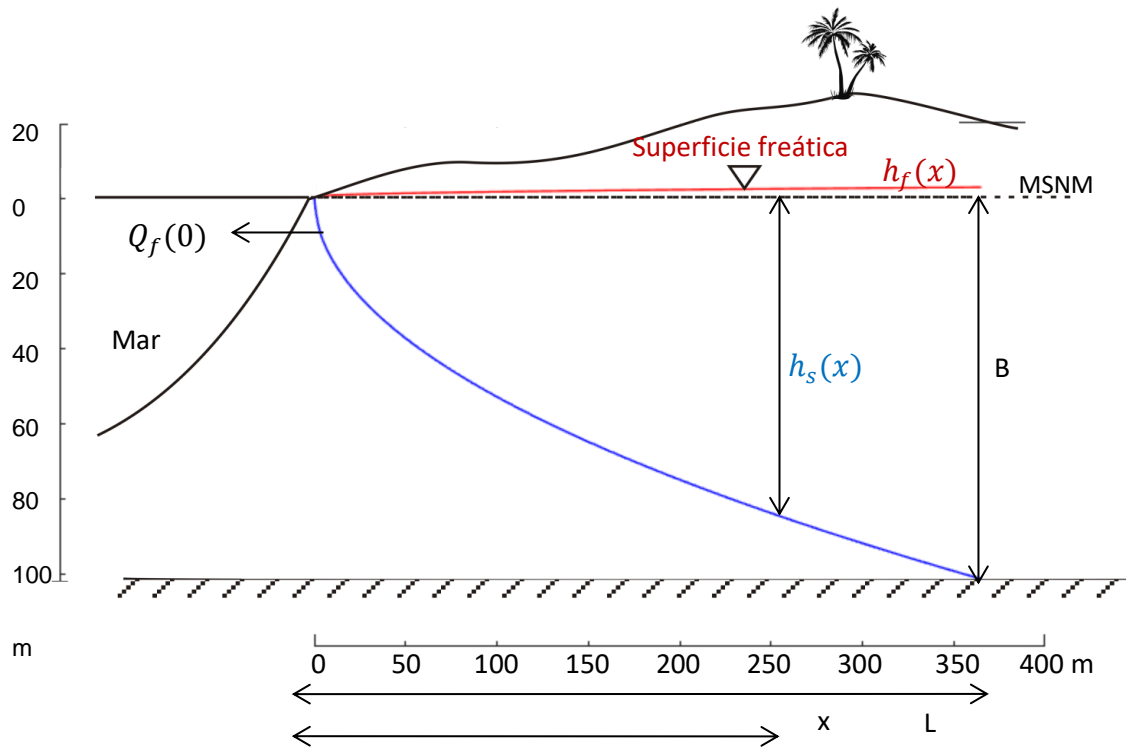
Para poder comprender con mayor claridad el comportamiento de la forma parabólica de la intrusión salina y su posición, se realizó una evaluación con diferentes valores de flujo de agua dulce en dirección hacia el mar, $Q_f(0)$.

Tomando como valor inicial de flujo de agua dulce $Q_f(0) = 1,530.70 \text{ m}^2/\text{año}$, valor que fue incrementado para cada gráfica con el fin de obtener la forma y posición de la interfase salina a diferentes condiciones geohidrológicas y con esto observar el cambio que presenta la intrusión salina.

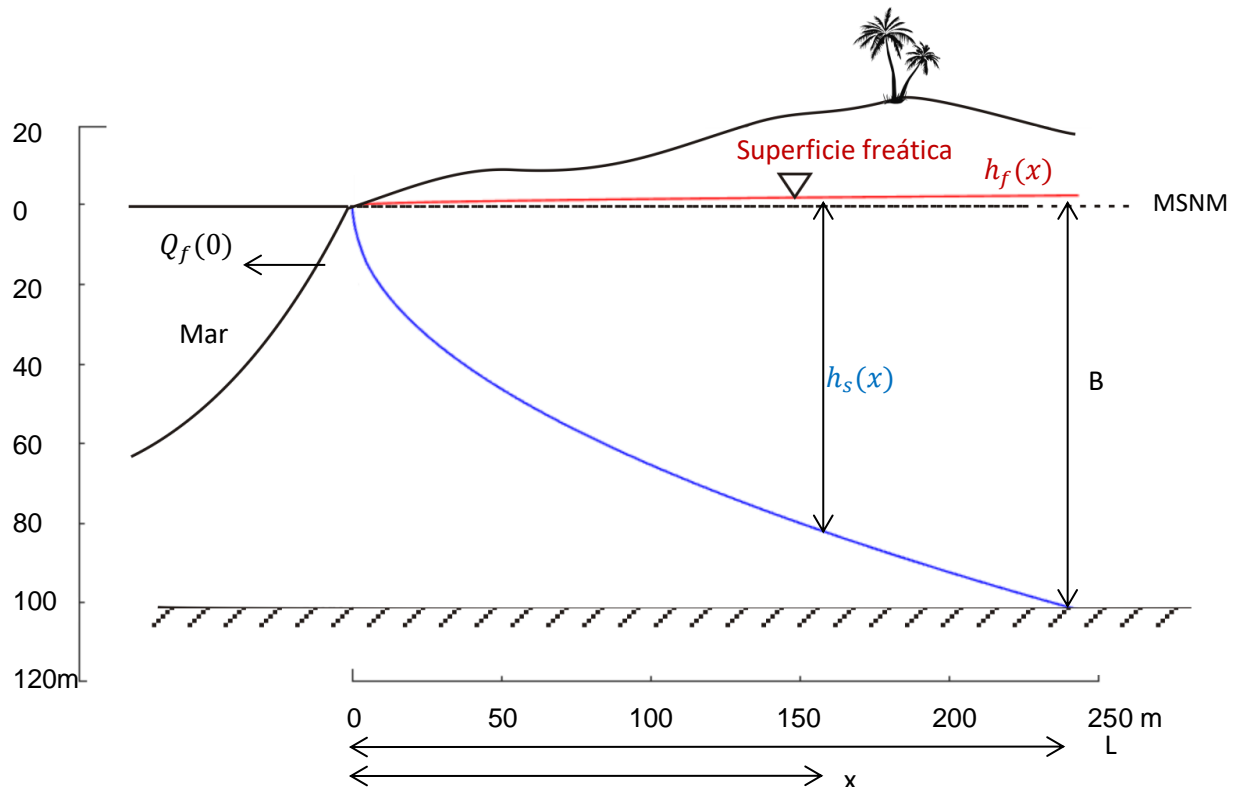
A continuación se muestran los resultados obtenidos de acuerdo a lo descrito anteriormente, permitiendo observar la importancia del flujo de agua dulce $Q_f(0)$ presente en aguas subterráneas que se encuentran en contacto con el agua salada.



Gráfica 1. Posición de la intrusión salina con un flujo de $Q_f(0) = 1,530.70 \text{ m}^2/\text{año}$



Gráfica 2. Posición de la intrusión salina con un flujo de $Q_f(0) = 3,061.4 \text{ m}^2/\text{año}$



Gráfica 3. Posición de la interfase a $Q_f(0) = 4,592.1 \text{ m}^2/\text{año}$

Las gráficas presentadas anteriormente describen el comportamiento parabólico de la interfase h_s correspondiente a la parábola azul, y el comportamiento de la superficie freática h_f , correspondiente a la parábola roja.

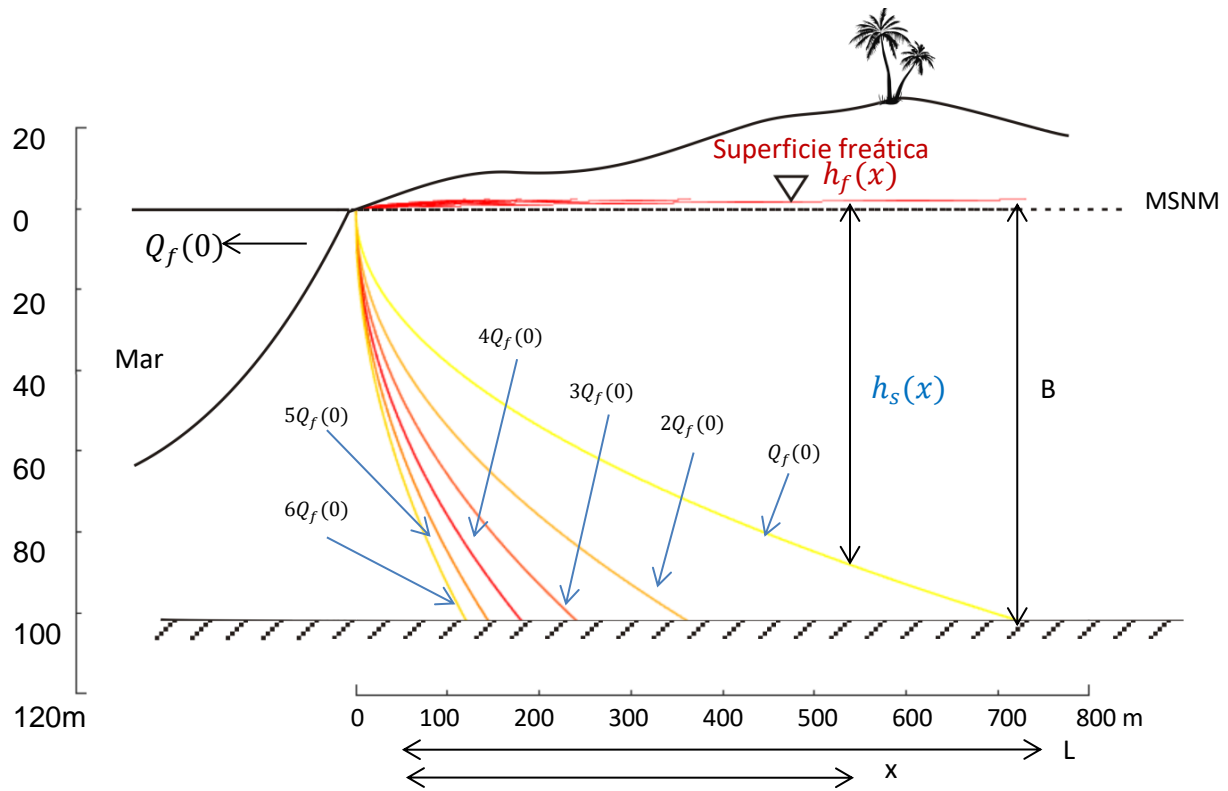
De forma que se puede observar que a un mismo valor de profundidad, $B = 102\text{m}$ con diferente valor de flujo de agua dulce $Q_f(0)$ la longitud de la intrusión salina varía de forma descendente, relacionándose con el aumento de valores de flujo.

Tabla 1. Valores de la longitud de la intrusión salina a diferentes valores de flujo.

$Qf(0)$	L
1,530.70 m²/año	731.0799m
3,061.4m²/año	365.5399m
4,592.1m²/año	243.6933m

La tabla 1 representa los valores de longitud de la intrusión salina obtenidos para cada valor correspondiente de flujo de agua dulce, en estos valores se puede observar una disminución en la longitud de la intrusión salina con respecto a un aumento en el valor de flujo.

Para obtener un resultado más analítico del comportamiento de la intrusión salina a diferentes valores de flujo $Qf(0)$, se graficó para $Qf(0) = 1,530.70, 2Qf(0), 3Qf(0), 4Qf(0), 5Qf(0), 6Qf(0)$. Obteniendo una sola gráfica para estos valores, con el fin de poder visualizar el comportamiento de las parábolas a diferentes condiciones de flujo.



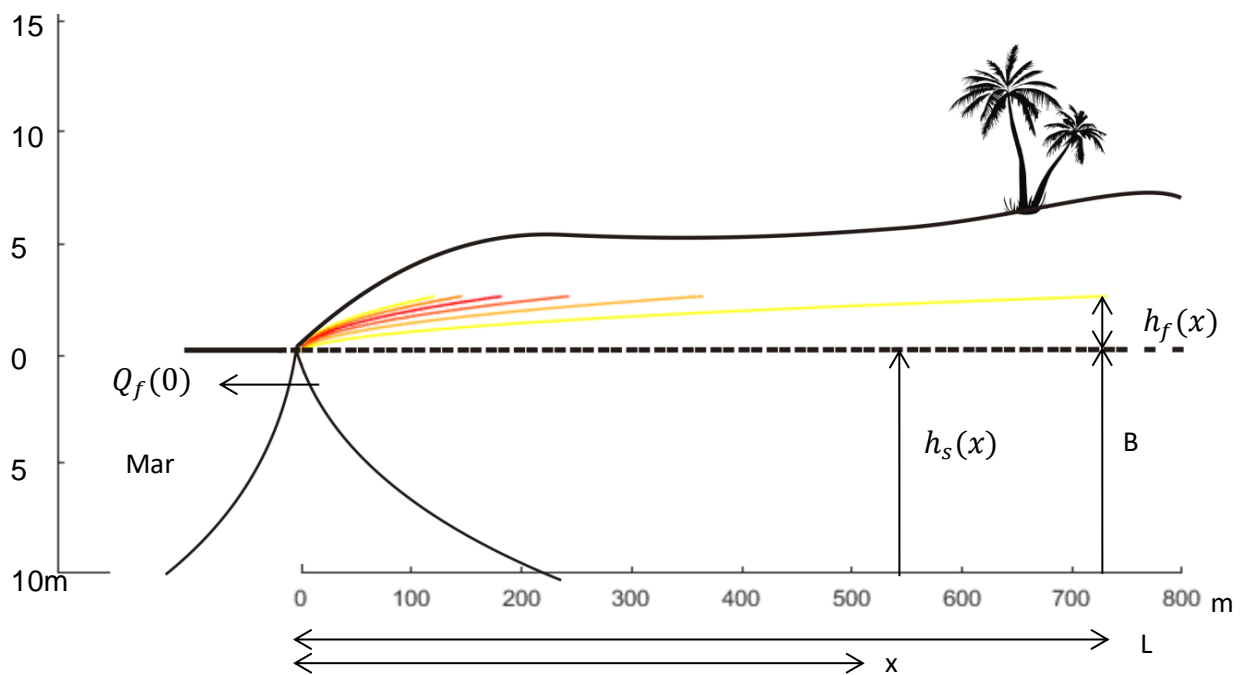
Gráfica 4. Posición de la interfase a diferentes valores de flujo

Tabla 2. Valores de longitud de la intrusión salina a diferentes valores de flujo

$Q_f(0)$	L	
$Q_f(0)$	$1530.70m^2/año$	$731.0799m$
$2Q_f(0)$	$3061.4m^2/año$	$365.5399m$
$3Q_f(0)$	$4592.1m^2/año$	$243.6933m$
$4Q_f(0)$	$6122.8m^2/año$	$182.7700m$
$5Q_f(0)$	$7653.5m^2/año$	$146.2160m$
$6Q_f(0)$	$9184.2m^2/año$	$121.8466m$

En la tabla 2 se especifican los valores de la longitud de la intrusión salina obtenidos para los valores de flujo correspondientes evaluados en la gráfica 4.

El cambio presente en la parábola que describe la superficie freática h_f es muy pequeño para poder ser observado en la misma gráfica por lo cual para permitir una mejor observación de las parábolas se realizó una gráfica característica del cambio de la forma parabólica de la superficie freática h_f con respecto a los mismos valores evaluados para la forma parabólica de la interfase h_s .



Gráfica 5. Posición de la superficie freática a diferentes valores de flujo

Conforme a los resultados obtenidos previamente se puede observar que a un aumento en el valor del flujo de agua dulce en dirección al mar, la longitud de la intrusión salina disminuye, en una diferencia de $7,653.5m^2/año$ de flujo de agua dulce se observan $609.2333m$ de diferencia en la longitud de la intrusión salina.

Observando la gráfica 4, la parábola que describe la interfase h_s conforme la longitud disminuye, la parábola se va acercando más a la vertical en donde $x = 0$, es decir a la costa, comportamiento que se relaciona con el aumento en el valor del flujo de agua dulce $Qf(0)$.

La parábola que describe el nivel freático h_f observada en la gráfica 5, se comporta de la misma forma que la parábola de la interfase h_s (gráfica 4), la diferencia radica en la altura que está presenta. De acuerdo a lo evaluado, la altura del nivel freático es de $2.55m$, y de igual manera, conforme el flujo de agua dulce aumenta, la longitud del nivel freático disminuye.

De forma que, para un medio simple, considerando un flujo constante se determina la dependencia de estas funciones al valor del flujo de agua dulce $Qf(0)$, estableciendo que el valor de la longitud de la intrusión salina es inversamente proporcional al valor del flujo de agua dulce, como se puede observar en los resultados mostrados en la tabla 2.

4.2 Solución numérica para $N \neq 0$

De acuerdo a lo obtenido en la sección 3.2 se asume una solución simple un medio en el cual se desprecian factores tales como la recarga natural de agua (N), con esto tomando el flujo constante a lo largo de x . Se sabe que en realidad las condiciones no son tan sencillas; ¿Qué pasaría con la intrusión salina en condiciones geohidrológicas diferentes?

En condiciones geohidrológicas en las cuales se ve involucrada la recarga natural de agua (N), una infiltración pluvial; se presenta un cambio en el análisis del comportamiento de la intrusión salina; es decir, con $N \neq 0$ el valor de $Q_f(x)$ varía a lo largo de x .

Recordando la ecuación (14):

$$Q_f(x) + Nx - Q_f(0) = 0 \quad (25)$$

Podemos determinar que el valor de $Q_f(x) = Q_f(0) - Nx$. Para el caso en que $Q_f(L) = 0$ y $N \neq 0$, entonces $Q_f(0) = NL$, y obtenemos de la ecuación (20):

$$L = [K(1 + \delta)N^{-1}]^{1/2}(B/\delta) \quad (26)$$

Conforme a Conagua (2018) México anualmente recibe una aproximación de 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, de esta agua, se estima que el 72.2% se evapotranspira, el 21.5% escurre por ríos o arroyos y el 6.3% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos.

De acuerdo al atlas del agua en México, Conagua (2016) el Golfo de México presenta los valores mayores de precipitación pluvial (mm) anual, oscilando aproximadamente de $1000mm - 4508.3mm$, en el océano pacífico los valores oscilan aproximadamente de $750mm - 500mm$ para la zona Norte y $1000mm - 800mm$ para la zona centro.

Tomando como referencia los valores de precipitación (Conagua, 2016) anteriores y recordando que solo un porcentaje correspondiente se infiltra y recarga los acuíferos, se toman los siguientes valores de la tabla 3 para realizar el análisis.

Tabla 3. Valores de precipitación pluvial según Conagua (2016)

ZONA	DATO $\frac{m}{año}$
GOLFO DE MÉXICO	0.2
	0.4
PACÍFICO NORTE	0.075
PACÍFICO SUR	0.1

A partir de la ecuación (23) se calcula la longitud de la intrusión salina sustituyendo los valores correspondientes.

$$K = 8395 \frac{m}{año}$$

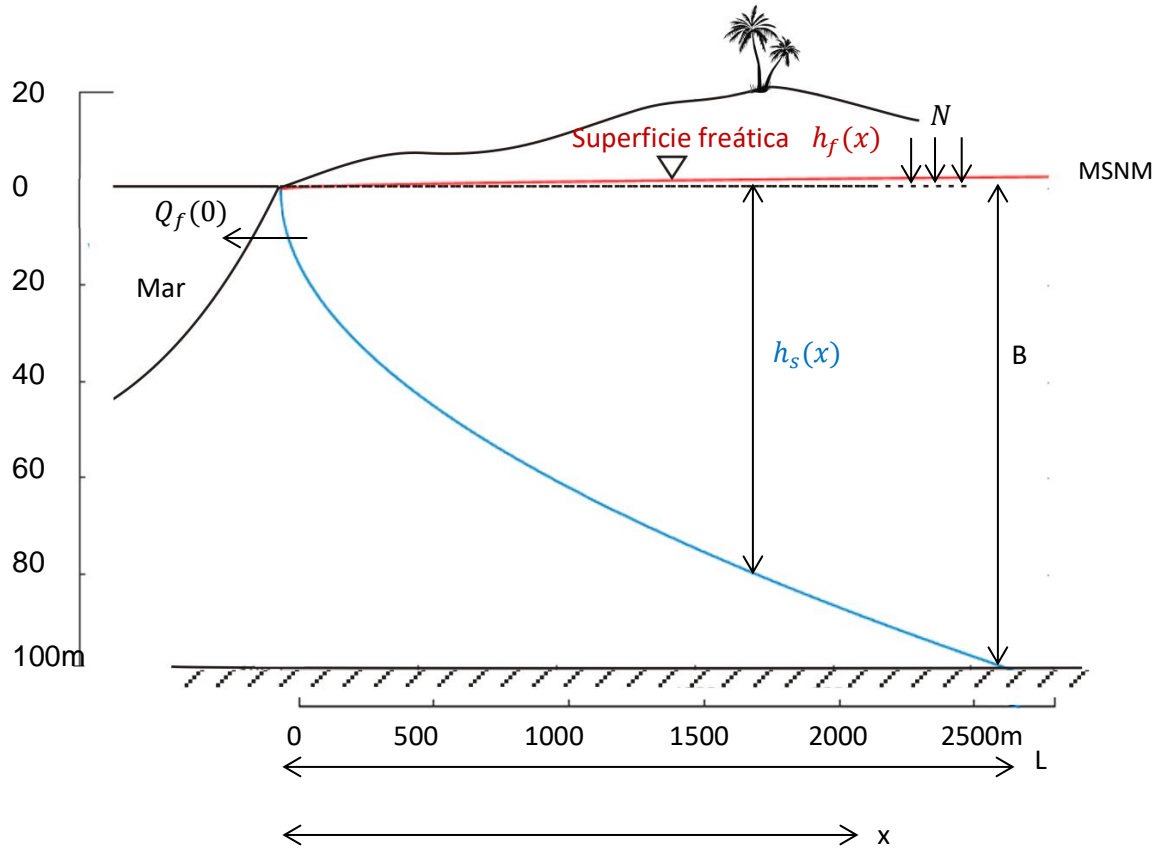
$$\delta = 40$$

$$B = 102m$$

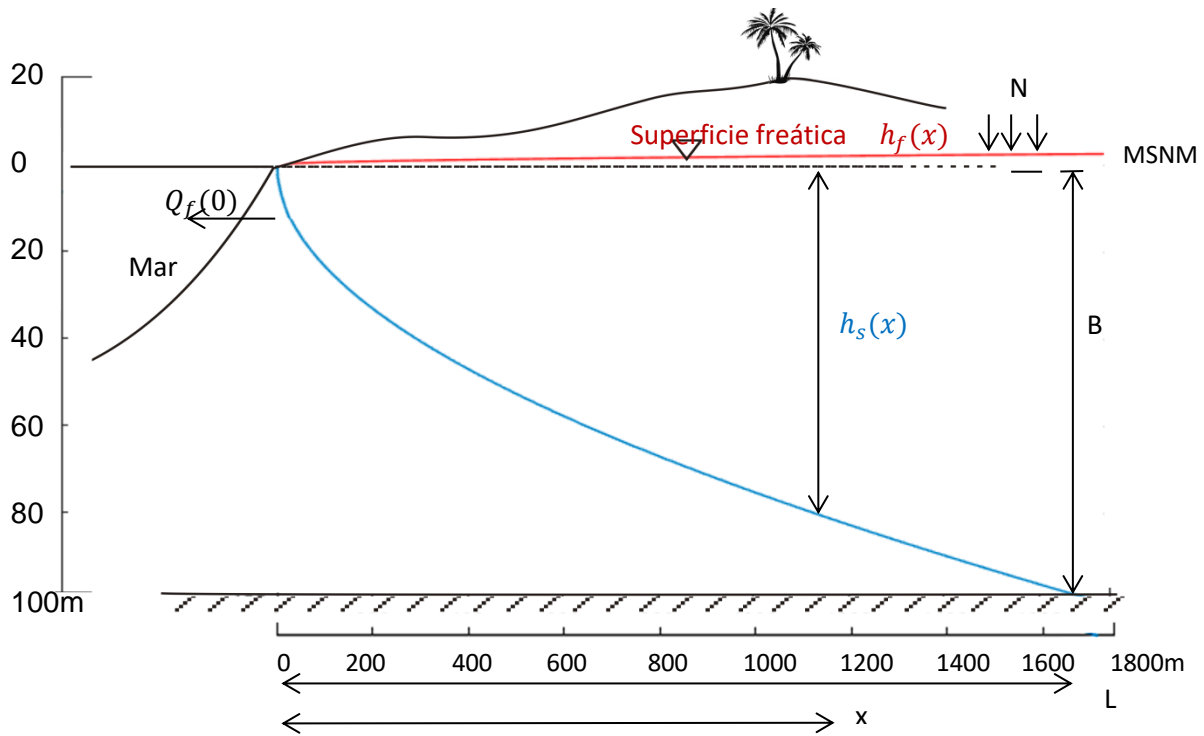
$$Qf(0) = 1,530.70 \text{ m}^2/año$$

$$N = \text{Dato (tabla 3)}m/año$$

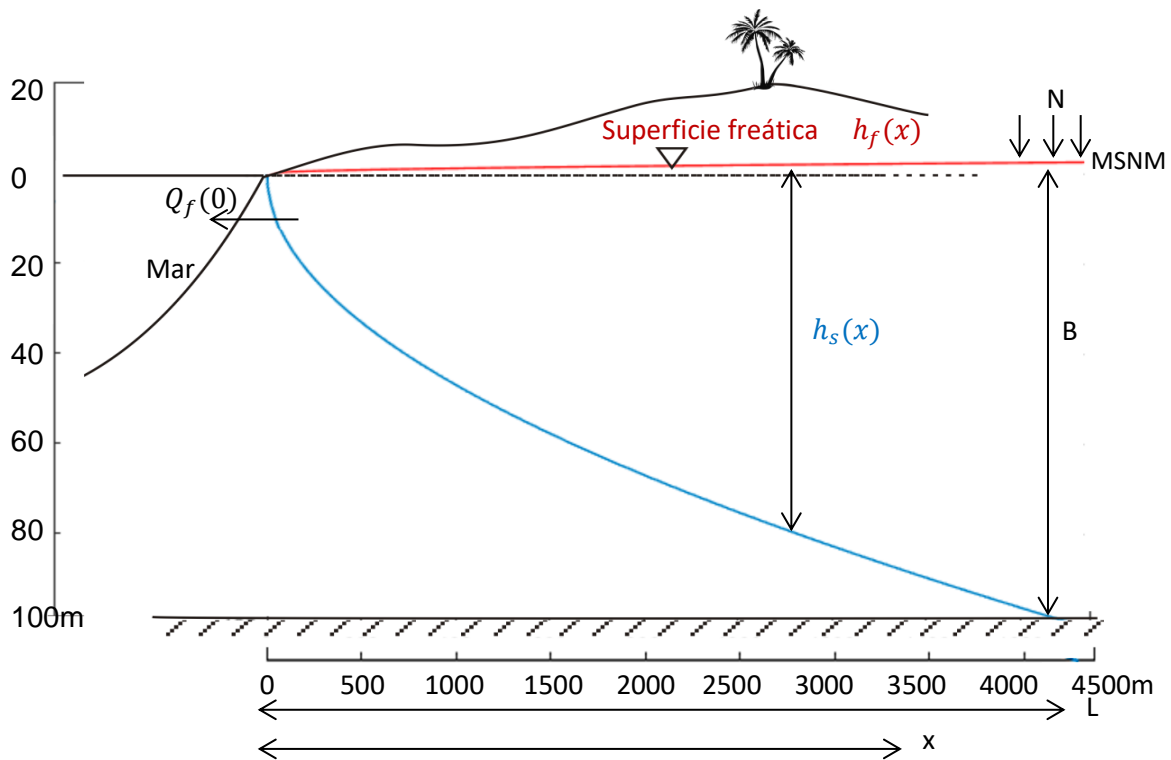
A continuación, se muestran los resultados obtenidos de acuerdo a lo descrito anteriormente.



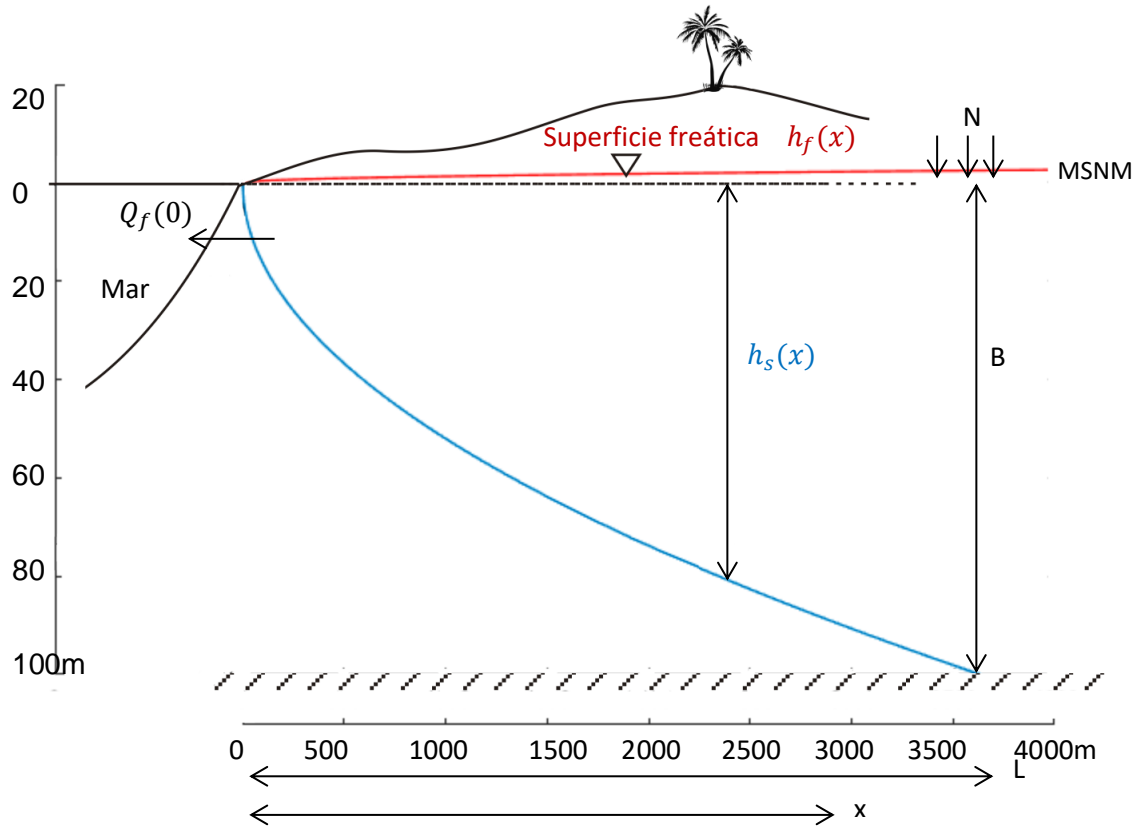
Gráfica 6. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N=0.2$ m/año



Gráfica 7. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N = 0.4 \text{ m/año}$



Gráfica 8. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N = 0.075 \text{ m/año}$



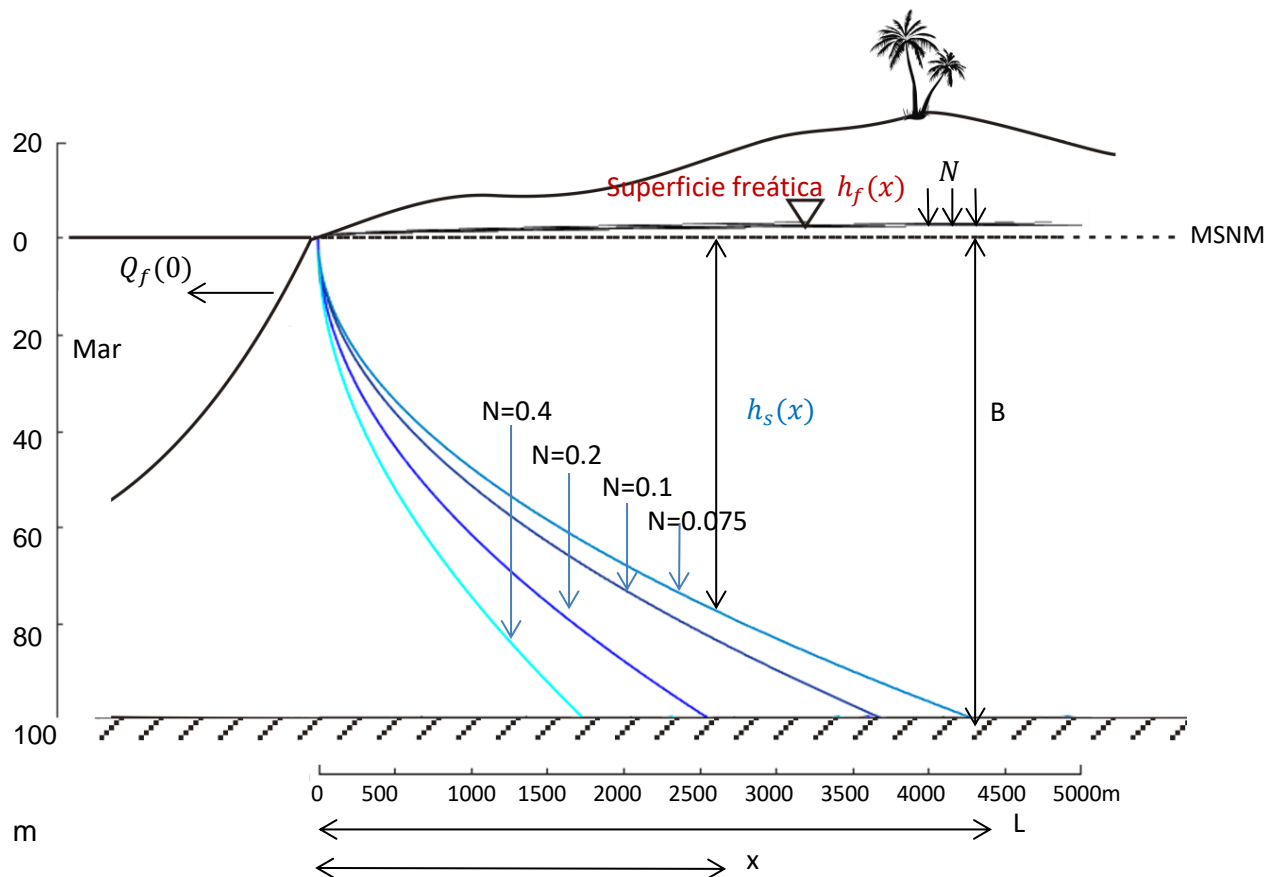
Gráfica 9. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial de $N=0.01$ m/año

Tabla 4. Valores de longitud de la intrusión salina a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial

N (m/año)	L (m)
0.2	2,545.2
0.4	1,665.1
0.075	4,230.9
0.1	3,626.2

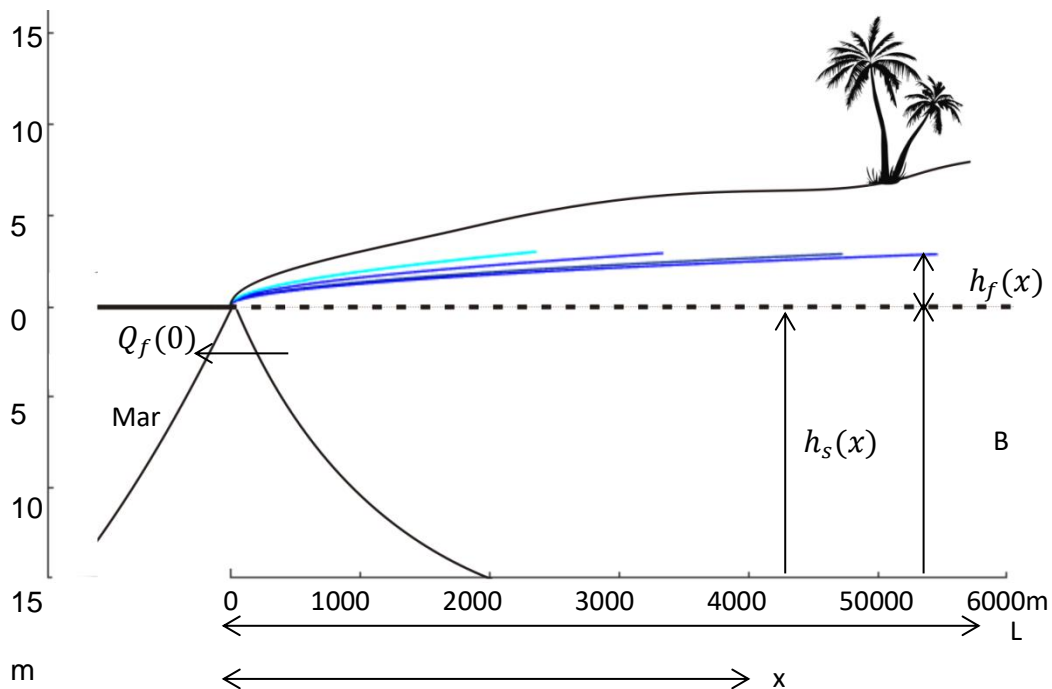
La tabla 4 representa los valores de longitud de la intrusión salina para cada valor de infiltración por precipitación pluvial evaluados, en los cuales se puede observar un aumento en la longitud de la intrusión salina con respecto a una disminución en el valor de N .

De la misma forma que para cuando $N = 0$ se evaluaron en una misma gráfica los valores previamente graficados para obtener resultados más analíticos del comportamiento de la intrusión salina, con el fin de poder visualizar el comportamiento de las parábolas, en este caso con presencia de infiltración por precipitación pluvial.



Gráfica 10. Posición de la interfase a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial

De la gráfica 10 la parábola que describe la superficie freática h_f se observa con una variación muy pequeña, por lo tanto para permitir visualizarlo con mayor facilidad, se realizó una gráfica para la superficie freática h_s evaluada con los diferentes valores de N previamente descritos en la gráfica 9.



Gráfica 11. Posición de la superficie freática a diferentes valores de infiltración por precipitación pluvial

De acuerdo a los resultados obtenidos como se muestra en la tabla 4, se relaciona un aumento en el valor de la longitud de la intrusión salina con una disminución del valor de la infiltración. Siendo este caso ($N \neq 0$) un caso que se asemeja más a la realidad, ya que se toma en cuenta condiciones que influyen en el comportamiento de la intrusión salina habitualmente en un medio costero.

El valor de la longitud de la intrusión salina depende de la variación en el valor de N , de la misma forma que los resultados discutidos en el punto 4.1, el valor de K, δ, B permanecen constantes, siendo N la variable que determina el comportamiento de la longitud de la intrusión.

En cuanto a la gráfica 11, la altura de la superficie freática desde el nivel medio del mar es de $2.85m$, y esta parábola se comporta de la misma manera que la parábola que describe a la interfase h_s es decir, que en un aumento del valor de N la longitud L disminuye. En los valores de la tabla 4, en una diferencia de $0.325m/año$ de infiltración existe una diferencia de $2565.8m$ de longitud.

De forma que para el caso en el que $N \neq 0$ se asocia la dependencia de las funciones envueltas en esta solución a la variación de N , que de igual forma como se observa en la ecuación (14), N depende del valor de $Q_f(x)$ y este varía a lo largo de x .

5. Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis de desarrollar una solución analítica de la delimitación del contacto de la interfase agua dulce - agua salada presente en acuíferos costeros, permitió analizar el comportamiento de la interfase en diferentes condiciones geohidrológicas.

El análisis de este trabajo permitió el estudio en condiciones estacionaras facilitando las ecuaciones desarrolladas para calcular la posición y forma de la interfase, permitiendo observar la dependencia de estas funciones a las variables presentes en el medio, caracterizando el comportamiento de las parábolas que describen la superficie freática h_f y la interfase h_s .

Uno de los factores más importantes para la determinación de la forma y posición de la interfase y de la superficie freática observados en los resultados es el flujo de agua dulce en dirección hacia el mar $Q_f(0)$.

Se limitó el análisis para dos condiciones geohidrológicas, para $N = 0$ y $N \neq 0$, para el caso en el que no hay presencia de recarga $N = 0$, el medio se simplifica, manteniendo el flujo del agua dulce $Q_f(0)$ constante a lo largo de x . Los resultados obtenidos en esta condición para la parábola que describe la interfase h_s arrojan que, en un aumento en el valor del flujo de agua dulce la longitud de la intrusión salina disminuye, conforme el valor del flujo aumenta la parábola de la interfase se acerca a la costa, es decir, la interfase se acerca a la vertical. De acuerdo a la relación obtenida para la longitud de la intrusión salina para el caso $N = 0$, ecuación (23) $\left(L = -K \frac{1+\delta}{2\delta^2} \frac{B^2}{Q_f(0)}\right)$ y los gráficos obtenidos para dicha condición geohidrológica (gráfica 4) se observó que la relación de la longitud de la

intrusión salina L es inversamente proporcional al valor del flujo de agua dulce desde la costa en dirección al mar $Q_f(0)$.

De la parábola que describe el nivel freático h_f se observa que su altura es muy pequeña, comprobando con esto la suposición de Dupuit, para el caso en el que no hay presencia de recarga las pendientes del nivel freático son muy pequeñas.

Para el caso en el que las condiciones geohidrológicas en las cuales se encuentra presencia de recarga $N \neq 0$, que en este medio ocurren únicamente en forma de infiltración por precipitación pluvial, infiltraciones que generan recuperaciones del nivel freático y alteraciones en la longitud de la intrusión salina, se observa que el valor del flujo de agua dulce depende del valor de la infiltración, como se muestra en la ecuación 14 $((x) - Nx - Q_f(0) = 0)$ N es directamente proporcional al valor de $Q_f(0)$, de la misma forma se puede observar la dependencia de la longitud de la intrusión salina al valor de la infiltración y por consiguiente al valor del flujo, de acuerdo a la ecuación 24 $(L = [K(1 + \delta)N^{-1}]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{B}{\delta}\right))$ y a los gráficos obtenidos (gráfica 10) se observó que L es inversamente proporcional al valor de N .

En condiciones en las cuales hay un mayor valor de infiltración, la longitud de la intrusión salina disminuye, con esto relacionándose también a un aumento en el valor del flujo debido a la presencia de infiltración.

Es decir que en las dos condiciones tanto con presencia de recarga y sin recarga, la longitud que puede alcanzar la intrusión salina en los acuíferos costeros depende del

valor del flujo de agua dulce, siendo uno de los factores más importantes para la determinación del comportamiento de la intrusión salina.

Para un valor de flujo de $Q_f(0) = 1530.70m^2/yr$ en el caso en el cual no hay presencia de recarga al acuífero, la longitud de la intrusión obtenida fue de $L = 731.0799m$ siendo el valor de flujo menor evaluado, y para un valor de flujo de $Q_f(0) = 9184.2m^2/yr$ se obtuvo una longitud de $L = 121.8466m$ obteniendo una diferencia de longitud de $609.2333m$.

Para el caso en el cual hay presencia de recarga por medio de infiltración por precipitación pluvial, para un valor de infiltración de $N = 0.075m/yr$ se obtuvo una longitud de la intrusión de $L = 4,320.9m$ siendo el valor menor de infiltración evaluado, y para un valor de infiltración de $N = 0.4m/yr$ se obtuvo una longitud de $L = 1,665.1m$ siendo una diferencia de $2,565.8m$, observando con esto, una mayor penetración del agua salada en el acuífero en comparación con la condición $N = 0$.

El análisis de acuíferos costeros en condiciones estacionarias, facilita el estudio del comportamiento de la intrusión, permitiendo conocer cómo se comporta la intrusión salina, pero esta suposición se aleja un poco de la realidad, debido que en condiciones reales se ven implicados otros factores como que el flujo del agua dulce en dirección a la costa no permanece constante, por lo cual, los resultados evaluados con presencia de infiltración describen con mayor precisión el comportamiento real de las parábolas en un medio habitual.

El cambio en el flujo de los dos fluidos a causa de diferentes condiciones geohidrológicas o por alteraciones humanas como lo son la extracción por medio de bombeo, genera un

cambio en el comportamiento de la intrusión salina, es por esto la importancia de conocer el comportamiento de la interfase de estos dos fluidos para evitar una contaminación como producto de una alteración en el equilibrio de fluidos.

6. Recomendaciones

El cálculo y análisis de la interfase de agua salada - agua dulce en un estado estacionario, puede ser válida utilizando la aproximación de Dupuit, la cual determina que el flujo es horizontal simplificando las condiciones del acuífero.

No todas estas condiciones son válidas en realidad, pero facilitan el estudio de la interfase para dar más información y ampliar conocimientos, ya que en algunos casos como de bombeo de extracción de agua, es necesario mantener un equilibrio entre el agua bombeada del acuífero y el agua de los océanos, conociendo el comportamiento de la intrusión se puede llevar un control del agua bombeada.

En un medio común se ven envuelto un gran número de factores los cuáles intervendrían en el resultado del comportamiento de la intrusión salina, por lo cual es recomendable realizar un análisis considerando el comportamiento de la interfase durante un periodo de tiempo Δt .

Henry (1959) hace mención que para conocer el movimiento de la interfase en un caso no estacionario se comienza por el cálculo del volumen del agua salada, y el flujo de agua dulce está dado por $Q_f(0) = Kh_0/\beta\delta$ en donde β es un coeficiente numérico igual a 0.741, y entonces el volumen del agua salada está dado por:

$$V_{sw} = \frac{n\beta(1 + \delta)}{6\delta h_0} (B^3 - 3h_0^2 B + 2h_0^3)$$

Considerando el movimiento de la interfase conforme al cambio del flujo de agua dulce, se expresa el flujo del agua salada hacia el acuífero en función del flujo del agua dulce hacia el mar.

$$Q_s(0) = \frac{dV_{sw}}{dt} = \frac{dV_{sw}}{dQ_f(0)} \frac{dQ_f(0)}{dt}$$

Suposiciones que darían una información más completa del comportamiento de la interfase.

Para realizar una valoración de la precisión de la solución analítica desarrollada, se recomienda realizar una evaluación con valores obtenidos por estudios geoelectricos los cuales permitan obtener una comparación de ambos resultados, permitiendo calcular el margen de error que la solución analítica desarrollada en este trabajo presentaría.

7. Bibliografía

Ahmed. S. (1993) Detection of saline intrusions in coastal and estuarine sediments.

University College of North Wales, Menai Bridge, Gwynedd.

Barra. L. Capítulo 2, hidráulica de pozos, Gestión operacional de aguas subterráneas,

Universidad de Chile.

Comisión Nacional del Agua (2009), Estadísticas del agua en México.

www.conagua.gob.mx

Curso internacional de hidrología subterránea, Explotación de acuíferos costeros pp1-

15. Fundación centro internacional de hidrología subterránea.

Custodio E. (1987). Groundwater problems in coastal areas. Imprimerie Bietlot Frères. Belgique

Custodio E.(2002). Aquifer overexploitation: What does it mean?. Hydrogeology Journal.

Madrid, Spain.

Custodio y Llamas (1976). Hidrología Subterránea, segunda edición. Omega.

Custodio y Llamas, Aguas subterráneas, pp 35-57. Revista Cidob d'Afers internacionals.

Fetter. C. W. (2001) Applied Hydrogeology, Prentice Hall, Fourth Edition.

Fitts R. (2002) Groundwater Science. Academic Press,

Foster S. y Hirata R. (1991) Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Lima, Perú.

González de Vallejo, L. (2002) Ingeniería Geológica. Madrid, España. Pearson Educación.

J.Bear et al (1985) Motion of the seawater interfase in a coastal aquifer by the method of successive steady states. Journal of Hydrology. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

Mantoglou A (2003) Pumping management of coastal aquifers using analytical models of salwater intrusión. www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com

Neri. I. (2007) Identificación de zonas vulnerables a intrusión salina en una zona costera de Veracruz. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Li Ling et all (2012) Tidal influence on seawater intrusión in unconfined coastal aquifers. www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com

Otálvaro M.V. (1999) La geología relacionada con la ocurrencia y movimiento de las aguas subterráneas. Hidráulica de aguas subterráneas. Universidad Nacional de Colombia. 2da Edición.

Pendás F. Acuíferos costeros e intrusión marina. Universidad de Oviedo.

Peralta y Sardi (2012). Los acuíferos de nuestro país: un Tesoro para las generaciones venideras. Recuperado de www.palermo.edu

Pilson. M. (2013) An indtroduction to the chemistry of the Sea, Second Edition

Rodríguez y Sánchez (s.f) Hidráulica de Pozos, recuperada de: <http://ocw.upm.es/>

- Rosado. C (2012) Caracterización hidrogeológica del acuífero costero laguna grande en Sinaloa, México. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Rosado. C. (2012) "Caracterización hidrogeológica del acuífero costero laguna grande en Sinaloa, México" Universidad Autónoma de México, México, Df.
- Samper. J. (2013) Hidrología de subsuelos, acuíferos costeros e intrusión marina.
- Stoeckl L. et all (2016) Reduction of saltwater intrusipn by modifying hydraulic conductivity. www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com
- Suárez L. (2010) Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México (Tesis de maestría). Universidad nacional autónoma de México, México.
- Uddameri, Hernandez y Singaraju (2013) A successive steady-state model for simulating freshwater discharges and saltwater wedge profiles at Baffin Bay, Texas. Springer – Verlag Berlin Heidelberg.
- Vallejo, L. (2002). Hidrogeología. Ingeniería Geológica, Pearson Educación
- Verruijt, Jousma y Thorborg, (1988) Modelación de la intrusión salina, revisión de Métodos, Granada, España.
- Zhou X. (2011) A method for estimating the fresh water-salt water interfase with hydraulic heads in a coastal aquifer and its application, Geoscience Frontiers, China university of Geosciences (Beijing)