

21
2^{ej.}



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INTRUSION SALINA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
RICARDO PADILLA MARTINEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA D.F.

NOVIEMBRE 1992

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	Pág.	
CAPITULO I	"INTRODUCCION"	2
CAPITULO II	"CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS ACUIFEROS COSTEROS"	15
II.1.-	INTRODUCCION	16
II.2.-	CONCEPTOS BASICOS Y DEFINICIONES	17
	2.1- Embalses Subterráneos	
	2.1.1.- Acuífero	
	2.1.2.- Acuícludo	
	2.1.3.- Acuíardo	
	2.1.4.- Acuífugo	
	2.2.- Tipos de Acuíferos	
	2.2.1.- Acuífero libre	
	2.2.2.- Acuífero confinado	
	2.2.3.- Acuífero semiconfinado	
	2.3.- Definiciones	
II.3.-	HIDROGEOQUIMICA	21
	3.1.- Química del agua del ciclo hidrológico	
	3.2.- Muestreo del agua subterránea	
	3.2.1- Métodos para la toma de muestras en pozos	
	3.2.2.- Frecuencia de muestreos y mediciones	
	3.3.- Clasificación del agua subterránea	
	3.3.1.- Principales sustancias disueltas en el agua	

II.4.-	ASPECTOS QUIMICOS DE LAS RELACIONES AGUA DULCE-AGUA SALADA	Pág. 27
	4.1.- Acción de los fenómenos modificadores en zonas costeras	
	4.2.- Indices Hidrogeoquímicos	
	4.3.- Otras Características del agua del mar	
CAPITULO III	"CONDICIONES ESTABLES"	34
III.1.-	INTRODUCCION	35
III.2.-	POSICION DE LA CUÑA DE AGUA SALADA	36
	2.1.- Fórmula de Ghyben-Herzberg	
	2.2.- Modificaciones de la ley de Ghyben-Herzberg. Corrección de Hubbert	
	2.3.- Forma diferencial de la ley de Ghyben-Herzberg	
	2.4.- Inclinación de la interfase	
III.3.-	APLICACION A ACUIFEROS A PRESION	44
	3.1.- Acuíferos cautivos	
CAPITULO IV	"CONDICIONES TRANSITORIAS"	49
IV.1.	INTRODUCCION	50
IV.2.-	PROFUNDIDAD DE LA INTERFASE CON AGUA DULCE Y AGUA SALADA EN MOVIMIENTO	51
	2.1.- Difusión y dispersión hidrodinámica en medios porosos	
	2.2.- Justificación de la existencia de una interfase dinámica	

	2.3.- Fórmula de Hubbert	Pág.
IV.3. -	ZONA DE DISPERSION Y FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA CON SALINIDAD VARIABLE	57
	3.1.- Potencial de agua puntual, potencial de agua dulce y potencial de agua ambiental o local	
	3.2.- Fórmula de Luszczynski y comparación con las de Hubbert y Ghyben-Herzberg	
	3.3.- Cálculo de la profundidad del agua salina	
	3.4.- Efectos de cambios en el nivel del agua	
IV.4. -	CALCULOS RELATIVOS A LAS RELACIONES AGUA DULCE AGUA SALADA EN ACUIFEROS COSTEROS	66
	4.1.- Cálculo aproximado de la profundidad de la interfase y del flujo de agua dulce al mar, en ausencia de la zona de mezcla.	
	4.1.1.- Acuífero libre recargado uniformemente por la lluvia	
	4.1.2.- Acuífero cautivo	
	4.1.3.- Cálculos más exactos de la posición de la interfase cuando no hay zona de mezcla. Fórmula de Glover	
	4.1.4.- Longitud de vertido al mar en un acuífero semiconfinado	
	4.1.5.- Relaciones agua dulce agua salada en islas oceánicas	
CAPITULO V	"CONTROL DE LA INTRUSION SALINA"	80
V.1. -	INTRODUCCION	81
V.2. -	PRINCIPIOS GENERALES SOBRE LA EXPLOTACION DE	

		Pág.
	ACUIFEROS COSTEROS	82
	2.1.- Reducción del flujo al mar	
	2.2.- Utilización de la "reserva de una vez"	
	2.3.- Captación en la costa del agua fluyente al mar	
V.3.-	EFFECTOS DE LA EXPLOTACION EN ACUIFEROS SEMICONFINADOS	85
V.4.-	FORMACION DE CONOS DE AGUA SALADA DEBAJO DE LAS CAPTACIONES	85
V.5.-	METODOS DE PREVENCION Y CONTROL DE LA INTRUSION SALINA	92
	5.1.- Disminución del bombeo	
	5.2.- Reubicación de los centros de bombeo	
	5.3.- Recarga artificial	
	5.4.- Establecimiento de barreras físicas	
	5.5.- Barrera hidráulica de inyección	
	5.6.- Depresión de bombeo	
V.6.-	ALTERNATIVAS DE GESTION DE ACUIFEROS COSTEROS	100
V.7.-	EFFECTOS DE OBRAS DE INGENIERIA EN LAS RELACIONES AGUA DULCE-AGUA SALADA EN REGIONES COSTERAS	102
	7.1.- Efecto de las extracciones sobre el espesor de la zona de mezcla	
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
	BIBLIOGRAFIA	108

PREFACIO

México se encuentra entre los países que disponen de gran longitud de costa y una buena parte de la población, agrícola e industrial, se sitúa a lo largo de la misma. Esto trae consigo la necesidad de extraer grandes volúmenes de agua subterránea; por tal razón, el estudio de la intrusión de agua de mar es de incuestionable interés para los abastecimientos de agua en islas y regiones costeras. Dado que este vital recurso es indispensable en cualquier región, es muy importante que los ingenieros relacionados con el subsuelo se enriquezcan del tema, para que lleguen a adquirir un criterio más amplio en cuanto a su explotación y aprovechamiento óptimo.

Este trabajo tiene como finalidad ser un medio de consulta para estudiantes y personal técnico interesados en el tema.

CAPITULO I

"INTRODUCCION"

INTRODUCCION

En este primer capítulo se pretende dar una idea general del problema que se analizará en el presente trabajo: la intrusión salina en los acuíferos costeros; que se define como el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando el agua dulce. Es conveniente aclarar que no existe relación entre la intrusión de agua de mar que es un problema propio de los acuíferos costeros y el problema de la intrusión de un domo salino en un yacimiento petrolero; son temas totalmente independientes. En el primero se está hablando de una masa de agua salada que desplaza al agua dulce en el acuífero por razones que posteriormente se mencionarán, y en el segundo caso se habla de una masa de cloruro de sodio y algunos otros sólidos que contaminan y además forman trampas estructurales en un yacimiento petrolero.

El problema de la intrusión salina se ha agudizado en los últimos años, entre otras causas por el desmedido crecimiento de la población y de la industria en ciertas regiones costeras, ya que éste crecimiento involucra mas necesidades de agua y si a esto se le agrega la mala planeación de la explotación de algunos acuíferos el problema aumenta.

Además del presente capítulo, la tesis consta de otros cuatro, cuyo contenido se resumirá a continuación.

CAPITULO II: CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS ACUIFEROS COSTEROS.

Dado el carácter bibliográfico de este trabajo, es importante mencionar cual es el medio físico donde se desarrolla la intrusión salina, así como los elementos que intervienen en ésta. Definiendo e ilustrando conceptos básicos (tipos de embalses subterráneos, tipos de acuíferos, etc.) y conceptos afines a la intrusión (agua salada, cuña salina, etc.) se pretende centrar en el tema a todos aquellos lectores interesados en el problema de la intrusión salina y que tengan poca relación con conceptos geohidrológicos.

El proceso de evaluación del avance de la cuña salina es complicado y costoso, ya que se requiere de toma de muestras de agua, análisis químicos de estas muestras, medición de niveles piezométricos, entre otras actividades, en diferentes puntos del acuífero. Por lo tanto, mientras mayor sea el número de estudios y el cuidado que en éstos se tenga, más aproximación se tendrá en la ubicación de la interfase, y de esta manera se podrá planear adecuadamente la explotación del acuífero.

CAPITULO III: CONDICIONES ESTABLES

Una vez que se tiene plenamente localizada la posición de la interfase, se debe crear un modelo matemático de ésta, con el cual se puede seguir su curso cuando el acuífero sea sometido a una explotación intensa. La creación del modelo matemático no es una tarea fácil, ya que intervienen muchos elementos que varían constantemente: por otro lado, el comportamiento hidráulico de cada acuífero es diferente, por lo que se deben crear tantos modelos

matemáticos como sea el número de acuíferos en estudio.

En este capítulo, se estudia el comportamiento de la interfase considerando condiciones estáticas; todo el análisis parte de tres hipótesis, las cuales se presentarán más adelante.

La Ley de Ghyben-Herzberg y la corrección que de ésta hace Hubbert son las dos teorías presentadas en el capítulo, donde se analizan sus alcances y limitaciones; teniendo en cuenta estos puntos, se puede deducir cuál es el alcance de estas teorías y cuál es el grado de confiabilidad de los resultados obtenidos mediante estos modelos matemáticos.

CAPITULO IV: CONDICIONES TRANSITORIAS

En este capítulo se analiza el comportamiento de la interfase mediante modelos matemáticos, en los cuales se manejan condiciones dinámicas; además se considera la existencia de una zona de mezcla en movimiento.

Partiendo del equilibrio dinámico de la interfase agua dulce-agua salada, Hubbert demostró la existencia de una discrepancia entre la profundidad real del agua salada y la que corresponde a los cálculos de Ghyben-Herzberg.

Se mencionan conceptos acerca del potencial de Lusczynski. Para el cálculo de la distribución de velocidades en la zona de dispersión y para determinar el frente de la misma, Lusczynski introduce los conceptos de nivel piezométrico puntual, nivel piezométrico del agua dulce y nivel piezométrico ambiental.

Además, se analizan algunos casos particulares de cálculos aproximados de la interfase y del flujo de agua dulce al mar, en ausencia de la zona de mezcla. Uno de estos casos analizados, es lo

que sucede con el lentejón de agua dulce en una isla oceánica.

CAPITULO V: CONTROL DE LA INTRUSION SALINA

En este último capítulo se aborda el tema de cómo controlar la intrusión salina; se presentan seis métodos para tal fin. De estos métodos se menciona cual es su principio de operación, así como las ventajas y desventajas que se tienen en su aplicación.

Además, se comentan otros puntos de gran trascendencia en el problema de la intrusión salina, tales como: Reducción de flujo de agua dulce al mar, formación de conos de agua salada debajo de las captaciones y efectos de las obras de ingeniería en las regiones costeras.

PANORAMA GENERAL DE LAS REGIONES COSTERAS EN MEXICO

La importancia del agua subterránea en las costas es incuestionable, pues el subsuelo constituye un depósito natural de agua, mejor y mucho más grande que el logrado por las obras de ingeniería hechas para el almacenamiento del agua en la superficie. Hoy en día, el agua subterránea constituye un elemento de gran trascendencia para el desarrollo económico, político y social no sólo de las regiones costeras, en general de cualquier región del mundo; por tal motivo es de imperiosa necesidad el estudio y la investigación de esta parte de la hidrología para hacer de ella una explotación racional y provechosa.

A continuación se hará una breve descripción de las características geológicas, climatológicas y económicas de todos aquellos Estados de la República Mexicana que colindan con aguas de mar; por tal razón, parte de sus acuíferos se ven afectados por el problema de la intrusión salina.

BAJA CALIFORNIA NORTE

Su clima es desértico, seco y caluroso. Sus actividades económicas se basan en la agricultura y la pesca. Su precipitación anual varía de 100 a 200 mm. Los acuíferos existentes se encuentran sobre sedimentos terciarios marinos y fluviales; su potencial acuífero es bajo debido a la escasa precipitación y a la poca extensión y capacidad de almacenamiento de las formaciones acuíferas.

Los acuíferos de esta región presentan los niveles dinámicos de los pozos bajo el nivel del mar, lo que provoca la intrusión salina que amenaza el desarrollo de esta región.

BAJA CALIFORNIA SUR

Su clima es desértico, seco y caluroso y un poco variable. Su economía se basa en la agricultura y en la pesca. Su precipitación anual varía de 100 a 300 mm. Es la entidad del país con el menor potencial hidráulico, ya que está ubicada en la porción más árida; sus recursos superficiales son casi nulos y los subterráneos son escasos, debido a su lenta renovación y a las reducidas dimensiones en el almacenamiento de sus acuíferos. Estos se presentan sobre sedimentos terciarios marinos y continentales.

SONORA

Su clima es desértico y seco. Su economía se basa en la agricultura y la ganadería. Su precipitación anual es de 100 a 300 mm. La extensión del agua subterránea se efectúa sobre aluviones recientes y sedimentos terciarios continentales.

SINALOA

Su clima es estepario de altura,extremoso y tropical. La agricultura es la base de la economía. Su precipitación anual es de 100 mm. Su gran densidad hidrográfica y las grandes extensiones irrigadas por medio de presas favorecen la perforación de pozos a lo largo de los márgenes de los ríos, aprovechando la permeabilidad de los acarros y sus recargas.

NAYARIT

Su clima es tropical húmedo y frío en las montañas. Su economía se basa en la agricultura y la pesca. Su precipitación anual es de 1000 a 1500 mm. En el interior del estado se explotan acuíferos de buena producción en aluviones recientes y basalto.

TAMAULIPAS

Su clima es caluroso, la precipitación anual es de 500 a 1000 mm. Su economía se basa en la ganadería, pesca y minería. Hay escasas explotaciones subterráneas localizadas en un área muy reducida de los márgenes del río Bravo, entre Reynosa y Matamoros. Además de ser escasos los aprovechamientos subterráneos; tienen muy bajos gastos, por lo que no se utilizan en la agricultura, sino para usos domésticos.

La zona sur está constituida casi en su totalidad por depósitos calcáreos del cretácico superior, que ofrecen las áreas con mayor posibilidad de explotación. La presencia de manantiales con caudal abundante constituye una evidencia del acuífero de buen potencial.

VERACRUZ

Su clima es caluroso, la precipitación anual varía de 1000 a 2000 mm. La base principal de su economía es la agricultura, la

ganadería, la pesca y la industria petrolera. Gran parte del Estado está ocupado por la planicie costera del Golfo de México, constituida por formaciones del terciario marino con arcillas y arenas. La zona con mejores posibilidades de explotación acuifera está comprendida entre los ríos Actopan y Papaloapan y al sur en las partes bajas de las cuencas de los ríos Coatzacoalcos, Uspanapa y Tonalá.

La gran cuenca oriental, parcialmente enclavada, dispone de recursos abundantes, contemplándose la posibilidad de explotarlos para abastecer a la Ciudad de México. Los puertos de Veracruz y Coatzacoalcos presentan intrusión salina.

JALISCO

Su clima varía de tropical y subtropical a frío, según la región. La agricultura y la ganadería son las principales actividades económicas. Los acuíferos se encuentran en piroclásticos basaltos y sedimentos terciarios.

En la costa no se tienen condiciones favorables para la explotación del agua subterránea, ya que en su mayoría son acantilados formados por rocas ígneas impermeables.

COLIMA

Su clima es tropical, la precipitación anual es de 1000 mm. Su economía se basa en la agricultura y la ganadería. La principal producción de agua subterránea se obtiene a lo largo de la costa, donde los ríos Armería, Salado, Coahuayana, Cihuatlán y otros de menor caudal, han acumulado sedimentos permeables que reciben buenas recargas debido a la precipitación abundante y a sus propios escurrimientos.

En la región hidrológica Armeria - Coahuayana se localiza el Valle de Colima, que presenta acuíferos libres y confinados principalmente. También en esta región se encuentra el Valle de Tecomán, ubicado en la planicie costera y que presenta el riesgo de una intrusión salina.

MICHOACAN

Su clima es tropical y subtropical de altura. Su precipitación anual varía de 1000 a 1500 mm. Su economía se basa en la agricultura, ganadería y avicultura. Las mejores condiciones geohidrológicas se encuentran al Norte del Estado. Al sur parecen existir posibilidades acuíferas en calizas. El resto del Estado tiene condiciones desfavorables debido a la existencia de materiales con baja permeabilidad y a la altura, con lo que el nivel del agua se encuentra muy profundo.

GUERRERO

Su clima es tropical y subtropical de altura. Su precipitación anual es de 1000 a 1500 mm. Su economía se basa en la agricultura y el turismo.

Las condiciones geohidrológicas son desfavorables, debido a la fisiografía montañosa y al predominio de rocas impermeables. La zona que tiene mejores condiciones es la de la Costa Chica, además de que cuenta con abundantes aguas superficiales.

Generalmente los acuíferos son de pequeños espesores; no obstante esto, satisfacen gran parte de las demandas para usos municipales y domésticos. Sus principales áreas son: Chilpancingo en calizas, Cuajinicuilapa, Acapulco e Iztapa Zihuatanejo en aluviones.

OAXACA

Su clima en la costa es caluroso, la precipitación anual es de 500 a 1000 mm. La base de su economía es la agricultura, la ganadería y la minería. Cerca de los límites con el Estado de Veracruz, se presentan afloramientos importantes de calizas cretácicas que tienen buen potencial acuífero. En una gran extensión de la Mixteca, las calizas están cubiertas por sedimentos terciarios arcillosos.

CHIAPAS

Su clima es tropical húmedo con lluvias todo el año. La precipitación anual es de 1000 a más de 2000 mm. Su economía se basa en la agricultura y la ganadería, aunque no en gran escala.

En esta entidad se tiene una zona de libre alumbramiento de agua subterránea, correspondiente a la superficie que se encuentra fuera de la Cuenca del Río Grijalva, que cubre aproximadamente el 50% de la superficie del Estado. Sus regiones geohidrológicas más importantes son: Amago-Tonalá, Comitán-Montebello, Soconusco y Zona Costera.

TABASCO

Su clima es caluroso (tropical húmedo con lluvias todo el año). Su precipitación anual es de más de 2000 mm. Su economía se basa en la agricultura, ganadería, pesca y la industria petrolera.

Las condiciones geohidrológicas son en general favorables para la explotación del agua del subsuelo, siendo su principal fin el abastecimiento para el consumo doméstico de centros de población, ya que para usos agrícolas es preferible el uso de aguas superficiales

controladas.

CAMPECHE

Su clima es caluroso, la precipitación media anual es de 1000 a 2000 mm. Su economía se basa en la agricultura, la pesca y la industria petrolera. Esta región se encuentra en condiciones geohidrológicas de subexplotación, por lo que carece de estudios actualizados. Se perforan pozos para el abastecimiento de agua potable de pequeñas localidades.

QUINTANA ROO

Su clima es tropical de monzón con lluvias en verano producidas por los vientos monzones. Su precipitación anual es de 1000 a 2000 mm. Su economía se basa en la explotación de maderas finas y de chicle, así como en la agricultura y la pesca.

Los acuíferos generalmente se localizan a profundidades muy someras, entre seis y treinta metros.

YUCATAN

Su clima es tropical húmedo con lluvias en verano. La precipitación anual varía de 1000 a 2000 mm. Su economía se basa en la agricultura, la industria maderera, la pesca y el turismo.

El tipo de roca y el sistema hidrológico ha dado lugar a una topografía Karstica caracterizada por la presencia de sumideros conocidos en el área como cenotes, llenos de agua en torno a los cuales se han asentado los pueblos, siendo frecuentes los estanques y las grutas.

Este resumen tiene por objetivo visualizar aquellas regiones costeras en las cuales el problema de la intrusión se ha acrecentado

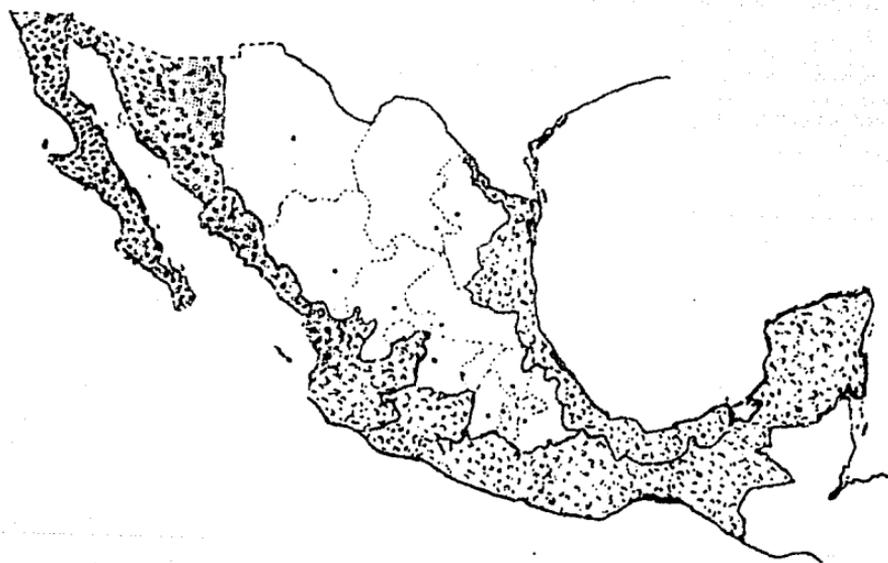


Figura 1

Regiones costeras de la República Mexicana

y por tal motivo deben de ser objeto de mas estudios antes de que los acuíferos sean invadidos totalmente por el agua de mar.

C A P I T U L O I I

"CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS ACUIFEROS COSTEROS"

11.1. INTRODUCCION

Antes de entrar de lleno al estudio y análisis del comportamiento hidráulico que adquieren los acuíferos costeros, una vez que han sido intrusados por el agua del mar; es de vital importancia definir conceptos básicos y conceptos afines a la intrusión salina, tales como: acuífero, tipos de acuíferos, agua salada, cuña de agua salada, intrusión salina, etc; de los cuales se hará una exposición amplia y clara en el presente capítulo. De este modo, se tendrá una idea clara de lo que es una intrusión marina.

El estudio de la composición química del agua dulce y del agua del mar es otro factor muy importante que se toma en cuenta en este capítulo, así como la composición química del agua, mezcla de ambas. El muestreo del agua subterránea tiene como fin estudiar las características, así como sus variaciones temporales en composición de dicha agua en la zona muestreada; esto se logra aplicando las diferentes técnicas de muestreo que se tienen.

Una manera de deducir que ya se tiene intrusión marina, es mediante la utilización de los índices hidrogeoquímicos, los cuales, como su nombre lo indica, son índices que señalan las relaciones entre los iones disueltos en un agua, los cuales de alguna manera indican entre otras cosas, de que terreno procede el agua, la acción de fenómenos modificadores, o muestran una característica específica del agua considerada. Estos índices o relaciones ya tienen un valor determinado en iones disueltos tanto para el agua dulce como para el agua del mar, entonces cuando se tienen variaciones en estos valores, quiere decir que hay una alteración en su composición química, de lo cual se deduce que hay una posible intrusión del agua del mar en la zona.

II.2. CONCEPTOS BASICOS Y DEFINICIONES

2.1.- Embalses Subterráneos.

En el subsuelo se tienen diferentes tipos de embalses subterráneos los cuales se clasifican y definen de acuerdo a su capacidad de almacenar y permitir la circulación del agua a través de ellos. Por desgracia, no todos estos embalses de agua son de interés para el hombre, algunos por su poca capacidad para almacenar agua y otros por su casi nula facilidad de permitir el paso de agua a través de ellos; es por esto que no resultaría económico construir obras de captación en estas formaciones geológicas. A continuación se da una definición de estos diferentes tipos de embalses subterráneos.

2.1.1.- Acuífero

Etimológicamente la palabra acuífero proviene del latín (Aqua = agua y fero = llevar). En Geohidrología se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para satisfacer sus necesidades. Se tienen esencialmente tres tipos de acuíferos: libre, confinado y semiconfinado.

2.1.2.- Acuicludo

(Del latín claudere = encerrar o cerrar). Se define como aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación.

2.1.3.- Acuitardo

Del latín (tardaré = retardar) son aquellas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos.

2.1.4.- Acuífugo

Se denomina acuífugo (del latín fugere = huir) a aquellas formaciones geológicas que no tienen agua ni la pueden transmitir.

2.2.- Tipos de Acuíferos

A continuación se da una clasificación de los diferentes tipos de acuíferos existentes, los cuales se agrupan de acuerdo con la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos, que se traduce en consecuencias prácticas de gran trascendencia.

2.2.1.- Acuífero Libre

También llamado no confinado o freático. Es aquél en el cual existe una superficie libre del agua encerrada en él, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto, a presión atmosférica. Al perforar pozos que lo atraviesen total o parcialmente, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo, forma una superficie real conocida como saturación del acuífero por estar sujeto a la presión atmosférica.

2.2.2.- Acuífero Confinado

También llamado cautivo o a presión. Son acuíferos limitados inferiormente y superiormente por formaciones impermeables. El agua de los acuíferos confinados está sometida a una cierta presión

superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros de la formación geológica que la contiene, saturándola totalmente. Por eso, durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición. Así pues, estos acuíferos poseen una superficie piezométrica ideal, que puede materializarse considerando todos los niveles que alcanzaría el agua en las perforaciones distribuidas por el acuífero.

2.2.3.- Acuífero Semiconfinado

Es un caso particular de un acuífero confinado en el que las formaciones inferior y/o superior que lo encierran no son totalmente impermeables, y por lo tanto pueden recibir una recarga o descarga a través de ellas. En la Figura 2 se ilustran los tres tipos de acuíferos mencionados.

2.3.- Definiciones

Se denominará agua salada o masa de agua salada al agua con un contenido en cloruros igual o muy próxima al del mar, por ejemplo de 19 000 ppm.

Se llamará cuña de agua salada o cuña salina a una masa de agua salada de gran longitud con una sección en forma de cuña apoyada en la base del acuífero y con el vértice o pie hacia tierra adentro (Figura 3).

Se llamará cono de agua salada o domo de agua salada a toda protuberancia vertical de la masa de agua salada; se produce como consecuencia de bombeos o drenajes locales en una zona en la que hay agua dulce sobre agua salada (Figura 4).

Se llama intrusión de agua salada o marina al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando el

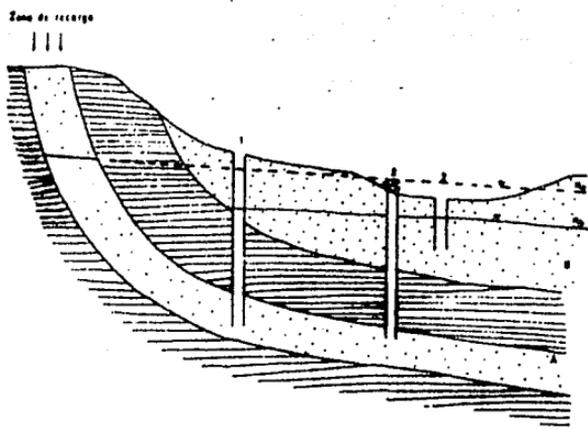


Figura 2.

- a) Acuífero cautivo, confinado o a presión
- b) Acuífero libre, no confinado o freático
- Na) Nivel piezométrico del acuífero cautivo
- Nb) Nivel piezométrico del acuífero libre
- 1) Pozo en un acuífero cautivo no surgente
- 2) Pozo en un acuífero cautivo surgente
- 3) Pozo en un acuífero libre

agua dulce.

El límite entre dos fluidos inmiscibles, tales como agua y petróleo está claramente definido y es brusco, formando una interfase, la cual se define como plano que divide los dos fluidos inmiscibles. Esto es cierto sólo en un recipiente cerrado.

Generalmente, en una formación, que contiene dos fluidos inmiscibles en contacto, la interfaz tiene una orientación y profundidad que guarda relación con la velocidad y dirección del movimiento, con el potencial hidráulico y con la densidad de cada uno de los fluidos.

Si esos dos líquidos son miscibles, tales como agua dulce y agua salada, no existe una interfaz brusca sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla. Esta zona de mezcla, también llamada zona de transición o difusión, refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de los líquidos originales y su anchura depende de la difusividad y dispersividad del medio y de las características del movimiento.

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

II.3. HIDROGEOQUIMICA

3.1.- Química del agua del ciclo hidrológico

Como se sabe, el ciclo hidrológico es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano vuelve a éste después de pasar por las etapas de precipitación y escurrimiento superficial o subterráneo. A lo largo del ciclo hay múltiples ciclos menores.

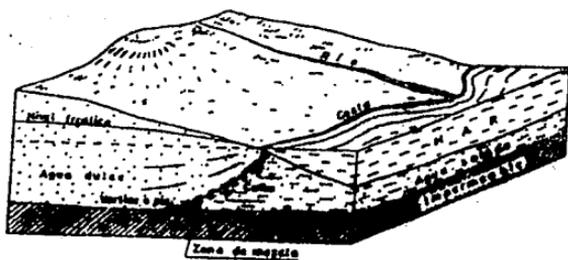


Figura 3.
Cuña de agua salada en un acuífero costero

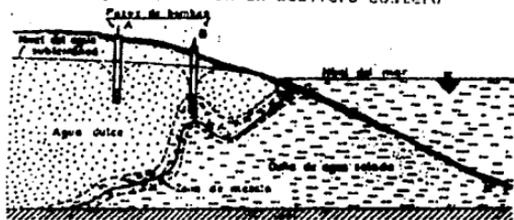


Figura 4
Formación de conos de agua salada debajo de captaciones
El pozo A no se contamina, pero sí el B.

Dentro del ciclo hidrológico se encuentra el agua de lluvia, vehículo primario de gran importancia en el aporte de sales solubles y en comunicar agresividad al agua de filtración. La composición del agua de lluvia es muy variable, dominando el Cl^- , Na^+ y K^+ cerca de la costa. Hacia el interior de los continentes parece dominar el anión SO_4^- y en menor proporción el ion Ca^{++} . En tanto que en el agua de mar su composición varía, siendo algo más concentrada en lugares cálidos con pobre renovación y menor en lugares semicerrados con abundantes aportaciones continentales. Los componentes principales del agua de mar son: CO_3H^- , SO_4^{--} , Cl^- , NO_3^- , Br^- , como aniones; y como cationes: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , y Sr^{++} .

3.2.- Muestreo del agua subterránea.

La toma de muestras del agua subterránea tiene por objeto el estudio de un acuífero o zona, el control de las variaciones temporales de su composición, o bien definir ciertas características locales con vistas a su uso o algún estudio particular.

3.2.1.- Métodos para la toma de muestras en pozos.

La toma de muestras en pozos con bomba instalada puede hacerse a través de ésta cómodamente. Es preciso esperar el tiempo suficiente para que el agua del pozo en las conducciones haya sido extraída. El agua bombeada procedente del acuífero es en general la mejor muestra obtenible, si la composición del acuífero es uniforme; si existe estratificación de aguas, se obtiene una mezcla.

Cuando no existe bomba, ni es posible bombear con aire comprimido, o bien cuando interesa tomar muestras a diferentes profundidades, deben utilizarse en general botellas lastradas que pueden llenarse a la profundidad deseada.

El volúmen preciso de agua para un análisis de los iones y características fundamentales varía entre uno y dos litros, aunque con técnicas de microanálisis basta con sólo 50 cm³. Con respecto a los envases para su transporte y almacenamiento, es conveniente utilizar botellas de plástico lo más esterilizadas posible y nuevas, para evitar que puedan ceder algunos iones. Para evitar los escapes de gases, en especial el CO₂ con la consiguiente disminución de alcalinidad y dureza, deben cerrarse bien y estar totalmente llenas. En una botella mal cerrada o a medio llenar, se pueden tener alteraciones importantes en el pH, CO₂, contenido de gases, alcalinidad, dureza y calcio, y si se disuelve aire, en el contenido de hierro y magnesio.

3.2.2.- Frecuencia de muestreos y mediciones

En estudios en acuíferos costeros conviene tomar muestras, efectuar registros de salinidad y medir niveles con frecuencia, aunque es difícil fijar a priori esa frecuencia, deberá ser, en principio, más elevada en acuíferos sometidos a una explotación intensa y fuertes variaciones piezométricas. Al fijar un programa de toma de muestras o de registros, es preciso tener en cuenta que entre operación y operación es preciso dejar transcurrir el tiempo necesario para que se reconstituya la estratificación salina, o se renueve el agua alterada, dependiendo de la forma de realizar el trabajo.

Como normas muy generales y variables, puede decirse que los niveles deben medirse en piezómetros de 1 a 4 veces al mes y en lugares con variaciones importantes y rápidas, conviene instalar algunos limnigrafos; en los pozos de explotación la medida debe ser diaria o cuando menos uno a la semana. En los piezómetros, la toma

de muestras y registros debe realizarse de 1 a 6 veces al año y en los pozos debe analizarse el agua extraída, aunque sólo para determinar cloruros, por lo menos semanalmente, con uno o dos análisis completos anuales.

Las medidas de niveles en los piezómetros y pozos de observación son de gran importancia para establecer variaciones de potencial y determinar el flujo de agua en el sistema. Estos niveles deben medirse con precisión, del orden del cm o menos, ya que las cotas sobre el nivel del mar son en general pequeñas. Todos los puntos de observación deben estar cuidadosamente nivelados. Unas veces la cota cero del país corresponde al nivel medio del mar en una cierta localidad, no teniendo porque coincidir con la misma en otros lugares costeros.

3.3.- Clasificación del agua subterránea.

Las diferentes clases de agua subterránea se clasifican a fin de informar de forma breve de su composición química o de algunos aspectos de la misma. Para una clasificación rápida y que no se preste a confusiones, se recomienda utilizar el diagrama triangular de Piper; el más empleado es el diagrama separado para representar los aniones y los cationes colocados de diferentes formas y con un campo romboidal central donde se presenta un tercer punto deducido de los que presentan los aniones y los cationes.

En estas gráficas se pueden presentar muchos análisis sin dar origen a confusiones.

Una clasificación amplia queda representada en el siguiente diagrama de Piper (ver Figura 5).

De una clasificación simple sólo se obtiene una información global y en general se establecen con vistas a su uso doméstico.

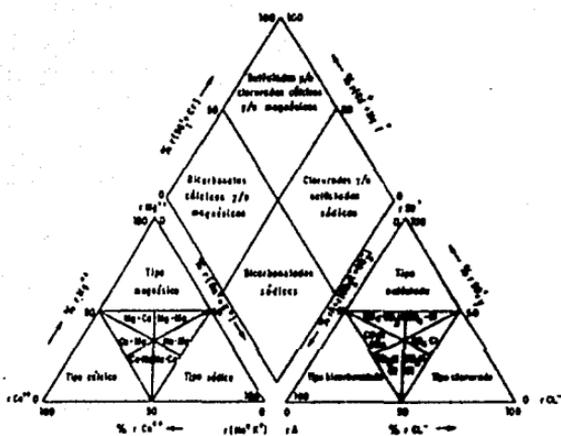


Figura 5

Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper.

urbano, industrial o agrícola, por lo que se tiene:

- a) Por residuo seco
 - Agua dulce (0-2000 ppm)
 - agua salobre (<2000 - 5000 ppm)
 - agua salada (<5000 - 40 000 ppm)
 - salmuera (hasta saturación)
- b) Por la dureza
 - blanda (0 -50 ppm en CaCO_3)
 - algo dura (<50 - 100 ppm en CaCO_3)
 - dura (<100 - 200 ppm en CaCO_3)
 - muy dura (hasta la saturación)
- c) Por propiedades destacadas
 - Selenitosa, si tiene más de 500 ppm en SO_4
 - Ferruginosa, si tiene hierro en cantidad tal que produce un precipitado en óxido de hierro al tener contacto con el aire.
 - Carbónica, si desprende burbujas de CO_2 a la temperatura y presión ambientales.
 - Lítica, si contiene cantidades notables de ese elemento.

3.3.1.- Principales sustancias disueltas en el agua.

- a) Aniones: ion cloruro, ion sulfato, ion bicarbonato y carbonato, ion nitrato y sílice.
- b) Cationes: sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro.
- c) Gases disueltos: anhídrico carbónico y oxígeno disuelto.

II.4. ASPECTOS QUIMICOS DE LAS RELACIONES AGUA DULCE-AGUA SALADA

El mejor indicador de la contaminación marina es el ion Cl^- , que no es alterado por la circulación por el terreno. No obstante, es preciso asegurar que no procede del terreno o de fugas de acuíferos con aguas salinas antiguas.

Al tener el agua marina, el agua dulce y el agua mezcla de ambas, se tienen propiedades muy diferentes en cuanto a composición química, salinidad, fuerza iónica e incluso pH, si hay

desplazamiento de las mismas dentro del acuífero se producen cambios físicos y químicos en las zonas afectadas. Esos cambios pueden consistir en variaciones de la permeabilidad por floculación, defloculación o cambio de características de las arcillas u otros materiales, en general aumenta algo la permeabilidad del terreno afectada por el agua salada y también alterando la capacidad de disolución del agua. Otras modificaciones afectan la composición química del agua por reacciones en el terreno, pues además de existir la posibilidad de precipitaciones o disoluciones pueden producirse cambios iónicos, más frecuentemente catiónicos.

Dado que existe agua en poros relativamente aislados de la circulación general, el desplazamiento de un agua por otra no es totalmente efectivo, aún considerando los fenómenos de dispersión.

Así, si el agua salada que ocupaba un terreno es desplazada por agua dulce, se incrementa el contenido de cloruros en ésta, como consecuencia del lavado por difusión de esos poros semicerrados. El fenómeno puede ser casi inexistente en arenas o gravas limpias o puede ser muy importante si se trata de materiales arcillosos. Debido a estos fenómenos y a los grandes volúmenes involucrados, en general es difícil recuperar un acuífero que ha sido profundamente intrusado por agua marina.

4.1.- Acción de los fenómenos modificadores en zonas costeras

En acuíferos costeros no se produce mezcla notable entre el agua dulce del acuífero y el agua marina; sólo se tiene una zona de transición, llamada interfase, cuyo ancho es variable según las fluctuaciones del nivel del acuífero, la oscilación de la marea, la fluctuación de tormentas, la dispersividad del acuífero, etc.

Si el agua dulce circula por sedimentos inicialmente en contacto con agua marina, los minerales arcillosos tienen una composición iónica en equilibrio con la correspondiente al agua del mar y además pueden retener atrapadas ciertas cantidades de la misma. El agua dulce incrementa notablemente su contenido en cloruros y en sodio por lavado del material y como las aguas dulces tienen $r(\text{Na}+\text{K})/r(\text{Ca}+\text{Mg})$ generalmente menor que las aguas marinas, tomarán alcalinos y cederán alcalinotérreos, o sea que se ablandarán y su índice de cambio de bases disminuirá respecto al valor inicial. Si era inicialmente positivo disminuirá e incluso se hará negativo. Si era inicialmente negativo se hará más negativo. El agua no responderá a una mezcla de agua dulce y agua marina si no que tendrá menor contenido en Ca^{++} y Mg^{++} que el que se deduciría del cálculo teórico.

Si se produce una intrusión de agua salada en un acuífero que anteriormente contenía agua dulce, el agua marina encuentra sedimentos en equilibrio con un agua de relación $r(\text{Na}+\text{K})/r(\text{Mg}+\text{Ca})$ en general menor; el agua marina cede iones alcalinos al terreno contra iones alcalinotérreos para tender a acercarse a la relación del agua dulce. El agua salada aumentará su dureza y el índice de cambio de bases, que inicialmente valía alrededor de 0.12, se hará más positivo.

En ocasiones, ciertas aguas continentales relacionadas con granitos pueden tener $r(\text{Na}+\text{K})/r(\text{Mg}+\text{Ca})$ mayor que el agua del mar y entonces se produce un ablandamiento y disminución del icb del agua de intrusión.

Lo que más delata el comienzo o el establecimiento de un estado de intrusión marina es una rápida elevación del contenido en ion cloruro.

Sería interesante disponer de índices que permitiesen identificar el agua marina pero es difícil, puesto que hay aguas saladas y salmueras que no tienen relación con el agua marina actual y pueden ser parecidas en su composición química.

El agua de mar tiene como característica importante su bajo contenido en ion bicarbonato. La relación rCl/rCO_3H se emplea como un índice, cuya rápida elevación puede traducirse como signo de intrusión marina, ya que en aguas muy cloruradas por polución humana o por riegos insistentes son también muy carbonatadas. El alto valor de la relación rMg/rCa (≈ 5) y el bajo valor para las aguas dulces (0.2 a 1) es también un posible índice.

4.2 Índices hidrogeoquímicos

Interés de algunas relaciones entre iones disueltos.

Las relaciones entre los iones disueltos en un agua pueden guardar cierta relación con el terreno del que procede el agua o indicar la acción de fenómenos modificadores, o indicar una característica específica del agua considerada. En lo que sigue, todos los valores se darán en meq/l, tal como indica el signo r. Se pueden establecer muchos tipos de relaciones, es frecuente designar a estas relaciones con el nombre de índices hidrogeoquímicos.

a) Relación rMg/rCa

Como el agua de mar tiene rMg/rCa alrededor de 5, las aguas que circulan por terrenos de formación marina o que han sufrido mezcla

con el agua del mar tienen también una elevada relación. Una elevación del contenido en cloruros y de la relación rMg/rCa puede ser un buen indicio de contaminación marina.

b) Relación rK/rNa

En aguas dulces puede variar entre 0.001 y 1 siendo lo más frecuente que varíe entre 0.004 y 0.3, mientras que para el agua marina vale de 0.02 a 0.025.

Debido a la fijación preferente de K^+ en el terreno, ésta relación es menor en el agua que en la roca origen, tanto menor cuanto más concentrada en sales está el agua.

Cuando el contenido en alcalinos (Na^+ y K^+), es menor que 3 ppm rK/rNa varía entre 0.5 y 1; para 50 ppm, vale alrededor de 0.1 y para 100 ppm, 0.01 como valor medio.

c) Relaciones rNa/rCa y $rNa/r(Ca+Mg)$

En general sólo tienen interés para comparar estas relaciones en el agua con las de la roca del acuífero, o bien para seguir los posibles procesos de cambios de bases; en este caso es preciso tener en cuenta que la precipitación o disolución de sales de Ca altera las relaciones sin que por ello se produzca algún cambio de bases.

d) Relación rCl/rCO_3H .

La relación rCl/rCO_3H es especialmente útil en la caracterización de la intrusión marina ya que en aguas continentales tiene normalmente un valor entre 0.1 y 5, y en el agua del mar varía entre 20 y 50. Si el incremento de cloruros es debido a concentración de sales en zonas de regadío, la relación crece mucho

menos para igual incremento de cloruros que cuando se produce intrusión marina.

e) Relación rSO_4/rCl

En aguas algo salinas el contenido en ion SO_4 tiende a hacerse constante y entonces tiene un interés similar al de la relación rCl/rCO_3H , no siendo de utilidad cuando se produce reducción de sulfatos; en este caso puede servir para caracterizarla.

En aguas poco salinas la relación rSO_4/rCl puede ser similar a la de la roca acuífera y su valor se mantiene aproximadamente constante al irse concentrando el agua. Cuando satura el SO_4 la relación deja de ser útil en este sentido, aunque ello sólo sucede cuando la salinidad es ya muy elevada.

f) Índice de desequilibrio entre cloruros y alcalinos o índice de cambio de bases, icb.

$$icb = \frac{rCl - r(Na+K)}{rCl}$$

El valor de esta relación es casi siempre negativo en aguas relacionadas con terrenos plutónicos, en especial con los graníticos. Para el agua del mar se toma un valor de 1.2 a 1.3 y en salmueras que tengan $rCl > 500$ es siempre positivo. Para aguas poco salinas puede ser tanto positivo como negativo.

Un aumento del valor de icb indica un cambio de bases de endurecimiento del agua y una disminución, un cambio de bases de ablandamiento. Al ir aumentando la salinidad de un agua, el valor icb tiende a crecer lentamente.

g) Relaciones rBr/rCl y rI/rCl

La primera se emplea con poca frecuencia pues es difícil disponer de análisis de Br. Es de interés en el estudio del origen de aguas salobres y saladas, puesto que en el agua del mar vale alrededor de 1.7×10^{-3} pudiendo tener valores muy diferentes en las aguas continentales. Las aguas asociadas con rocas orgánicas marinas y de disolución de depósitos de sal pueden tener una relación notablemente más elevada y las derivadas de salmueras residuales de lagunas la tienen menos elevada.

La segunda es bastante característica del origen de aguas salobres y salmueras pero es muy poco común disponer de análisis de ioduros. En el agua del mar la relación varía entre 2×10^{-6} mientras que en las aguas subterráneas es mayor.

4.3.- Otras características del agua del mar.

El peso específico del agua dulce se puede tomar como $\gamma_d = 1.000 \text{ g/cm}^3$, con escaso error dentro del margen de temperaturas normales. El peso específico del agua marina es mayor, y puede tomarse entre 1.020 y 1.030 según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual el de $\gamma_s = 1.025$ (para 1900 ppm en Cl^- equivalentes a 35g/l de sales disueltas).

La viscosidad del agua marina es del orden de un 30% mayor que la del agua dulce a igual temperatura.

C A P I T U L O I I I

"CONDICIONES ESTABLES"

III.1. INTRODUCCION

Los primeros investigadores que se interesaron en el problema de la intrusión salina en regiones costeras fueron Badon Ghyben y Herzberg; los cuales desarrollaron su teoría partiendo de tres hipótesis:

- a) El flujo de agua es perfectamente horizontal
- b) No existe flujo de agua salada
- c) La interfase es un plano.

Esta teoría tiene muchas limitantes, no obstante bajo ciertas condiciones proporciona resultados aceptables.

Posteriormente Hubbert le hizo una modificación al trabajo de Ghyben-Herzberg, la cual consiste, que al momento de calcular la profundidad de la interfase, aplicando la fórmula de estos autores, se toma como cota del agua dulce para el cálculo la que corresponde al potencial sobre ella. Considerando esta modificación la fórmula de Ghyben-Herzberg describe más correctamente la posición de la interfase.

III.2. POSICION DE LA CUÑA DE AGUA SALADA

2.1.- Fórmula de Ghyben-Herzberg

Los primeros estudios de la relación agua dulce-agua salada en regiones costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben (1899) y Herzberg (1901). Su estudio se basa en el equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad. Este análisis parte de las siguientes hipótesis:

- a) El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- b) No existe flujo de agua salada.
- c) La interfaz es un plano, no existiendo zona de mezcla.

En esta interpretación elemental, cuya sección transversal se representa en la Figura 6, la línea de costa, la interfase, el nivel del mar y nivel freático se cortan en un sólo punto. La profundidad de la interfase, Z_s , por debajo del nivel del mar, puede determinarse a partir de la ley Hidrostática de los vasos comunicantes (Figura 6); por tanto, si se toma la base del tubo comunicante como nivel del plano de referencia para las Z_s resulta:

$$Z_s \rho_s g = \rho_d Z_s + g \rho_d Z_w$$

Como $\gamma = \rho g$:

$$Z_s \gamma_s = Z_s \gamma_d + Z_w \gamma_d$$

Despejando Z_s

$$Z_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} Z_w$$

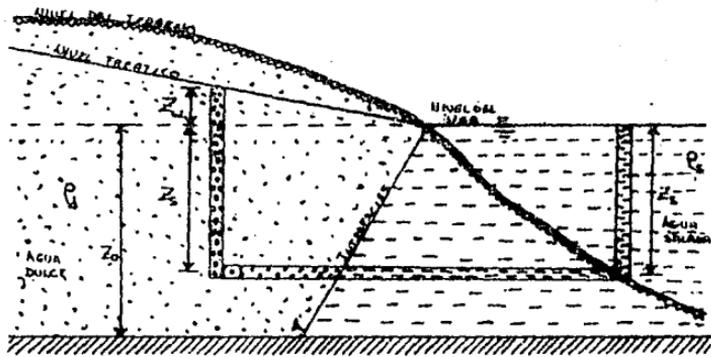


Figura 6

Equilibrio del agua dulce y el agua salada en una zona costera de acuerdo con los supuestos básicos de Ghyben-Herzberg.

Donde:

Z_s : profundidad de la interfase por debajo del nivel del mar.

Z_w : altura de la superficie freática sobre el nivel del mar.

γ_d : peso específico del agua dulce = 1,00

γ_s : peso específico del agua salada, que varía generalmente entre 1.020 y 1.030 g/cm³, siendo el valor más frecuente 1.025.

Así pues:

$$Z_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} Z_w = \frac{Z_w}{\beta}$$

donde

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d}$$

$1/\beta$ varía de acuerdo con lo dicho entre 50 y 33, siendo el valor más frecuente 40. Ello quiere decir, de acuerdo a la ecuación obtenida que por cada metro de agua dulce por encima del nivel medio del mar hay 40m de la misma por debajo del citado nivel, valores que concuerdan aproximadamente con los que se obtienen a partir de medidas directas.

La máxima penetración de la cuña de agua salada viene limitada por el fondo impermeable del acuífero (punto A de la Figura 6) que se produce cuando:

$$Z_w = Z_o \beta$$

siendo Z_o la profundidad la base del acuífero bajo el nivel del mar.

Las limitaciones de esta teoría son obvias: si ambos fluidos estuvieran en condiciones rigurosamente estáticas, el nivel freático

tendría pendiente nula y la interfase sería horizontal; por tanto, el agua dulce, por la mera diferencia de densidades, reposaría sobre la salada. Sin embargo, en la naturaleza el agua dulce se mantiene en un permanente estado dinámico producido por las variaciones del nivel freático debidas, entre otras causas, a la recarga originada por la infiltración, a la evaporación y a la descarga. Por otra parte, en muchas zonas costeras suelen existir afloramientos y manantiales por encima del nivel del mar; la teoría de Ghyben-Herzberg no los tiene en cuenta, así como tampoco considera las surgencias de agua dulce que existen por debajo del nivel del mar.

2.2.- Modificaciones de la ley de Ghyben-Herzberg. Corrección de Hubbert.

La ley de Ghyben-Herzberg describe correctamente la posición de la interfaz si el ancho de la zona de mezcla es pequeño, comparado con la profundidad y el movimiento del agua dulce es prácticamente horizontal. Sin embargo, aún en ausencia de zona de mezcla, no describe correctamente la posición de la interfaz cerca del afloramiento del acuífero en el mar, ya que de existir un gradiente piezométrico en el agua dulce debe haber circulación con velocidades crecientes y aparición de componentes verticales en la zona de existencia de la cuña de agua salada por la sucesiva menor sección de salida (Figura 7) la cual debe hacerse por una longitud finita y no por un punto.

El consiguiente aumento de velocidad del agua dulce en las proximidades de la costa provoca un aumento del gradiente, de modo que el nivel del agua en el acuífero tiene una cota superior a la que se obtendría al suponer flujo rigurosamente horizontal. Esto

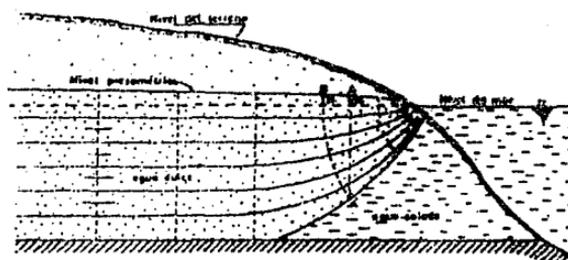


FIGURA 7
*Red de flujo en un acuífero costero sin consideración
 de la zona de mezcla de agua.*

explica la existencia de surgencias de agua dulce en playas y lugares costeros a cota ligeramente superior a la del mar.

Suponiendo que no existe zona de mezcla de aguas y que el agua salada está estacionaria, puede calcularse la posición de la interfaz en un cierto punto aplicando la Ley de Ghyben-Herzberg, si se toma como cota del agua dulce para el cálculo la que corresponde al potencial sobre ella. Por ejemplo, de la Figura 7, para el cálculo de la profundidad de la interfaz en A se toma la cota en B situado en la equipotencial que pasa por A'. Esta es la llamada corrección de Hubbert.

Dado que el potencial de la interfaz, h' , es mayor que la altura sobre el nivel del mar de la superficie freática en su vertical, h , se obtienen profundidades de la interfaz mayores que los valores calculados con la simple aplicación de la Ley de Ghyben-Herzberg. Sin embargo, si existe una fuerte recarga vertical, puede suceder que el potencial en la interfaz es menor que el que corresponde al nivel del agua en aquel punto y en este caso especial la profundidad calculada de la interfaz, es menor que la que se calcula con la Ley de Ghyben-Herzberg.

2.3.- Forma diferencial de la Ley de Ghyben-Herzberg

Considérese la Figura 8 que es una sección vertical según el flujo. La condición de que la interfaz sea estacionaria, exige que la velocidad del agua dulce V_d y del agua salada V_s junto a la misma le sean paralelas.

Según la Ley de Darcy:

$$V_d = -k \frac{dh_d}{ds} \dots\dots\dots (3.1)$$

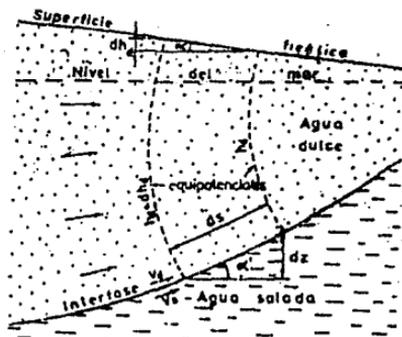


Figura 8

Esquema para determinar la ecuación de la interfaz.

$$V_s = -k_s \frac{dh_s}{ds} \dots \dots \dots (3.2)$$

Siendo h_d y h_s , los potenciales sobre la interfaz del agua dulce y del agua salada y k_d , k_s las permeabilidades del terreno para el agua dulce y el agua salada respectivamente. Como en cualquier punto de la interfaz la presión del agua dulce y del agua salada debe ser la misma.

$$(z_s + h_d) \gamma_d = (z_s + h_s) \gamma_s \dots \dots \dots (3.3)$$

es decir:

$$h_d = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} z_s + \frac{\gamma_s}{\gamma_d} h_s \dots \dots \dots (3.4)$$

y derivado respecto a s o sea respecto a la línea de la interfaz:

$$\frac{dh_d}{ds} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \frac{dz_s}{ds} + \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \frac{dh_s}{ds} \dots \dots \dots (3.5)$$

Sustituyendo las expresiones (3.1) y (3.2) en (3.5)

$$\frac{V_d}{k_d} - \frac{V_s}{k_s} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_d} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot \frac{dz}{ds} \dots \dots \dots (3.6)$$

Si el agua dulce y el agua salada están en reposo ($V_d = V_s = 0$) entonces

$$\frac{dz_s}{ds} = 0, \text{ o sea que la interfaz debe ser horizontal.}$$

Si el agua dulce está en movimiento y el agua salada en reposo

$$(V_s = 0).$$

$$V_d = k_d \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \frac{dz}{ds}$$

es decir:

$$\frac{dz}{ds} = \frac{1}{\beta} \frac{dh_d}{ds}$$

que es la forma diferencial de la Ley de Ghyben-Herzberg.

2.4.- Inclinación de la Interfaz.

La inclinación de la interfaz viene dada en la ecuación (3.6)

a las que de ella se derivan por:

$$\frac{dz}{ds} = \text{sen } \alpha'$$

Si $\frac{dh_d}{ds}$ puede tomarse igual a $\text{sen } \alpha$ (Figura 8) entonces

$$\frac{\text{sen } \alpha'}{\text{sen } \alpha} = \beta$$

Donde α y α' son respectivamente las pendientes del nivel freático o piezométrico, y de la interfase, en puntos que se corresponden sobre una misma equipotencial del agua dulce.

III.3. APLICACION A ACUIFEROS A PRESION

3.1.- Acuíferos cautivos

La Ley de Ghyben-Herzberg y todas las demás consideraciones hechas son válidos para acuíferos cautivos o semiconfinados sin más que considerar niveles piezométricos en vez de niveles freáticos. En la figura 9 se representan varios casos posibles. En el caso A el potencial del agua dulce en la zona del contacto con el mar es suficiente para contrarrestar el peso de las columnas de agua marina en parte de la misma. Se produce el escape de agua dulce al mar y una pequeña cuña de agua salada. Si z es la profundidad de la parte más alta de la zona de contacto con el mar, para que se pueda establecer el flujo de agua dulce es preciso que el nivel

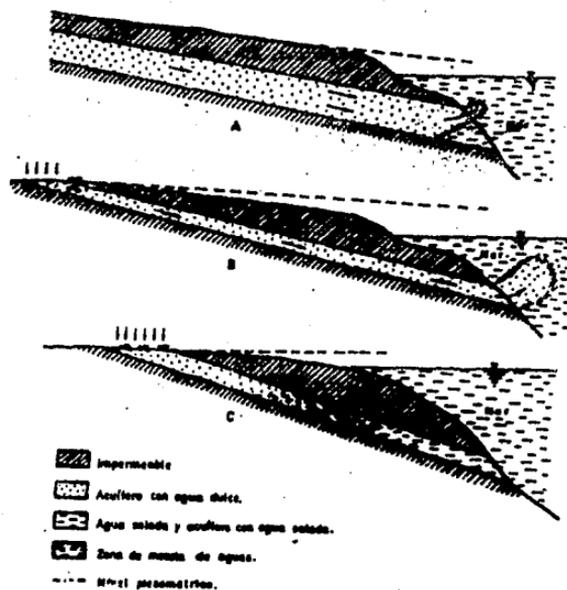


Figura 9

Relaciones agua dulce-agua salada en acuíferos cautivos costeros. A) El potencial del agua dulce es suficiente para permitir el escape al mar. B) El potencial del agua dulce es muy elevado y no puede desarrollarse la cuña de agua salada. C) El potencial de agua dulce es pequeño comparado con la profundidad del afloramiento al mar y no puede producirse el escape; la zona de mezcla está muy desarrollada; el acuífero está permanentemente lleno y la recarga no es posible.

piezométrico del agua dulce en ese lugar h_d valga:

$$(h_d + z) \gamma_d \geq z \gamma_s$$

$$h_d \geq \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} z = \beta z$$

Si el valor h_d es menor no puede producirse escape de agua dulce al mar (caso c), entonces la interfaz tiende a ser horizontal por ser el sistema estático, y la zona de mezcla es espesa por no haber expulsión de agua salobre; el acuífero está lleno y la posible recarga es rechazada o bien se fuga a través del techo en zonas poco profundas manteniendo así una zona superior de agua dulce en movimiento.

Si z' es la profundidad del punto más bajo de la zona de contacto se cumple que:

$$h_d \geq \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} z' = \beta z'$$

no puede producirse cuña de agua salada y el acuífero actúa como una tubería inyectando agua a presión dentro del mar.

A veces el contacto entre un acuífero y el mar no es homogéneo y el agua tiende a escaparse por lugares preferentes, en cantidad y con presión suficiente como para ser su flujo perceptible, originando surgencias submarinas de agua dulce. Ello sucede especialmente en acuíferos calcáreos karstificados.

En los casos A y B puede verse que el acuífero con agua dulce se extiende bajo el mar, e incluso puede suceder también en el caso C, si en la parte alta del acuífero se producen pequeñas fugas que mantengan un mínimo de renovación.

En el caso C, si el techo del acuífero presentase grietas o estuviese perforado, pueden aparecer surgencias de agua salobre si se sitúan aquellas sobre la zona de mezcla, y éste puede ser el origen de surgencias litorales o submarinas de agua salobre. Estas surgencias contribuyen a mantener el equilibrio de sales en la zona de difusión.

Si existen varios acuíferos superpuestos, cada uno de ellos con una altura piezométrica diferente (Figura 10), se establecen diferentes estados de equilibrio y en la costa pueden encontrarse acuíferos de agua dulce y acuíferos de agua salada o salobre en la misma vertical.

En acuíferos semiconfinados, todo o parte del escape de agua dulce al mar puede hacerse a través del techo semipermeable.

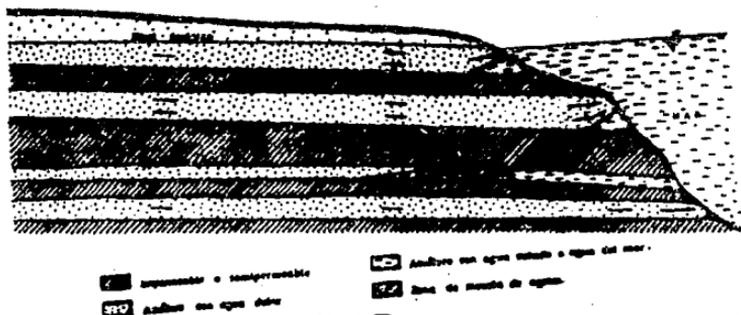


Figura 10

Superposición de varios acuíferos. La penetración de agua salada depende del potencial individual de cada acuífero.

CAPITULO IV

"CONDICIONES TRANSITORIAS"

IV.1. INTRODUCCION

En el presente capítulo se estudia la posición de la interfaz considerando que el agua salada no está estática, se encuentra en condiciones dinámicas; por tal razón se tienen que considerar los fenómenos de difusión y dispersión hidrodinámica que actúan en el medio poroso al tener dos fluidos miscibles en contacto como lo son el agua dulce y el agua salada.

Para el estudio de la interfaz bajo estas condiciones, se utilizará la fórmula de Hubbert, la cual en términos generales consta de dos sumandos, el primer sumando corresponde a la Ley de Ghyben-Herzberg con un ajuste por distribución potencial, y el segundo es la corrección a realizar a causa del flujo del agua salada.

Otra fórmula utilizada de gran utilidad para estas condiciones es la fórmula de Lusczynski, que es una relación general aplicable a un medio poroso con un fluido de densidad variable. Es muy útil, pues permite comparar las diferencias entre tener en cuenta y prescindir de la zona de mezcla.

Como parte final de este capítulo se presenta un estudio de cálculos relativos a las relaciones agua dulce-agua salada, en acuíferos costeros; se analizan cinco casos: acuífero libre recargado uniformemente por la lluvia, acuífero cautivo, cálculos más exactos de la posición de la interfase cuando no hay zona de mezcla. Fórmula de Glover, longitud de vertido al mar en un acuífero semiconfinado, y relaciones agua dulce-agua salada en islas oceánicas.

IV.2. PROFUNDIDAD DE LA INTERFASE CON AGUA DULCE Y AGUA SALADA EN MOVIMIENTO.

2.1.- Difusión y dispersión hidrodinámica en medios porosos

La difusión se refiere a la expansión y dilución de un fluido en otro cuando son miscibles y de diferente o igual densidad. Este es un proceso producido por la agitación molecular de los líquidos a consecuencia de su temperatura. Se puede ejemplificar sencillamente considerando la difusión que sufre una gota de tinta en un recipiente con agua en reposo; la mancha producida va aumentando progresivamente, al mismo tiempo que se va diluyendo.

La dispersión por su parte se refiere a la desviación del flujo de una sustancia a causa del irregular acomodo de los granos y la consiguiente tortuosidad de la trayectoria formada por los poros comunicados. Las partículas de dicha sustancia tienen que moverse a través del medio por diferentes caminos, que dejan los granos o las grietas del material (ver Figura 11).

El conocimiento de los fenómenos de difusión y dispersión de una sustancia en un medio poroso, es básico en los estudios relacionados con la intrusión salina para determinar el grado de mezcla que se tiene en el contacto del agua dulce y del agua salada.

2.2.- Justificación de la existencia de una interfase dinámica

En la zona de contacto entre el agua dulce y el agua salada se desarrollan los fenómenos de difusión y dispersión hidrodinámica originada por el movimiento del agua a lo largo de la interfase. Esta zona de mezcla está en movimiento con velocidad paralela al plano central; este movimiento limita el espesor de la zona de

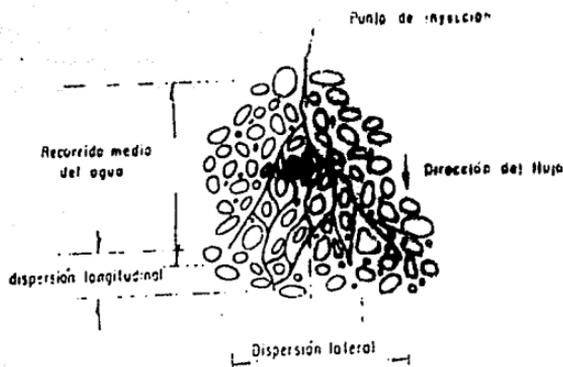


Figura 11

Dispersión hidrodinámica

mezcla, que es tanto menos gruesa cuanto mayor es el flujo y menores son los movimientos de la interfaz. Si no existiese tal flujo, el ancho de la zona de mezcla, aunque muy lentamente, crecería indefinidamente con el tiempo. El movimiento del agua en la zona de mezcla y su posición es inducida por el movimiento del agua dulce. Este mismo movimiento provoca un flujo de agua salada hacia el interior del continente (Figura 12). Este movimiento del agua salada requiere un gradiente y por eso el nivel piezométrico del agua salada en el terreno es ligeramente inferior al del agua libre del mar.

La demostración analítica del movimiento de la zona de mezcla se puede hacer de una manera muy sencilla, si se divide la zona de mezcla en n bandas cada una de ellas con un agua de peso específico γ (i entre 1 y n):

Considerando que es pequeña la variación de permeabilidad al ir aumentando la salinidad, entre dos de esas bandas se establecerá que:

$$\frac{v_i}{k_i} - \frac{v_{i+1}}{k_{i+1}} \frac{\gamma_{i+1}}{\gamma_i} = \frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{\gamma_i} \frac{dz}{ds} \dots \dots \dots (4.1)$$

luego existe movimiento relativo entre cada una de las bandas, pues aunque una sola de ellas estuviese estacionaria no lo podrían estar las otras, si el agua dulce a su vez está en movimiento.

Son múltiples las evidencias de la existencia de tal zona de difusión y de su movimiento, es por esta razón que no es de extrañarse cuando se encuentran en las costas surgencias de agua salobre a cotas ligeramente superiores al nivel medio del mar, que

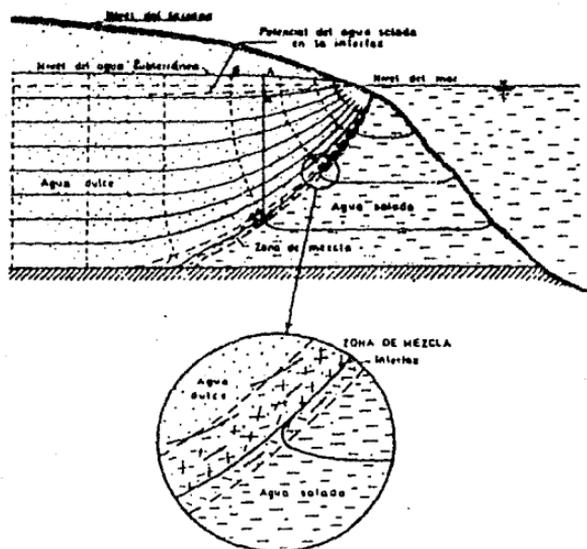


Figura 12

Flujo de agua dulce y del agua salada en la zona de contacto en un acuífero costero. La ampliación señalada el movimiento en la zona de mezcla.

ponen de manifiesto el movimiento de la zona de mezcla y que pueden rebasar el nivel del mar, gracias a la disminución de densidad.

Si hay intrusión marina, existe movimiento de agua salada hacia el interior del continente y por lo tanto el valor de h_s es aún más negativo; la interfaz es más profunda y más inclinada, lo que ocasiona además que el espesor de la zona de mezcla sea menor. Si por el contrario es el agua dulce la que está desplazando al agua marina, el movimiento del agua salada hacia el mar precisa que h_s sea positivo y por lo tanto la interfaz es más alta de lo que sería de esperar y su pendiente es mucho menor y el ancho de la zona de mezcla puede ser importante, no sólo por el movimiento sino por el menor lavado de sales.

2.3.- Fórmula de Hubbert

Para establecer la fórmula de Hubbert, el análisis se apoyará en la Figura 13. Supóngase que en cierto lugar se tienen dos piezómetros, uno abierto en el agua dulce justo por encima de la interfaz y el otro abierto, justo abajo de la interfaz. En el primero se observa un nivel de agua dulce sobre el nivel del mar h_d y en el segundo un nivel de agua salada h_s , que de acuerdo a la convención de signos generalmente es negativo. La profundidad z de la interfaz vendrá dada por el equilibrio entre ambas columnas de líquido.

$$(z + h_d) \gamma_d = (z + h_s) \gamma_s$$

Despejando z :

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_d - \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} h_s$$

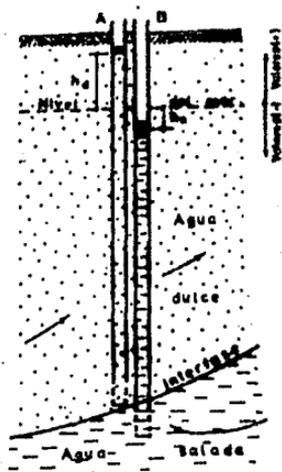


Figura 13
 Esquema para el cálculo de
 la fórmula de Hubbert.

$$= \frac{1}{\beta} h_d - \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) h_s \dots \dots (4.2)$$

que es la fórmula de Hubbert.

Como se puede ver, el primer sumando corresponde a la Ley de Ghyben-Herzberg con un ajuste por distribución potencial (dependiendo del valor de h_d que adopte), y el segundo es la corrección a realizar a causa del flujo del agua salada.

Como h_s es en general negativo, la profundidad de z calculado con la fórmula de Hubbert es mayor que la que se calcularía de acuerdo con la Ley de Ghyben-Herzberg con o sin corrección de potencial en la interfaz. La diferencia de valores de z es muy notable sólo cerca de la costa o cuando el potencial de agua salada difiere mucho de la del mar. En puntos alejados de la costa, si el espesor de la zona de mezcla es reducido y el acuífero es razonablemente homogéneo, el cálculo de z con la Ley de Ghyben-Herzberg dá resultados satisfactorios.

IV.3. ZONA DE DISPERSION Y FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA CON SALINIDAD VARIABLE.

3.1.- Potencial de agua puntual, potencial de agua dulce y potencial de agua ambiental o local

El nivel de agua en un piezómetro lleno de la misma agua existente en su zona ranurada corresponde al potencial puntual, h_p . Este potencial puntual es el que normalmente se mide en pozos y piezómetros.

Si se tiene un piezómetro ranurado a una profundidad z bajo el nivel del mar en agua salada y lleno de agua de densidad puntual, γ_p , el correspondiente potencial de agua dulce se deducirá del equilibrio de presiones en la zona ranurada.

$$(z+h_d) \gamma_d = (z+h_p) \gamma_p$$

$$h_d = \frac{\gamma_p - \gamma_d}{\gamma_d} z + \frac{\gamma_p}{\gamma_d} h_p \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

siendo h_d la cota del agua dulce correspondiente al potencial de agua dulce y h_p la cota medida del agua salada o mezclada en el tubo.

Es importante señalar que en la zona de agua dulce el potencial de agua dulce es igual al potencial puntual. En la zona de agua salada, aún siendo estacionaria, el potencial de agua dulce crece de forma muy importante al aumentar la profundidad del piezómetro, ya que cada vez se sustituye una columna mayor de agua salada por agua dulce.

Si la columna del piezómetro está llena de agua de diferentes densidades de modo que su distribución sea similar a la existente en el terreno, el nivel del agua en el tubo permite determinar el llamado potencial ambiental o local, h_a .

Supóngase que la zona de difusión se extiende entre las profundidades z_1 y z_2 , siendo agua salada sin mezcla la que se extiende entre z_2 y z_3 (z_3 : profundidad del piezómetro), y agua dulce por encima de z_1 . El balance de presiones con el agua salada de potencial h_s es el potencial ambiental (Figura 14.).

$$(h_s + z_3) \gamma_s = (h_a + z_1) \gamma_d + \int_{z_1}^{z_2} \gamma(\ell) d\ell + (z_3 - z_2) \gamma_s$$

de la que puede deducirse h_s

$\gamma(\ell)$ es el peso específico del agua mezcla a profundidad ℓ y es función de z .

Si z_1' es un punto dentro del agua dulce entre $(h_a + z_1)$ y h_p

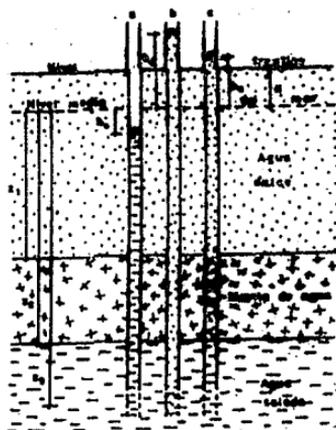


Figura 14

- a) Nivel del agua puntual h_s
- b) Nivel del agua dulce, h_d
- c) Nivel del agua ambiental o local, h_a

es el potencial puntual a profundidad z :

$$(h_p + z) \gamma_p = (h_a + z_1) \gamma_d + \int_{z_1}^z \gamma(\ell) d\ell$$

El nivel del agua ambiental no tiene que coincidir con el nivel freático, puede ser algo superior o algo menor. Sólo lo igualará en un sistema de flujo totalmente horizontal.

El nivel del agua ambiental no puede ser medida directamente y debe ser calculado. Conviene tener en cuenta la influencia de la temperatura sobre la densidad, a fin de efectuar el cálculo correctamente. Los valores de $\gamma(\ell)$ en función de ℓ se pueden determinar por muestreo cuidadoso, o indirectamente a partir de mediciones de conductividad del agua o del terreno y de la temperatura.

Es posible calcular un valor medio del peso específico ponderado según la profundidad, γ_a' :

$$\gamma_a' = \frac{1}{z - z_1} \int_{z_1}^z \gamma(\ell) d\ell$$

Si se conocen h_p y γ_a' , correspondientes a la profundidad z , es fácil hallar h_a pues:

$$\gamma_d \cdot h_a = \gamma_p \cdot h_p + (\gamma_p - \gamma_a') z + (\gamma_a' - \gamma_d) z_1$$

Una vez calculada h_a , llevando z_1 a z_1 :

$$\gamma_d \cdot h_a = \gamma_p \cdot h_p + (\gamma_p - \gamma_a) z + (\gamma_a - \gamma_d) z_1 \dots \dots (4.4)$$

siendo:

$$\gamma_a = \frac{1}{z - z_1} \int_{z_1}^z \gamma(\ell) d\ell$$

La única incógnita es z_1 , puesto que γ_a depende también de z_1 .

Por lo tanto es posible determinar z_1 por iteración.

En realidad el proceso es sencillo, puesto que si se conoce $\gamma(\ell)$, se conoce automáticamente z_1 , sin necesidad de efectuar el cálculo. No obstante, si se conoce γ solamente en dos o tres puntos es posible establecer una cierta distribución y con ella calcular z_1 . Para ello es preciso disponer por lo menos de dos piezómetros, uno abierto en el agua salada y otro abierto en el agua dulce, pero es deseable disponer de un tercer piezómetro abierto en la zona de mezcla.

3.2.- Fórmula de Lusczynski y comparación con las de Hubbert y Ghyben-Herzberg.

Considerando que se tiene un acuífero con agua dulce en la parte superior y agua salada en la parte inferior, existiendo entre las profundidades z_1 y z_2 agua mezcla, la fórmula (4.4) se puede escribir:

$$(\gamma_a - \gamma_d) z_1 = \gamma_d \cdot h_a - \gamma_p \cdot h_p - (\gamma_p - \gamma_a) z \dots \dots (4.5)$$

Esta ecuación es la llamada fórmula de Lusczynski; es muy útil pues permite comparar las diferencias entre tener en cuenta y prescindir de la zona de mezcla. Es una relación general aplicable a un medio poroso con un fluido de densidad variable.

Haciendo un análisis detallado de esta ecuación, se tienen los siguientes casos:

a) Si $z_1 = z_2$ (ausencia de zona de mezcla), es $\gamma_a = \gamma_s$ y $h_p = h_s$:

$$z_1 = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} [-\gamma_s h_s + \gamma_d h_a]$$

que es igual a la fórmula de Hubbert si se hace $h_a = h_d$, lo que

equivale a suponer flujo perfectamente horizontal, además de la ausencia de la zona de mezcla.

b) Si además se supone que el agua salada es estacionaria con el nivel medio del mar, $h_s = 0$

$$z_i = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} \gamma_d h_a = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_d$$

que es la fórmula de Ghyben-Herzberg.

Si la única restricción es que el flujo es horizontal, $h_a = h_d$, la fórmula de Luszyński queda simplificada a:

$$z_i = \frac{1}{\gamma_a - \gamma_d} [-\gamma_p h_p - z (\gamma_p - \gamma_a) + \gamma_d h_d]$$

que es mejor que la de Hubbert puesto que incluye la zona de mezcla.

Es muy importante considerar que la fórmula de Ghyben-Herzberg supone que el agua salada tiene el nivel medio del mar y se toma como cero y por ello es preciso conocer el nivel medio del mar. En cambio, como las otras fórmulas determinan el nivel del agua salada, la referencia altimétrica puede ser cualquiera.

3.3.- Cálculo de la profundidad del agua salina

Es de gran importancia el cálculo de la profundidad a la cual empieza el agua contaminada por el agua del mar en los acuíferos costeros. La forma más directa de realizar este cálculo es midiendo la variación de salinidad en profundidad, pero esta forma implica mucho trabajo y altos costos en la medición; por esta razón se intenta determinar aquella profundidad a partir de medidas piezométricas cuidadosas.

El modo más sencillo consiste en disponer de:

Un piezómetro apenas penetrando el acuífero;

Medir el nivel del agua en el piezómetro respecto al nivel medio del mar (h_d), y tener la densidad del agua dulce de su zona ranurada (γ_d);

Conocer la densidad del agua marina en el acuífero (γ_s).

La profundidad de la interfaz se calcula mediante la fórmula de Ghyben-Herzberg, que como ya se ha discutido, implícitamente supone flujo perfectamente horizontal, agua salada estacionaria y total ausencia de zona de mezcla. El valor de la profundidad de la interfaz, es por lo general, menor que el real en ausencia de esa zona de mezcla, pero mucho mayor que el comienzo de la zona de mezcla, cuando ésta es espesa. Por otro lado para aplicar la fórmula de Ghyben-Herzberg es necesario determinar la posición del nivel medio del mar, y no siempre se tiene seguridad de que sea el nivel más idóneo de referencia en sistemas dinámicos.

Es por esto que se debe utilizar ésta fórmula con mucha reserva en zonas con elevada mezcla.

Se mejora el cálculo si se dispone de un segundo piezómetro abierto en el agua salada, en el que se mide el nivel, y la densidad del agua salada. La profundidad de la interfaz se calcula utilizando la fórmula de Hubbert y proporciona una posición intermedia de la zona de mezcla en ausencia de flujo vertical importante, que tampoco es útil en caso de que aquella sea espesa. En este caso no es preciso conocer el nivel medio del mar.

Con la fórmula de Lusczynski, teóricamente se consigue una mejora en el cálculo de la posición de la interfaz, utilizando dos piezómetros, similares a los que se acaban de mencionar, los cuales

permiten determinar γ_d, γ_p, h_d y h_p , pero no γ_a y h_a (z es la profundidad de apertura del piezómetro que llega al agua salada).

4.2.4. -Velocidad de flujo del agua subterránea.

En una zona donde hay agua dulce, agua salada y agua mezcla no puede determinarse directamente la línea de flujo del agua ya que el fluido es de densidad variable. De esto se comentan dos resultados importantes:

a) La velocidad de flujo horizontal viene determinada por los potenciales de agua dulce medidos sobre ese mismo plano (no a otras profundidades). Si en un plano horizontal se representan las líneas de igual potencial de agua dulce y el medio es homogéneo e isótropo en sentido horizontal, las líneas de corriente les son perpendiculares.

b) La velocidad de flujo vertical viene determinada por el gradiente de potenciales de agua ambiental verdaderos en la vertical considerada.

No se debe cometer el error de suponer que cuando todos los niveles del agua se han convertido a niveles de agua dulce se pueden aplicar las Leyes de las redes de flujo ya que el sistema se ha transformado en uno de agua homogéneo; eso sólo es cierto sobre planos horizontales, pero no cuando se manejan resultados a profundidades diferentes.

Es importante destacar que en un sistema en régimen estacionario con fluido no homogéneo, las velocidades en los puntos de la zona de transición son prácticamente paralelas a las líneas de igual densidad.

3.4.- Efectos de cambios en el nivel del agua.

Si cambia el potencial de agua dulce, debe cambiar el del agua salada para que se establezca una nueva situación de equilibrio. Sin embargo, la interfaz se mueve muy lentamente ya que supone el desplazamiento de muy grandes volúmenes de agua; esa velocidad es del orden de la del movimiento del agua subterránea.

El equilibrio de la interfaz viene dado por la fórmula:

$$(z + h_d) \gamma_d = (z + h_s) \gamma_s \dots \dots \dots (4.6)$$

si se produce un incremento rápido de potencial del agua dulce Δh_d , en los primeros momentos apenas ha cambiado la posición de la interfaz de modo que:

$$(z + h_d + \Delta h_d) \gamma_d = (z + h_s + \Delta h_s) \gamma_s \dots \dots \dots (4.7)$$

siendo h_s el cambio de potencial del agua salada correspondiente.

Restando de la ecuación (4.7) la ecuación (4.6) queda:

$$\Delta h_d = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \Delta h_s$$

la cual se puede expresar en forma diferencial derivándola a lo largo de la interfaz,

$$\frac{d\Delta h_d}{ds} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \frac{d\Delta h_s}{ds}$$

las velocidades del agua dulce y del agua salada a lo largo de la interfaz son:

$$v_d = -K_o \frac{\gamma_d}{\mu_d} \frac{dh_d}{ds}$$

$$v_s = -K_o \frac{\gamma_s}{\mu_s} \frac{dh_s}{ds}$$

y tomando $\mu_s = \mu_d = \mu$ = viscosidad del fluido, para las variaciones de

velocidad:

$$\Delta V_d = \Delta V_s$$

sobre la interfaz.

Por lo tanto, siendo las velocidades normales a la interfaz iguales y también las paralelas a la misma, resulta que toda el agua en el acuífero reacciona como un bloque a estímulos externos, al menos en los primeros momentos. A largo plazo la forma de la interfaz se modifica para adaptarse a las nuevas circunstancias de equilibrio.

El efecto cíclico de mareas crea una posición intermedia de la interfaz que sólo es modificada por cambios rápidos de nivel del mar (tormentas) o por cambios del agua dulce (recarga o descarga).

Las recargas rápidas producen efectos similares a un cambio brusco de nivel y van seguidas de una descarga lenta que da tiempo a modificar la posición y forma de la interfaz.

IV.4. CALCULOS RELATIVOS A LAS RELACIONES AGUA DULCE- AGUA SALADA EN ACUIFEROS COSTEROS

El cálculo de la posición de la interfaz agua dulce-agua salada puede realizarse admitiendo flujo horizontal de acuerdo con las aproximaciones de Dupuint-Forchheimer, admitiendo que es válida la fórmula de Ghyben-Herzberg. Ello equivale a suponer que el espesor de la interfaz es nulo, que las componentes verticales de la velocidad de flujo son despreciables, lo cual no siempre es admisible. Aún así, el tratamiento de acuíferos inclinados o de varios acuíferos semiconfinados se complica y es preciso recurrir a resoluciones numéricas.

4.1.- Cálculo aproximado de la profundidad de la interfase y del flujo de agua dulce al Mar, en ausencia de la zona de mezcla

Para estos cálculos aproximados se admitirá que:

- a) El acuífero es homogéneo
- b) No hay zona de mezcla
- c) El flujo cumple los supuestos de Dupuit-Forchheimer de flujo horizontal si se trata de un acuífero libre.
- d) Es válida la fórmula de Ghyben-Herzberg. $h = \beta z$.
- e) Se cumple la Ley de Darcy.

Los cálculos se realizan por unidad de ancho de acuífero, sobre una fracción vertical perpendicular a la costa.

4.1.1.- Acuífero libre recargado uniformemente por la lluvia.

El esquema de funcionamiento está representado en la Figura 15; W es la recarga en altura de agua por unidad de tiempo. En el punto $x = 0$, existe un flujo de agua dulce q_0 por unidad de ancho de costa. En el punto a distancia x :

$$q_0 + W x = - K \left(h + \frac{1}{\beta} h \right) \frac{dh}{dx}$$

Integrando y teniendo en cuenta que para $x = 0$, $q = q_0$ y $h = h_0$

$$h_0^2 - h^2 = \frac{2 q_0 x + W x^2}{K(1 + 1/\beta)} \dots \dots \dots (4.8)$$

que es de tipo parabólico.

Haciendo $h = \beta z$ se obtiene la ecuación de la interfaz

$$z_0^2 - z^2 = \frac{2q_0 x + W x^2}{K\beta(1 + \beta)}$$

estando z medida a partir del nivel del mar.

Para $x = L$, $h = 0$.

En realidad L no debe situarse sobre la línea de costa pues es

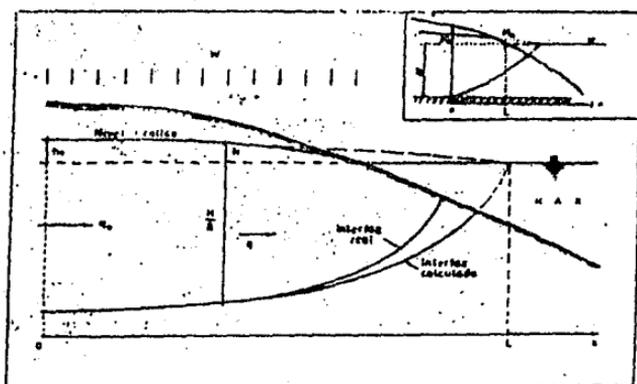


Figura 15
 Interfaz en un acuífero libre recargado uniformemente por la lluvia.

preciso dejar salida del agua dulce al mar. En muchos casos esta longitud es mucho menor que L y no se comete gran error al suponer que la interfaz corta al nivel del mar en la propia línea de costa. En todo caso puede tomarse el valor de L que resultaría de extrapolar el nivel freático hasta que corte al nivel del mar, despreciando la contribución de la recarga que cae sobre el mar.

También puede tomarse que en la costa el nivel freático es $h_a = q_o/K$, valor deducido del estudio bidimensional de un acuífero cautivo con el techo junto al nivel del mar y con el fondo del mar horizontal.

Si la base del acuífero está a profundidad z_o bajo el nivel del mar y h_a es el nivel del agua dulce en las proximidades de la costa, puede calcularse la penetración de la cuña L tomando $x = 0$ en el pie de la misma. Como $x = L$ para $h = h_a$, siendo $h_o = \beta z_o$ (Figura 15)

$$L = -\frac{q_o}{W} + \sqrt{\frac{q_o^2}{W^2} + \frac{\beta(\beta+1)k}{W} \left(z_o^2 - \frac{h_a^2}{\beta^2} \right)} \dots (4.9)$$

para $h_a = 0$ es

$$L = -\frac{q_o}{W} + \sqrt{\frac{q_o^2}{W^2} + \frac{\beta(\beta+1)k}{W} z_o^2}$$

La recarga por lluvia provoca componentes verticales descendentes del flujo que hacen que la interfaz real pueda ser algo más alta que la calculada.

4.1.2.- Acuífero cautivo

Apoyándose en la Figura 16 y teniendo en cuenta que q_o es constante y siendo b el espesor del acuífero puede establecerse:

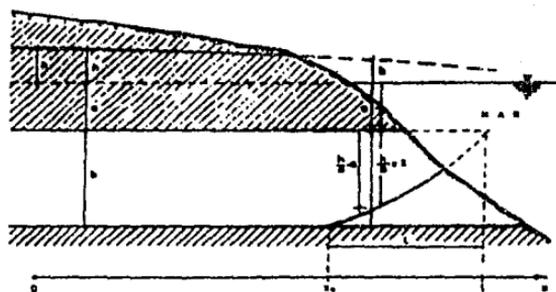


Figura 16
 Interfase en un acuffero cautivo

$$q_0 = -Kb \frac{dh}{dx}$$

fuera de la cuña salina.

En la zona con cuña salina la interfaz se sitúa a profundidad

$$z = h/\beta$$

y la sección por la que debe circular el agua dulce es $(h/\beta) - a$.

Así puede establecerse:

$$q_0 = -K \left(\frac{h}{\beta} - a \right) \frac{dh}{dx} = -\frac{K\beta}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{h}{\beta} - a \right)^2$$

Para $x = x_0$ debe ser $(h/\beta) - a = b$, sustituyendo en la ecuación integrada:

$$b^2 - \left(\frac{h}{\beta} - a \right)^2 = \frac{2q_0}{\beta k} (x - x_0)$$

que da la ecuación de superficie piezométrica sobre la cuña salina, la cual también es parabólica.

La ecuación de la interfaz se obtiene teniendo en cuenta que

$$z = h/\beta.$$

$$b^2 - (z - a)^2 = \frac{2q_0}{\beta k} (x - x_0) \dots \dots \dots (4.10)$$

A cierta distancia $x_0 + L$ debe ser $(h/\beta) - a = 0$, lo que permite determinar x_0 . $L + x_0$ puede estimarse como la distancia al afloramiento submarino del acuífero, a un poco más, o bien extrapolando la superficie piezométrica hasta una distancia tal que determine un potencial de agua dulce, igual al existente sobre el afloramiento submarino del acuífero. Ello lleva a sobredimensionar el valor de L , longitud de la cuña salina.

Se cumple que:

$$L = \frac{\beta K b^2}{2q_0} \dots \dots \dots (4.11)$$

4.1.3.- Cálculos mas exactos de la posición de la interfase cuando no hay zona de mezcla. Fórmula de Glover.

La red de flujo que conduce a la fórmula de Glover es la indicada en la Figura 17. cuyos supuestos básicos son:

- a) No hay zona de mezcla
- b) El acuífero es cautivo y el techo coincide con el nivel del mar
- c) El agua dulce sale al mar por una superficie horizontal de longitud x_0
- d) El nivel del mar no sufre fluctuaciones y el agua salada en el acuífero es estática
- e) El acuífero es de gran espesor, de modo que en la zona de estudio la cña de agua salada no toca a la base del mismo.

La red de flujo viene dada por:

$$x + lz = \frac{K}{2q_0\beta} (\phi + l\psi)^2$$

x: distancia a la costa

z: profundidad de la interfaz bajo el nivel del mar

q_0 : caudal de agua dulce por unidad de longitud de costa

K= permeabilidad

$$l = \sqrt{-1}$$

$$\beta = \frac{\gamma_B - \gamma_d}{\gamma_d}$$

La función potencial es:

$$\phi^2 = \frac{q_0\beta}{K} \left(x + \sqrt{x^2 + z^2} \right)$$

y la función de corriente es:

$$\psi^2 = \frac{q_0\beta}{K} \left(-x + \sqrt{x^2 + z^2} \right)$$

La ecuación de la interfaz es (fórmula de Glover):

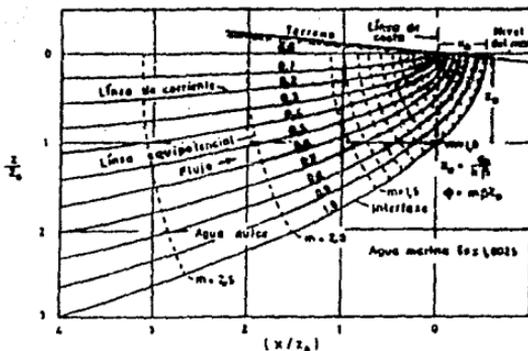


Figura 17

Red de flujo de agua dulce en un acuífero costero.
 Condiciones de la fórmula de Glover (1959)
 Flujo total = q_0

Flujo por encima de cualquier línea de corriente
 = nq_0 . Para un potencial Φ_1 , medido en $z=0$ y $x=x_1$
 se tiene que:

$$q = \frac{k \Phi_1 \beta}{2 \pi_1}$$

$$z^2 - \frac{2q_0 x}{\beta K} - \frac{q_0^2}{K^2 \beta^2} = 0 \quad \dots \quad (4.12)$$

y el agua escapa al mar por una franja de ancho

$$x_0 = \frac{q_0}{2K\beta} \quad \dots \quad (4.13)$$

valiendo la profundidad de la interfaz z_0 y el nivel piezométrico h_0 en la costa:

$$z_0 = \frac{q_0}{K\beta} ; \quad h_0 = \frac{q_0}{K}$$

Si q_0 disminuye, disminuye x_0 .

La fórmula puede aplicarse sin gran error a acuíferos libres con gradiente piezométrico pequeño y cuando la pendiente del terreno bajo el mar es pequeña.

4.1.4.- Longitud de vertido al mar en un acuífero semiconfinado.

Sea el caso de la Figura 18, que también sirve para definir los valores a utilizar.

$$(h_d + z)\gamma_d = z\gamma_s$$

h_d es el potencial de agua dulce correspondiente al fondo del mar.

En un punto x se tiene:

a) Circulación horizontal del agua por unidad de longitud de costa:

$$q_x = -bk \frac{dh}{dx} \quad \dots \quad (4.14)$$

b) Circulación vertical del agua por unidad de longitud de costa en una franja de anchura dx :

$$-dq_x = \frac{h - h_d}{b'} K' dx$$

de donde

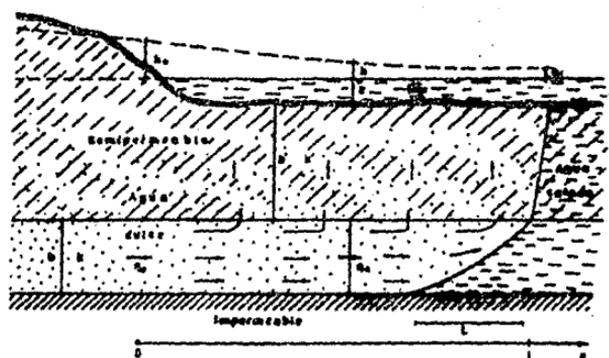


Figura iB

Vertido al mar de un acuífero semiconfinado.

$$\frac{d^2 q_x}{dx^2} = \frac{K'}{b'} \frac{dh}{dx} \dots \dots \dots (4.15)$$

Eliminando dh/dx entre las ecuaciones (4.14) y (4.15)

$$\frac{d^2 q_x}{dx^2} = \frac{K'/b'}{Kb} q_x = \frac{q_x}{b^2}$$

siendo $B^2 = \frac{Kb}{K'/b'}$ = coeficiente de goteo.

$$q_x = A e^{-x/B} + c$$

siendo A y c constantes.

También es:

$$-\frac{dq_x}{dx} = \frac{h - h_d}{b} K' = \frac{A}{B} e^{-x/B}$$

La condición de contorno es:

$$x = 0 ; q_x = q_0 ; h = h_0$$

de donde

$$q_x = q_0 - B \frac{h_0 - h_d}{b'} K' (1 - e^{-x/B})$$

para $x = l$ se debe cumplir que $q_x = 0$, de donde

$$1 = B \operatorname{Ln} \frac{h_0 - h_d}{\frac{q_0 b'}{BK'} (h_0 - h_d)} \dots \dots \dots (4.16)$$

En realidad la fórmula no es exacta puesto que no considera la presencia de la cuña de agua salada. Puede acertarse si es $l \gg L$, longitud de la cuña. De otro modo se llega a una ecuación diferencial sin solución exacta.

4.1.5.- Relaciones agua dulce-agua salada en islas oceánicas

Muchas islas oceánicas de pequeñas dimensiones están formadas por materiales relativamente permeables, como calizas, arenas, lavas basálticas, calizas arrecifales, etc., de modo que el agua dulce subterránea que contienen está en forma de un lentejón sobre agua salada (Figura 19). El agua dulce es vertida hacia el mar al mismo tiempo que es reemplazada por la infiltración de la lluvia.

Si se trata de una isla circular de radio R y la recarga de agua dulce es W, medida en altura de agua por unidad de tiempo, puede establecerse que el flujo Q en una circunferencia de radio $r \leq R$ vale:

$$Q = 2\pi rk \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) h \frac{dh}{dr}$$

en la que h es el nivel del agua dulce sobre el nivel del mar y $(1 + 1/\beta)h$ es el espesor total de agua dulce, en la circunferencia de radio r.

El aporte de agua dentro de esta circunferencia vale:

$$Q = \pi r^2 W$$

Igualando ambas fórmulas se obtiene:

$$\frac{Wr dr}{2K(1 + 1/\beta)} = h dh$$

de donde:

$$h^2 = \frac{W}{2K(1+1/\beta)}(R^2 - r^2) \dots \dots \dots (4.17)$$

pues $h = 0$ para $r = R$

Si se trata de una isla alargada de anchura 2L es

$$h^2 = \frac{W}{K(1+1/\beta)}(L^2 + x^2) \dots \dots \dots (4.18)$$

siendo x la distancia desde el eje de la isla.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

La resolución exacta del flujo hacia el mar para el caso de una isla alargada fué estudiada por Henry. El resultado es que la fórmula anterior es suficientemente aproximada si la recarga no es extraordinariamente intensa. Sólo si el ancho de la isla es grande, se tienen errores apreciables en la determinación de la interfaz cerca de la costa.

En el caso de existir dos niveles permeables efectuados por el agua dulce, de permeabilidad y espesor k_1 y b_1 el superior y K_2 y b_2 el inferior, se tiene:

$$h^2 (k_1 + k_2 \frac{1}{\beta}) + h (b_1 k_1 - b_2 k_2) = (L^2 - x^2)$$

lo que equivale a considerar una permeabilidad media

$$\bar{K} = \frac{K_1 (b_1 + h) + K_2 (-b_1 + h/\beta)}{h(1+1/\beta)}$$

En una isla de cualesquiera dimensiones puede establecerse el balance de entradas y salidas en prismas verticales obteniéndose la ecuación:

$$K (1 + 1/\beta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -2W \dots \dots \dots (4.19)$$

que permite resolver el problema numéricamente, suponiendo que las aproximaciones de Dupuit-Forchheimer y fórmula de Ghyben-Herzberg son válidas.

CAPITULO V

"CONTROL DE LA INTRUSION SALINA"

V.1. INTRODUCCION

Una vez que se han planteado las causas que originan la intrusión salina, el modo de estudiar el comportamiento de la interfase considerando condiciones estáticas y dinámicas, es el momento de sugerir posibles métodos para evitar, y en su caso controlar la intrusión salina.

En este capítulo se analizarán principalmente seis métodos de control de la intrusión salina, los cuales son: disminución de bombeo, reubicación de los centros de bombeo, recarga artificial, establecimiento de barreras físicas, barrera hidráulica de inyección y depresión de bombeo. Cada uno de estos métodos presentan ventajas y desventajas en su aplicación, inclusive algunos tienen que combinarse con otro, para que se obtengan resultados satisfactorios. La principal desventaja en términos generales de los seis métodos, como se podrá ver cuando se analice cada uno de ellos, es su alto costo.

Las obras de ingeniería que se llevan a cabo en las costas también repercuten en el problema de la intrusión salina; es por eso que cualquier obra que pretenda desarrollarse en estas zonas, deberá ser objeto de un amplio estudio antes de concretar el proyecto.

V.2. PRINCIPIOS GENERALES SOBRE LA EXPLOTACION DE ACUIFEROS COSTEROS.

2.1.- Reducción del flujo al mar

En acuíferos costeros sin explotación, el agua dulce se vierte al mar, ya sea a través de cursos de agua superficiales, o bien subterráneos. Esta fuga de agua subterránea mantiene una cierta posición de la interfase agua dulce-agua salada, pero se pierde sin más utilidad al mar. Si se ubican bombeos para recuperar esta agua, se disminuye el flujo y por lo tanto se altera el equilibrio con el agua del mar; ello ocasiona una mayor penetración de la cuña marina. Si se quiere mantener controlada la intrusión marina, es necesario dejarse un cierto flujo de agua dulce al mar.

Al aumentar la explotación de un acuífero costero trae consigo una intrusión, la cual puede permitirse hasta cierto límite que puede venir fijado por las afecciones que se crean a campos de bombeo, cuando el agua salada se extiende por debajo de los mismos (ascensión de la sal). Estableciendo captaciones adecuadas, de carácter hipodérmico (poco penetrantes), puede permitirse una profunda intrusión marina a cambio de recuperar la mayoría del flujo al mar, pero es una situación costosa por necesitar un cambio en el sistema de captaciones y de conducciones. El flujo de agua dulce al mar ayuda a mantener un cierto balance de sales en el acuífero. Si como consecuencia de una reducción de flujo de agua al mar existe una recirculación del agua dulce que deje las sales en el terreno, como en regadíos con agua subterránea, se tiene un cierto incremento de la salinidad del agua dulce de origen diferente a la contaminación por el agua del mar.

2.2.- Utilización de la "reserva de una vez"

Si como consecuencia de una extracción de un caudal Q , con la consecuente reducción en la misma cantidad del flujo al mar, la interfase avanza tierra adentro (Figura 20) se produce una disminución en las reservas del acuífero cuyo volumen es igual al existente entre la posición inicial y final de equilibrio de la interfase. Esta es la llamada "reserva de una vez", porque equivale a una reducción de las reservas iniciales del acuífero.

La forma de recuperar parte de la reserva de una vez es mediante la construcción de captaciones temporales cerca de la costa. También puede hacerse incrementando el bombeo lejos de la costa. Estos incrementos de bombeo deben cesar cuando se haya extraído un exceso de agua equivalente a la parte recuperable de esa reserva de una vez. En todo caso debe controlarse cuidadosamente el avance de la interfase con una red adecuada de piezómetros de observación.

El movimiento de la interfase tierra adentro crea una notable dispersión, la cual junto con el menor arrastre de sales a lo largo de la interfase por su mayor longitud y menor flujo de agua, origina una contaminación salina de parte de la reserva de una vez.

2.3.- Captación en la costa del agua fluyente al mar

El agua necesaria para mantener una cierta posición de la interfase, puede captarse cerca de la costa, una vez que ha cumplido su misión.

Como estas captaciones deben establecerse sobre agua salada, han de planearse con mucho cuidado para evitar la subida de la sal por formación de conos. En general se trata de colectores (drenes) o



Figura 20

Efecto de la explotación de un acuífero costero en la posición de la interfaz; 1 y 1' nivel piezométrico e interfase inicial; 2 y 2' nivel piezométrico e interfase final con una explotación Q. R es la reserva de una vez.

sistemas de pozos puntuales que producen un descenso pequeño y cuyo caudal unitario es también reducido.

Estos colectores, no sólo permiten aumentar el caudal de seguridad de un acuífero sin producir una apreciable intrusión marina, sino que también pueden servir para forzar la utilización de la reserva de una vez extrayendo con ellos gran cantidad de agua en los primeros tiempos.

En realidad, el colector eleva la posición de la interfase cerca de la costa, pero no su penetración en el acuífero, que es el objetivo deseado (Figura 21).

V.3. EFECTOS DE LA EXPLOTACION EN ACUIFEROS SEMICONFINADOS

La explotación de acuíferos costeros semiconfinados puede originar una infiltración de aguas salinas a través de los niveles semipermeables, combinada con un posible desplazamiento del agua dulce directamente dentro del acuífero. El desplazamiento del agua salada por los niveles semiconfinantes es un fenómeno muy lento y permite explotar el acuífero con niveles por debajo del nivel del mar durante mucho tiempo sin que se produzca contaminación apreciable.

V.4. FORMACION DE CONOS DE AGUA SALADA DEBAJO DE LAS CAPTACIONES

Si en un acuífero existe un nivel de agua salada inferior, al establecerse el bombeo en un pozo que penetre sólo la parte superior, se establece un flujo horizontal en todo el espesor del acuífero, pero la mayor densidad del agua salada dificulta la ascensión hacia el pozo; el agua salada alcanzará o no el pozo según sea el descenso producido y la penetración del mismo en el acuífero

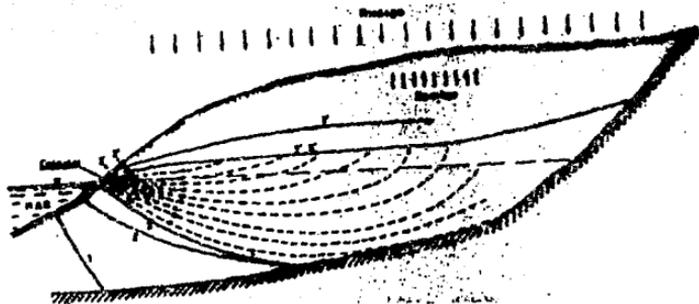


Figura 21

Colector para captar las aguas fluyentes al mar en la costa; 1 y 1' interfaz y nivel freático antes del establecimiento de bombes; 2 y 2' con el establecimiento de bombes; 3 y 3' con la instalación adicional del colector costero.

(Figura 22). El agua salobre de la zona de mezcla, al tener menor densidad que el agua salada, puede ascender más y contaminar el agua bombeada. Para un mismo pozo y para cada caudal de bombeo existe una salinización máxima.

El fenómeno de la formación del cono, requiere un cierto tiempo durante el cual sólo se obtiene agua dulce. Cuanto mayor sea el caudal de bombeo y la penetración del pozo, la salinización se produce con mayor rapidéz e intensidad.

Existe un ascenso crítico de modo que una vez alcanzado por la interfase, la subida de sal al pozo es brusca. Puede establecerse un caudal crítico tal que los bombes a caudal menor no producen subida de sal al pozo.

En general el aumento de salinidad en el agua bombeada a caudal constante es aproximadamente logarítmico de modo que representándose la salinidad en función del logarítmico del tiempo debe obtenerse una recta.

Si el agua salada existente debajo de los pozos es la correspondiente a una cuña de agua salada costera, el movimiento de la zona de mezcla limita su crecimiento en espesor. Sin embargo, si el bombeo provoca una elevación de la interfase, tal que debajo de la captación se produce un punto de gradiente horizontal nulo de la interfase o punto de estancamiento (Figura 23), el arrastre de sales hacia el mar no puede continuar, se acumulan en ese punto y se produce con facilidad la subida del agua salada. Para no tener contaminación salina no basta limitar el descenso, manteniendo siempre un nivel por encima del nivel del mar; si se producen puntos

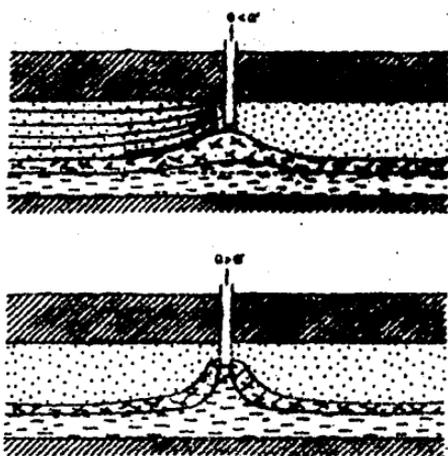


Figura 22

Formación de conos de agua salada y salobre debajo de un pozo parcialmente penetrante en un acuífero con agua salada en la parte superior. Q^* = caudal crítico.

de estancamiento un gradiente de agua salada hacia el pozo el agua mezcla al ser menos densa que el agua del mar y puede alcanzar la captación. El descenso y penetración de la captación puede ser superior o inferior al nivel del mar para no tener contaminación importante. Depende del flujo de agua dulce y de las condiciones de la interfase y de forma muy importante de la estratificación del terreno. Si la permeabilidad vertical es notablemente menor que la horizontal, la subida de sal se ve dificultada y aún más si existen intercalaciones y lentejones de materiales muy poco permeables.

Cuando un pozo se ha salinizado por ascenso de sal y se le deja en reposo un tiempo, después puede volver a extraer agua dulce. En parte el cono de agua salada se ha hundido, pero una buena parte de él, en especial la formada por agua salobre, de menor densidad, se desplaza horizontalmente de acuerdo con el flujo del agua subterránea. Este cono puede llegar a interferir con otros pozos situados en la dirección del flujo.

El ascenso del agua salada puede evitarse disminuyendo su potencial. Ello puede hacerse explotando dos pozos próximos, uno ranurado en el agua dulce y otro en el agua salada o bien colocando dos bombas en el mismo pozo, la inferior, extrayendo el agua salobre o salada que penetra por el fondo. Sin embargo, el sistema es caro de instalación y precisa de un sistema en general muy costoso para evacuar al mar el agua salada o salobre sin que se infiltre o perjudique otras actividades. Además, el control y regularización de los dos bombeos es delicado, pues un sobrebombeo en la bomba inferior puede originar un desplifarro de agua dulce y un subbombeo, no evitaria la contaminación del agua dulce extraída.

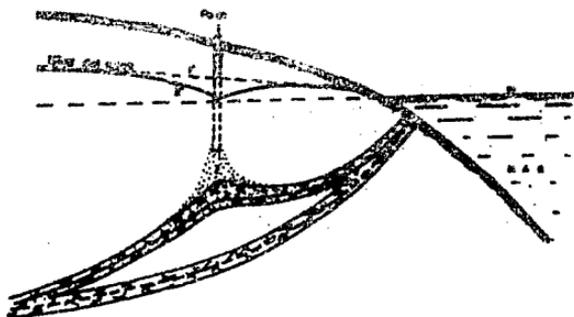


Figura 23

Súbita de sal debajo de un pozo por creación de un punto de estancamiento; 1: posición inicial de la interfaz y su zona de mezcla; 1'; nivel del agua subterránea inicial 2: posición de la interfaz y su zona de mezcla después de iniciado un bombeo cuyo nivel de agua subterránea es 2'; 3: formación del cono salino como consecuencia del estancamiento.

El caudal de ambos bombeos debe establecerse de modo que la divisoria de las aguas que van a cada pozo esté por encima de la interfase entre el agua dulce y el agua salada. Ensayos realizados en captaciones someras (zanjas) indican que debe cumplirse:

$$\xi = \frac{Q_d}{Q_s} \leq \frac{b_d}{b_s}$$

en la que Q_d y Q_s , son los caudales de agua dulce y agua salada y b_d y b_s los espesores iniciales de agua dulce y agua salada. La posición de la divisoria, en la vertical de los pozos para un cierto valor de ξ depende de la posición de las rejillas de los pozos, pero lejos de los mismos sólo depende de ξ . Se prescinde de las diferencias de densidad.

La posición de la divisoria en la vertical de ambos pozos puede obtenerse mediante la teoría de imágenes escribiendo que:

$$\frac{Q_d}{\lambda_1} \left(\frac{1}{z + b_1} - \frac{1}{z + a_1} - \frac{1}{z - b_1} + \frac{1}{z - a_1} \right) =$$

$$= \frac{Q_s}{\lambda_2} \left(\frac{1}{b - z + b_2} - \frac{1}{b - z + a_2} - \frac{1}{b - z - b_2} + \frac{1}{b - z - a_2} \right)$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{Q_d}{Q_s} \left(\frac{1}{z + b_1} + \frac{1}{z + a_1} - \frac{1}{z - b_1} - \frac{1}{z - a_1} \right) =$$

$$= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{1}{b - z + b_2} - \frac{1}{b - z + a_2} - \frac{1}{b - z - b_2} + \frac{1}{b - z - a_2} \right)$$

en la que:

b : espesor del acuífero

a_1 y b_1 : distancia de los extremos superior e interior del filtro de agua dulce al nivel freático inicial.

a_2 y b_2 : distancia de los extremos interior y superior del filtro de agua salada a la base del acuífero.

λ_1 y λ_2 : longitudes de las rejillas de agua dulce y agua salada.

z : profundidad de la divisoria bajo el nivel freático inicial.

V.5 METODOS DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA INTRUSIÓN SALINA.

Existen varios métodos para prevenir o controlar la intrusión marina, cada uno de ellos con sus características funcionales y apropiado para unas circunstancias determinadas.

5.1.- Disminución del bombeo

Si la explotación es superior a la recarga o bien, aunque no lo sea, produce una penetración indeseable de la cuña salina, puede procederse a reducirse el bombeo hasta que la posición de equilibrio sea la deseada.

La aplicación de éste procedimiento tiene como inconvenientes:

a) Se pierde al mar agua dulce para mantener la posición deseada de la interfase. Puede recuperarse parte de esa agua con colectoras costeros, pero es complicado y costoso de realizar y no siempre es efectivo.

b) Si la interfase habrá rebasado por sobre bombeo el límite máximo de penetración admisible, el retroceso es tan lento como el avance, aunque se puede forzar con una sobre reducción inicial de las extracciones con recarga artificial o estableciendo un bombeo de agua salada.

c) La reducción de bombeo supone encontrar un nuevo abastecimiento a costo accesible.

5.2.- Reubicación de los centros de bombeo.

Si la intrusión es debida a una excesiva concentración de los bombeos en unos pocos lugares próximos a la costa o a la explotación de pozos sobre la cuña salina, sin que la penetración media sea excesiva, se puede proceder a reubicar las captaciones o distribuir las mejor.

El procedimiento tiene como inconvenientes:

- a) El paro de unas captaciones para construir y operar otras nuevas es caro.
- b) La reubicación puede suponer establecer nuevas conducciones.
- c) No se consigue reducir el vertido de agua dulce al mar.

5.3.- Recarga artificial

Suponiendo una adecuada distribución de las captaciones puede compensarse el sobrebombeo mediante recarga artificial en los lugares apropiados.

El procedimiento tiene como inconvenientes:

- a) Es preciso disponer de agua barata para recarga
- b) El establecimiento de la recarga es caro y no siempre es posible realizarla de la forma deseada
- c) No se consigue reducir el vertido de agua dulce al mar
- d) Al tener mayores niveles de agua, puede reducirse la capacidad de almacenamiento del acuífero con respecto a aguas de tormenta o avenidas, ya que estas pueden ser rechazadas o descargadas rápidamente a cauces superficiales.

Si se dispone de agua de recarga, y esta es de calidad adecuada y se recibe un caudal regulado, en general es más fácil y barato distribuirla directamente y reducir el bombeo. Es recomendable controlar la intrusión salina por recarga sólo cuando el agua disponible debe ser tratada, y este tratamiento se puede efectuar por infiltración en el terreno, o cuando el agua disponible debe ser regulada y esta regulación se puede conseguir económicamente por almacenamiento en el terreno.

El agua de recarga puede proceder:

Retención de aguas de avenidas en ríos y torrentes. Se precisa de un sistema que permita infiltrarlas rápidamente (recarga por extensión).

Aguas procedentes del tratamiento de residuales (reutilización), si estas reúnen una calidad adecuada y el tratamiento que hay que darles es económico.

La conducción del agua desde los lugares de recarga a los puntos de bombeo puede hacerse a través del propio acuífero si éste es suficientemente transmisor. En caso contrario la recarga debe hacerse cerca de los lugares de bombeo y con un régimen similar.

5.4.- Establecimiento de barreras físicas

Si en la costa se establece una barrera impermeable, que afecta a los acuíferos, se aíslan éstos del mar y por lo tanto no se produce la intrusión marina, pudiéndose utilizar al máximo los recursos.

Los inconvenientes principales son:

- a) los costos de construcción son muy elevados.
- b) Es difícil que sean totalmente efectivas.

- c) Su mantenimiento en general es barato, pero puede hacerse caro en zonas en que hay movimientos del terreno o sismos frecuentes.
- d) Sólo pueden establecerse en acuíferos de escasa profundidad y escasa potencia.

Estas barreras pueden consistir en el establecimiento de tablestacas, relleno de zanjas con arcillas, cemento o asfalto o inyecciones a presión de cemento, bentonita, sustancias bituminosas (asfalto) u otras sustancias químicas (gel de sílice, acrilato cálcico) a través de sondeos, colocados muy compactados y a lo largo de la costa. También puede inyectarse aire a presión.

El aire inyectado en el terreno a lo largo de una línea de pozos reduce la permeabilidad del medio para la circulación del agua. El aire puede tomarse tal cual se encuentra en la atmósfera eliminándose así la necesidad de conducciones, y su manejo es barato. El aire inyectado se difunde y ayuda a mantener la continuidad de la barrera.

El establecimiento de una barrera física permite una intensa utilización del acuífero como embalse subterráneo.

5.5.- 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 dulce preciso para evitar el flujo de agua salada hacia el interior, se tiene un efectivo control de la intrusión (Figura 24.)

Como el potencial de agua dulce en agua salada crece con la

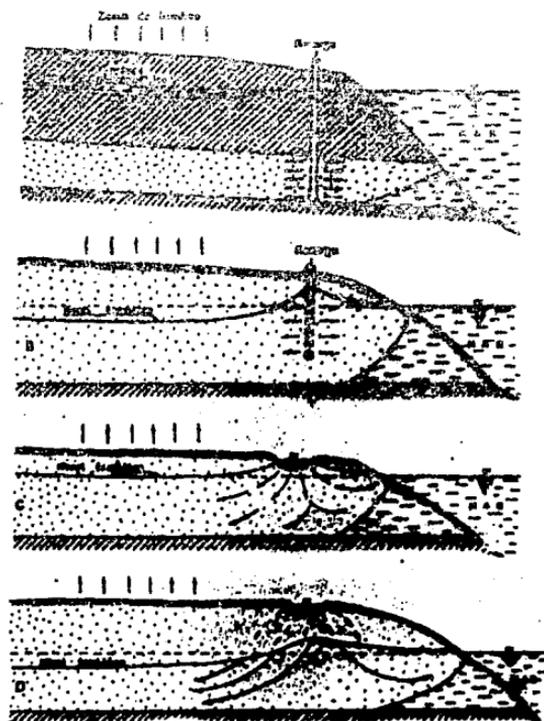


Figura 24
 Diferentes tipos de barreras hidráulicas. A) Con pozos en un acuífero cautivo. B) Con pozos en un acuífero libre. C) Con canales o zanjas en un acuífero libre. D) Con campos de extensión en un acuífero libre.

profundidad, cuanto más profundo sea el acuífero, mayor tendrá que ser la elevación piezométrica que deberá crearse.

En acuíferos libres, la barrera puede crearse mediante un canal, zanja o campos de recarga paralelos a la costa, o bien; mediante una línea de pozos próximos. En acuíferos cautivos cuyo techo sea profundo, esta barrera debe establecerse, mediante una línea de pozos próximos. La separación entre pozos depende de su costo de construcción y mantenimiento y el mayor consumo de agua necesario para mantener un nivel mínimo entre ellos que es tanto mayor cuanto más separados están. Es frecuente que el nivel del agua en los pozos sea superior al del terreno, en cuyo caso se precisa de una buena cementación exterior a fin de evitar que el agua fluya entre el tubo y el terreno. Si tales fugas existiesen, no sólo no sería efectiva la barrera, sino que se pueden producir daños a estructuras, edificios, etc., por anegación de terrenos.

Los principales inconvenientes de este método son:

- a) Si la barrera precisa de pozos, su costo de construcción es elevado.
- b) El agua de inyección es cara, en especial si debe introducirse por pozos (agua tratada), y es preciso disponer de ella en cantidad suficiente.
- c) El mantenimiento de los pozos es caro y complicado. El problema es menor con canales y zanjas y en campos de extensión.
- d) Puede ser muy difícil o imposible establecer campos de extensión o canales en una zona poblada, por no disponer de espacio, por ser los terrenos muy caros o por no ser

estáticamente deseable. El establecimiento de pozos presenta menos dificultades, sin embargo la evacuación de las aguas extraídas en las limpiezas periódicas necesarias para mantener la capacidad de inyección puede ser un problema molesto.

- e) El costo de conducciones, en caso de inyección con pozos, es en general muy elevado.

La barrera hidráulica tiene como ventajas que no precisa limitación de bombeo y se puede utilizar la máxima capacidad de almacenamiento del acuífero para aguas de tormenta o avenidas. El flujo de agua dulce al mar es nulo, excepto una pequeña parte del agua inyectada cuya recuperación puede no tener interés si es de mala calidad.

5.6. - 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, tal que intercepte todo el flujo de agua salada hacia el interior.

Se precisa que la depresión producida en cualquier punto sea inferior a los niveles piezométricos del agua dulce (Figura 25). La penetración masiva de agua salada queda limitada por la línea de pozos de bombeo pero detrás de ella aún existe una cuña de agua salada cuya penetración tiene que ser limitada, permitiendo un cierto flujo de agua dulce hacia la depresión de bombeo.

Los inconvenientes principales son:

- a) La barrera es cara por su construcción y mantenimiento (energía de bombeo).

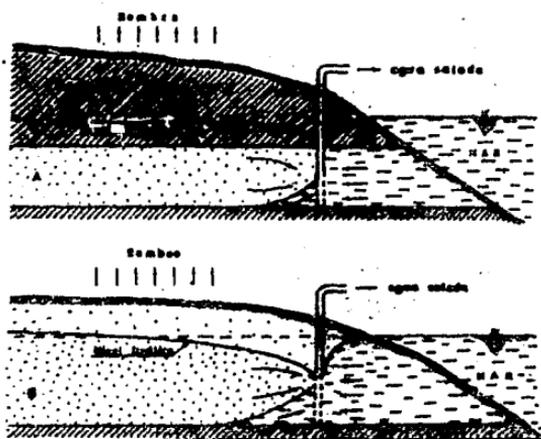


Figura 25

Establecimiento de una depresión de bombeo.
 A) En acuífero cautivo. B) En acuífero libre.

- b) El agua salada bombeada debe enviarse al mar sin que produzca contaminaciones. El costo de tuberías o canales es elevado.
- c) Se pierde agua dulce al mar a través de los pozos de bombeo.
- d) Al tener que estar los pozos de bombeo de agua salada a cierta distancia de la costa, se pierde volumen útil de acuífero al ser grande la proporción del mismo invadida por el agua salada, en especial en zonas muy llanas.
- e) Se precisa reducir extracciones si se quiere mantener estable la cuña salina detrás de la barrera; por lo menos la extracción de agua dulce debe ser inferior a la recarga.

La instalación de depresiones de bombeo puede estar justificada en casos en que se pretenda reducir una intrusión marina ya existente (tomar agua salada de la cuña), pero pasado cierto tiempo debe usarse otro método de control. También puede estar justificado su uso cuando sea necesario mantener un flujo de agua dulce al mar para mantener el balance de sales en el agua dulce

V.6. ALTERNATIVAS DE GESTION DE ACUIFEROS COSTEROS.

La recuperación del agua vertida al mar en los acuíferos costeros es importante. Las posibles alternativas de gestión son:

- a) Incrementar el bombeo permitiendo una mayor penetración de la cuña salina, reubicando si es preciso captaciones. No se reduce completamente el flujo de agua dulce al mar, aunque pueden colocarse colectores costeros.

- b) Establecer barreras de inyección costeras con agua propia (de reutilización) o bien con agua importada, una pequeña parte de la cual se perderá en el mar.
- c) Establecer depresiones de bombeo, combinadas o no con barreras de inyección, dejando fluir cierta cantidad de agua dulce al mar o a los pozos de extracción de agua salada.
- d) Establecer barreras físicas, aunque este procedimiento aparece como técnica o económicamente imposible en muchos casos.
- d) Recarga artificial de agua importada o de aguas de reutilización con diferentes esquemas de recarga y bombeo.
- f) Permitir una profunda intrusión marina, extrayendo el agua dulce con numerosas captaciones de escasa profundidad y pequeño caudal. Se consigue reducir mucho el vertido de agua dulce al mar y es posible, con un esquema adecuado de explotación minimizar gran parte del almacenamiento de agua dulce. Se pierde gran capacidad de regulación y es preciso establecer embalses de superficie; el acuífero no soporta sobreexplotaciones temporales en épocas secas o especiales sin que se produzcan salinizaciones.
- g) Combinaciones de los esquemas anteriores

En todo análisis de alternativas de gestión es preciso no sólo considerar la cantidad de agua disponible, sino su calidad y su evolución con el tiempo ya que toda reducción de flujo al mar implica modificación del balance de sales, con incremento de la

salinidad. Su consideración es especialmente importante cuando existe recarga con aguas residuales o excedentes de riego, o es de esperar una gran dispersión en la zona de interfase.

V.7.- EFECTOS DE OBRAS DE INGENIERIA EN LAS RELACIONES AGUA DULCE-AGUA SALADA EN REGIONES COSTERAS.

Las obras de ingeniería que requieren extracciones de agua mediante pozos o drenes temporales o permanentes, alteran el equilibrio de la interfase, provocando una mayor penetración o la formación de conos salinos. Tales son los drenajes para excavaciones, las obras de saneamiento de zonas bajas, la excavación de zanjas profundas para la evacuación de aguas de tormentas o el drenaje de túneles, galerías de servicio o sótanos. El acondicionamiento de las desembocaduras de los ríos y de canales para navegación también provocan efectos similares.

Las obras de ingeniería o trabajos que implican una disminución de la recarga, tales como pavimentaciones, establecimiento de embalses de superficie, etc, disminuyen el flujo de agua al mar y por lo tanto permiten una mayor penetración del agua salada.

En los procesos de salinización de acuíferos cautivos la propia construcción del pozo, puede jugar un papel importante si por un defecto de acabado o por no tomarse las debidas precauciones, el agua salada de otros acuíferos a mayor potencial permanente o durante el bombeo, pasa entre la pared del pozo y el tubo o penetra al pozo a través de poros o puntos de corrosión.

7.1.- Efecto de las extracciones sobre el espesor de la zona de mezcla.

Ya se ha comentado que las extracciones de un acuífero costero

aumentan el espesor de la zona de transición. Las causas son:

- la mayor penetración del agua salada crea un contacto más largo con un menor caudal de agua dulce de lavado;

- el desplazamiento de la interfase desde la posición inicial a la final produce una fuerte dispersión;

- las variaciones en el régimen de bombeo producen variaciones en la posición de la interfase que aceleran el proceso de dispersión;

- las captaciones situadas sobre la cuña de agua salada producen ascensos salinos que ayudan a la dispersión.

Frecuentemente los acuíferos tienen heterogeneidades y el avance de la interfase no es regular, siendo más rápido por los niveles más permeables y más explotados, pudiendo dejar niveles intercalados o áreas que conservan agua dulce.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La importancia que se le debe de dar al estudio de la intrusión salina en México es indiscutible, como se menciona en la introducción del trabajo. México cuenta con una gran longitud de costa, pues más de la mitad de los estados integrantes del país colindan con agua de mar y más aún, si se agrega que muchos de estos lugares son en la actualidad grandes centros industriales y agrícolas que requieren grandes volúmenes de agua y en muchos de estos lugares las aguas superficiales son muy escasas o inexistentes, por tal razón el agua subterránea cobra una importancia muy grande.

Los acuíferos costeros, además de presentar los problemas de aquellos acuíferos que no son costeros, por ejemplo: la contaminación ocasionada por el hombre, y la sobreexplotación, presentan además el gravísimo problema de la intrusión salina, es decir, el avance del agua salada hacia el acuífero. Este daño al medio poroso es irreversible, pues un acuífero invadido por agua de mar es prácticamente imposible restablecer sus condiciones originales para que vuelva a ser un embalse subterráneo apto para almacenar agua dulce.

Originalmente los acuíferos costeros que no han sido irrumpidos por el hombre ya presentan intrusión salina; nacen con este problema, pero como no son explotados, existe un equilibrio hidráulico entre el agua dulce y el agua salada, que permite que la zona de mezcla además de ser de poco espesor se mantenga prácticamente estática. Pero una vez que se empieza a extraer agua del acuífero, este equilibrio desaparece, las condiciones

hidráulicas cambian, la zona de mezcla aumenta de espesor, y avanza, por tal razón es muy recomendable tener en observación y hacer continuos estudios de la posición de la interface desde el momento en que se perfora el primer pozo.

Además de los estudios y muestreos del agua subterránea, otra herramienta indispensable para el control de la intrusión salina es la modelación matemática; por medio de esta técnica, haciendo uso del avance tecnológico que en computación se tiene y utilizando los modelos matemáticos que investigadores interesados en el tema han propuesto, en tiempos muy cortos se puede simular lo que sucede en el subsuelo.

Ghyben y Herzberg fueron los primeros investigadores que realizaron un estudio formal del problema de la intrusión salina; su teoría, aunque sencilla y limitada, constituyó la base para que futuros investigadores como Hubbert y Luczynski desarrollaran teorías más completas y precisas.

Es indiscutible que en un acuífero sometido a explotación existe una zona de mezcla en continuo movimiento; el agua salada desplaza al agua dulce; controlar este avance es el gran reto que se tiene. En este trabajo se mencionan seis métodos para tal fin, pero antes de aplicar los métodos se debe ya tener la certeza de que se van a obtener resultados satisfactorios, dado que estos trabajos requieren una fuerte inversión monetaria y sería lamentable que por falta de conocimiento del comportamiento del acuífero se derrocharan recursos y que a fin de cuentas la intrusión salina continuara.

El muestreo del agua subterránea es fundamental en el problema de la intrusión. El muestreo con botellas lastradas es muy buena

opción, pues entre otras ventajas es económico y se pueden llenar a la profundidad deseada.

Se considera necesario que al momento de empezar a explotar un acuífero costero se debe muestrear, efectuar registros de salinidad y medir niveles con frecuencia; estos estudios deberán ser más continuos en acuíferos sometidos a una explotación intensa y fuertes variaciones piezométricas.

De la Ley de Ghyben - Herzberg se concluyó que $1/\beta$ varía entre 50 y 33, siendo el valor más frecuente 40, considerando que el peso específico del agua salada varía entre 1.020 y 1.030 g/cm^3 . Cabe aclarar que este rango no es único; por tanto no se debe tomar como definitivo, pues una pequeña variación en la densidad del agua salada que es común por una mayor o menor concentración de sólidos disueltos, el valor de $1/\beta$ se altera notablemente.

Es recomendable utilizar la Ley de Ghyben - Herzberg para estudios preliminares y en aquellos acuíferos en que la explotación no es intensa, considerando la corrección que de ésta hace Hubbert.

Para estudios más precisos y detallados se recomienda utilizar los modelos matemáticos de Hubbert y Luczynski, pues son relaciones más generales que consideran el movimiento en la zona de mezcla; aunque cabe comentar que para la aplicación de estos modelos se requiere mucha información y esta debe ser la más correcta posible.

Finalmente se mencionarán algunos casos en los cuales se recomienda utilizar alguno de los seis métodos de control de la intrusión marina analizados en este trabajo.

Cuando el avance de la interfase presente una interdigitación muy notoria en ciertos puntos, esto se debe a que en un área muy pequeña del acuífero están concentrados muchos pozos, en los cuales

se extraen gastos de agua muy elevados; para estos casos se recomienda reubicar los centros de bombeo.

Si al estudiar la posición de la interfase se detecta un avance muy acelerado de ésta y es posible conseguir agua de manera económica de otras fuentes, se recomienda disminuir el bombeo; es decir, disminuir el gasto de extracción de cada pozo.

El establecimiento de barreras físicas es el método más efectivo, pero desgraciadamente sólo se recomienda en acuíferos de escasa profundidad y escasa potencia, y en aquellas zonas donde no existan movimientos del terreno o sismos frecuentes.

Se recomienda la instalación de depresiones de bombeo cuando se pretenda reducir una intrusión marina ya existente (tomar agua salada de la cuña). También se recomienda cuando sea necesario mantener un flujo de agua dulce al mar para mantener el balance de sales en el agua dulce.

Tanto el método de recarga artificial como el de construcción de barreras hidráulicas de inyección se recomiendan en aquellos casos en los cuales no es posible ni disminuir el gasto de los pozos ni reubicarlos. Estos métodos son muy costosos tanto en el aspecto de construcción como de mantenimiento; por eso sólo se recomiendan en casos en los cuales no exista la alternativa de aplicar alguno de los otros métodos.

Como un comentario final, quiero hacer notar que este trabajo no tiene relación con la ingeniería petrolera; más es una muestra de que el ingeniero petrolero tiene la preparación suficiente para entender y resolver los problemas relacionados con el agua subterránea. Esto hace que el ingeniero petrolero tenga otra alternativa de desarrollo profesional.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Custodio, Emilio y Llamas, Manuel Ramón,
"Hidrología subterránea" (volúmenes I y II)
Ed. Omega, S.A. Barcelona 1976.
- 2.- Davis y De Wiest
"Hidrogeología"
Ed. Ariel, 1976.
- 3.- R. Allan Freeze, John A. Cherry
"Ground Water"
Ed. by Prentice - Hall International, Inc. London 1979.
- 4.- Agullar, Alfaro, Castillo, Hernández, Pérez
"Algunos conceptos fundamentales de la geohidrología"
Tesis profesional, F.I., México, D.F. 1991.
- 5.- Castany, G.
"Tratado práctico de las aguas subterráneas"
Ed. Omega Barcelona 1971.
- 6.- Castany, G.
"Prospección y explotación de aguas subterráneas"
Ed. Omega, Barcelona 1975.

7.- Jaime A. Tinajero González.

"Aspectos Fundamentales en el Estudio del Agua Subterránea"
(Geohidrología)

Ed. Departamento de Ingeniería Hidráulica, UNAM 1985.

8.- Notas de clase: Exploración y Evaluación de Aguas Subterráneas.
Profesor: M. C. Rubén Martínez Guerra.

9.- Dirección General de Administración y Control de Sistemas
Hidrológicos

"Sinopsis Geohidrológica por Estado"

Ed. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, 1987.

10.- División de Educación Continua

"Exploración, Cuantificación y Aprovechamiento de los Recursos
Hidráulicos Subterráneos"

Ed. Facultad de Ingeniería, UNAM. 1985.

11.- División de Educación Continua

"Hidrología Aplicada a la Ingeniería"

Ed. Facultad de Ingeniería, UNAM 1985.