

Bibliography

**PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL MANEJO DE
ACUIFEROS COSTEROS: EL PROBLEMA DE LA
INTRUSION SALINA**

JUAN MAURICIO BEDOYA SOTO

Trabajo dirigido de grado presentado como
requisito parcial para optar al título de
Master en Recursos Hidráulicos

Director:

Maria Victoria Vélez Otalvaro, MsC.

Codirector:

Jaime Ignacio Vélez, Ph.D

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín

2009

Índice General

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Justificación | 1 |
| 1.2. Objetivos e Hipótesis | 2 |
| 1.2.1. Objetivo General | 2 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 2 |
| 1.2.3. Hipótesis | 2 |
| 2. Problemáticas en Acuíferos Costeros | 3 |
| 2.1. Problematicas relacionadas con el uso del agua | 5 |
| 2.1.1. Salinización de acuíferos | 6 |
| 2.1.2. Sobreexplotación del agua subterránea en Zonas Costeras . . . | 9 |
| 2.2. Problematicas relacionadas con el uso del suelo | 15 |
| 2.2.1. Cambios de uso del suelo que implican disminución ó aumento de la magnitud de la recarga al acuífero | 15 |
| 2.2.2. Urbanización | 16 |
| 2.2.3. Actividades contaminantes sobre la zona de recarga del acuífero | 17 |
| 2.3. Problematicas relacionadas con el Cambio Climático | 19 |
| 3. Acuíferos Costeros | 25 |
| 3.1. Caracterización de acuíferos costeros | 25 |
| 3.2. Características Geomorfológicas: | 26 |
| 3.2.1. Deltas: | 27 |
| 3.2.2. Llanuras Costeras: | 28 |
| 3.2.3. Campos de Dunas: | 29 |
| 3.2.4. Cordones Litorales: | 29 |
| 3.2.5. Manglares: | 29 |
| 3.2.6. Areas de marisma mareal o fluvial: | 29 |
| 3.3. Características Geológicas: | 30 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.3.1. | Medios predominantemente porosos | 31 |
| 3.3.2. | Medios cársticos | 33 |
| 3.4. | Características Hidrogeológicas: | 35 |
| 3.4.1. | Descarga Subterránea | 35 |
| 3.4.2. | Aspectos generales de la Interacción Acuífero-Mar | 37 |
| 3.4.3. | Modelos Conceptuales de Intrusión Salina en Acuíferos Costeros | 41 |
| 3.5. | Aspectos Bióticos | 44 |
| 4. | Modelos e intrusión salina | 47 |
| 4.1. | Modelos basados en la Hidroestática | 47 |
| 4.1.1. | Acuífero libre recargado uniformemente por la lluvia | 52 |
| 4.1.2. | Acuíferos confinados | 54 |
| 4.1.3. | Acuíferos semiconfinados | 55 |
| 4.2. | Modelos basados en la Hidrodinámica | 56 |
| 4.2.1. | La ley de Darcy | 57 |
| 4.2.2. | Balance de Masa del fluido: Ecuación de flujo | 59 |
| 4.2.3. | Balance de Masa del soluto: Ecuación de Transporte | 60 |
| 4.2.4. | El problema de Henry | 61 |
| 4.2.5. | Métodos Numéricos usados en modelos hidrogeológicos | 64 |
| 4.2.6. | Modelos Numéricos representativos | 66 |
| 4.2.7. | Hidrogeoquímica relacionada con la cuña de agua salina en el acuífero | 70 |
| 4.3. | Modelos y Cambio Climático | 71 |
| 5. | Manejo de Acuíferos Costeros | 76 |
| 5.1. | Pasos Metodológicos para la formulación de un Plan de Manejo de Acuíferos Costeros | 82 |
| 5.1.1. | FASE DIAGNOSTICO: [Recolección y análisis de información, Diseño y Calibración de Modelo Numérico del acuífero Costero] | 82 |
| 5.1.2. | FASE PROSPECTIVA: [Definición de escenarios Socioeconómicos y de Cambio Climático y simulación en el modelo calibrado] | 94 |
| 5.1.3. | FASE FORMULACIÓN: [Estrategias para llevar a cabo lo for- mulado] | 96 |
| 5.1.4. | FASE IMPLEMENTACIÓN: [Estrategias para llevar a cabo lo formulado] | 97 |
| 6. | Aplicación de modelos numéricos | 100 |
| 6.1. | Descripción del modelo hipotético | 101 |

| | |
|---|------------|
| 6.2. Datos y Escenarios Trabajados en el modelo hipotético | 101 |
| 6.3. Parámetros y sensibilidad analizada | 103 |
| 6.3.1. Variables de interes | 107 |
| 6.4. Resultados y Análisis | 108 |
| 6.4.1. Sensibilidad del modelo a la conductividad hidráulica y tamaño de celdas en la malla | 108 |
| 6.4.2. Análisis de longitud de penetración de cuña salina bajo los diferentes escenarios: Tasas de Bombeo | 109 |
| 6.4.3. Análisis de longitud de penetración de cuña salina bajo los diferentes escenarios: Distancia de Pozos a la línea de costa . . . | 111 |
| 6.4.4. Análisis de secciones perpendiculares a la línea de costa | 113 |
| 7. Conclusiones | 118 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Esquema de problemáticas asociadas a acuíferos costeros | 4 |
| 2.2. Posibles orígenes de la salinidad del agua subterránea y mecanismos de salinización de los acuífero | 7 |
| 2.3. Situaciones de sobreexplotación y distancia de pozos a línea de costa . | 14 |
| 2.4. Nivel promedio proyectado del mar según IPCC (2007) | 20 |
| 2.5. Series mensuales de temperatura del aire en tres estaciones del Caribe Colombiano | 21 |
| 2.6. Modelo Simplificado de las consecuencias del Aumento del Nivel del Mar en acuíferos costeros | 23 |
| 3.1. Esquema general de Cuenca Costera | 26 |
| 3.2. Subambientes conformados en un sistema de isla barrera | 27 |
| 3.3. Esquema de un sistema deltaico con dos acuíferos | 28 |
| 3.4. Tipos de porosidad formaciones acuíferas | 31 |
| 3.5. Características generales de un acuífero cárstico costero | 34 |
| 3.6. Esquema general de Acuífero Costero y líneas de flujo que vinculan zonas de recarga con zonas de descarga en el acuífero | 36 |
| 3.7. Esquema básico de cuña salina en un acuífero costero | 38 |
| 3.8. Relacion agua dulce-agua salada en un acuífero costero libre idealizado con recarga proveniente de zonas aledañas | 39 |
| 3.9. Esquema de cuña salina en un acuífero confinado | 40 |
| 3.10. Esquema de cuñas características de acuífero multicapa con borde costero. | 41 |
| 3.11. Modelo Simplificado de Acuífero Insular | 42 |
| 3.12. Esquema de cuña salina en el mecanismo de movimiento horizontal de la interfase | 43 |
| 3.13. Mecanismo de goteo descendente desde fuente superficial a la zona de captura del pozo | 44 |

| | |
|---|-----|
| 3.14. Mecanismo de cono ascendente hacia la zona de captura del pozo . . . | 45 |
| 4.1. Análisis de las principales hipótesis y fundamentos de las formulaciones para modelar la interface agua dulce-agua salada en un acuífero costero | 48 |
| 4.2. Análisis de cuña salina bajo formulación de Ghyben y Herzberg . . . | 49 |
| 4.3. Esquema de Hubbert para la modificación de la ecuación de Ghyben-Herzberg | 51 |
| 4.4. Esquema utilizado por Glover para el modelo de Intrusión Salina . . . | 52 |
| 4.5. Esquema de acuífero libre con recarga constante | 53 |
| 4.6. Esquema de variables para cálculo analítico de longitud de cuña salina en un acuífero confinado | 54 |
| 4.7. Esquema de calculo analítico en acuífero costero semiconfinado | 55 |
| 4.8. Esquema de celda de convección vertical en la intrusión salina | 56 |
| 4.9. Fuerzas en el medio poroso en equilibrio: Fuerzas de presión, gravitatorias y viscosas | 58 |
| 4.10. Comparación de resultado de líneas de isoconcentración de sal (del 10 % al 100 %) en un modelo con frontera de flujo másico con concentración de pendiente de la dirección del flujo y de concentración constante asociada al mar | 62 |
| 4.11. Esquema de Modelo Conceptual problema de Henry | 62 |
| 4.12. Isolíneas de concentración de sal en el problema de caso difusivo Henry | 64 |
| 4.13. Esquema de consecuencias de Intrusión Salina en acuíferos costeros . . | 74 |
| 5.1. Esquema de un Plan de ordenamiento de una cuenca bajo la metodología de los ciclos crecientes | 78 |
| 5.2. Esquema de manejo de acuíferos costeros | 80 |
| 5.3. Aspectos importantes en el manejo de acuíferos costeros | 81 |
| 5.4. Articulación de diferentes actividades involucradas a través del modelamiento numérico de un acuífero costero hacia una visión integrada de la gestión | 91 |
| 5.5. Factores involucrados a la hora de diseñar Escenarios en el acuífero costero que involucre el Cambio Climático | 95 |
| 6.1. Escenarios evaluados con el modelo planteado | 102 |
| 6.2. Esquema conceptual de modelo hipotético implementado | 102 |
| 6.3. Parámetros medidos en el modelo hipotético de acuífero costero . . . | 108 |

| | |
|---|-----|
| 6.4. Isoconcentración de sal (porcentaje respecto a $C_{Mar}=35000\text{mg/l}$ en una sección perpendicular a la línea de costa en $Y=500\text{m}$, para casos representativos en análisis de sensibilidad del parámetro conductividad, siendo A el caso para una $K=1\text{m/d}$, B el caso para una $K=10\text{m/d}$ y el caso C una $K=50\text{m/d}$. El pozo de explotación está a 1000m de distancia de la línea de costa y la tasa de bombeo es de $1400\text{m}^3/\text{d}$ en todos los casos. Se presentan los resultados en una Malla gruesa a la izquierda y en una Malla mas refinada a la derecha para cada caso . . | 109 |
| 6.5. Penetración de la línea de isoconcentración de sal del 50 % en el acuífero bajo diferentes tasas de bombeo para los tres escenarios planteados para el acuífero costero idealizado. El pozo se encuentra a 1000m de distancia de la línea de costa | 110 |
| 6.6. Penetración de la línea de isoconcentración de sal en el acuífero bajo diferentes tasas de bombeo para los tres escenarios planteados para el acuífero costero idealizado. | 112 |
| 6.7. Isoconcentración de sal para Escenario 1. Caso de pozo a 1000m de distancia de la línea de costa. y Caso de pozo a 2500m | 115 |
| 6.8. Isoconcentración de sal para Escenario 2. Caso de pozo a 1000m de distancia de la línea de costa. y Caso de pozo a 2500m | 116 |
| 6.9. Isoconcentración de sal para Escenario 3. Caso de pozo a 1000m de distancia de la línea de costa. y Caso de pozo a 2500m | 117 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----|
| 2.1. Problemáticas relacionadas con el agua subterránea en la zona costera | 5 |
| 2.2. Concentración promedio de principales constituyentes del agua marina | 7 |
| 2.3. Resumen de los principales efectos negativos de la sobreexplotación en acuíferos | 11 |
| 2.4. Resumen de los principales efectos negativos de la sobreexplotación en acuíferos | 12 |
| 2.5. Contaminadores comunes de agua subterránea y fuentes asociadas de contaminación | 18 |
| 2.6. Incremento esperado en la temperatura del aire por región (° C), relativo al período 1961-1990 | 22 |
| 2.7. Cambio esperado en la precipitación)(%) por región, relativo al período 1961-1990 | 22 |
| 4.1. Valor de parámetros de entrada para el problema de Henry (1964) . . | 63 |
| 5.1. Marco Conceptual para la Planificación Integrada de los Recursos Hídricos. Tomado de MAM (2002) | 83 |
| 6.1. Parámetros involucrados en la simulación de la cuña salina en modelo de acuífero costero implementado bajo el paquete SEAWAT en el software VISUAL MODFLOW 4.2 | 104 |
| 6.2. Parámetros de escenarios trabajados en el modelo implementado . . . | 106 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

El recurso hídrico en Zonas Costeras es un tópico implicado en Programas de Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC, [INVEMAR 2003a](#)), Planes de Gestión Ambiental Regional de las Corporaciones Ambientales (PGAR, decreto 048 de 2001), Planes de Ordenamiento Territorial (POT, Ley 388/97) de municipios costeros, y en Planes de Manejo de Cuenca (POMCA, Decreto 1729 del 2002). Se espera que el crecimiento económico y poblacional de zonas costeras y el cambio global, aumenten la presión sobre el recurso hídrico principalmente por el tipo actividades confrontadas en zonas costeras. Abastecer la demanda hídrica acarreará problemas vinculados con la disponibilidad del recurso en sus diferentes fuentes y por supuesto en el correcto uso de estas. Dado que el agua superficial esta siendo severamente contaminada y disminuida, las comunidades costeras proyectan y ejecutan la explotación del agua subterránea. Los acuíferos son las principales estructuras de almacenamiento y transporte de este importante recurso, tanto en zonas continentales como en zonas costeras, en estos ultimos ambiente se denominan Acuíferos Costeros por las interacciones acuífero-mar en la costa tanto a nivel superficial como subterráneo. Dado que los manejos inapropiados de los Acuíferos Costeros pueden tener efectos irreversibles, a tal punto de causar el deterioro total del recurso, surge la necesidad de los diferentes actores involucrados (Usuarios, autoridades, gremios económicos y técnicos)de metodologías y estrategias para el manejo del agua subterranea de una manera coherente con el ambiente físico y socioeconómico particular. Las herramientas de modelación para abordar cuantitativamente las cantidades de agua disponibles facilitaran a los grupos interesados proyectar los planes de ordenamiento y manejo correctos que permitan equilibrar desarrollos económicos y poblacionales a la par con la sustentabilidad y disponibilidad del recurso.

La planificación de acuíferos costeros requiere un enfoque similar al tradicional realizado en acuíferos de áreas continentales. Ambos tienen elementos de planificación en común: problemas de rendimiento de acuíferos, interferencia entre pozos de bombeo, interacción acuífero-río y contaminación de aguas superficiales son los más comunes. Sin embargo, los acuíferos situados a lo largo de la costa tienen una complicación adicional para el proceso de manejo: el potencial de intrusión salina que eventualmente puede presentarse en porciones de acuíferos costeros cuya consecuencia es la inutilidad del recurso para consumo humano.

1.2. Objetivos e Hipótesis

1.2.1. Objetivo General

Formular herramientas metodológicas para el manejo sostenible de acuíferos Costeros, en el contexto de la gestión integral del agua en el plan de Manejo de Cuencas (POMCA) y el Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC).

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Conocer y analizar los estudios que se han llevado a cabo en el mundo sobre manejo de acuíferos costeros: problemas críticos y soluciones metodológicas propuestas.
2. Estudiar los problemas relacionados con el agua subterránea a nivel general en la Zona Costera para considerar propuestas metodológicas que permitan la gestión sostenible del recurso con un especial énfasis en la intrusión salina.
3. Explorar modelos adecuados para simular la intrusión salina en diferentes ambientes hidrogeológicos.
4. Definir procedimientos metodológicos para incluir en el proceso de planificación y manejo del acuífero, la evaluación de escenarios de cambio climático que pueden afectar los acuíferos costeros, (aumento del nivel del mar y cambios en los volúmenes de recarga).

1.2.3. Hipótesis

Existe la posibilidad de formular herramientas metodológicas técnicas que apoyen una gestión adecuada del recurso agua en acuíferos costeros para garantizar la sostenibilidad del recurso a largo plazo.

Capítulo 2

Problemáticas en Acuíferos Costeros

La contaminación del agua subterránea por intrusión salina es uno de los mayores problemas en acuíferos costeros y ha sido ampliamente reportada en la literatura: el caso de Holanda, bien conocido desde el siglo XIX por Ghyben y Herzberg en 1899 y en donde la subsidencia, el aumento del nivel del mar y presiones antrópicas como drenaje de suelos y reclamaciones de tierra que pertenecían a la zona oceánica, influyen la distribución del agua dulce, salina y salobre de los acuíferos costeros (Cheng y Ouazar 2004). En muchos lugares del planeta se han reportado casos de intrusión en acuíferos costeros; en zonas litorales del Mediterraneo, se encuentran casos de intrusión salina masiva en parte por los climas áridos y por la escasez de fuentes superficiales con estándares de calidad adecuados, sumada a la presión sobre el recurso debida al turismo, la agricultura intensiva y las actividades industriales (Tulipano 2006), específicamente en la zona costera de Turquía se reporta un alto crecimiento demográfico, promovido por políticas del Gobierno incentivando el turismo, lo que generó procesos intensos de urbanización (Infraestructura Hotelera y Turística), conflicto de usos por diversificación de actividades en la costa, choques institucionales por mandatos legales contradictorios y aumento del costo ambiental, producto de un desarrollo desenfrenado y desorientado, se generaron problemas de sobreexplotación del agua subterránea provocando la salinización de los acuíferos debido a la amplia demanda, sumado a las pérdidas en el suelo utilizable para agricultura, que generó la urbanización (Burak et al. 2004). Durante las últimas dos décadas, los acuíferos de la India han sido sobreexplotados para varios propósitos: consumo de la comunidad, abastecimiento al sector constructor, hotelero y turístico, por ello, han sido afectados en su calidad y cantidad principalmente por incremento de la salinización (Kumar et al. 2007). Desde 1930, para la gestión y el manejo del recurso hídrico en el Sureste

de Florida, la intrusión salina ha sido una problemática clara causada principalmente por drenaje de suelos a gran escala y abatimientos masivos del agua subterránea (USGS 2003). Las cuencas subterráneas de la costa Central y Occidental, están localizadas en las costas del océano Pacífico en el suroeste de Norteamérica, en Los Angeles, California. Entre principios de los 1900 hasta finales de 1950 una aguda sobreexplotación del recurso en estas cuencas generó la caída de los niveles de agua respecto al nivel del mar, permitiendo la intrusión de agua salina en los acuíferos con agua potable, por ello fue necesario el abandono de algunos pozos, y surgió una gran amenaza para la utilización de este importante recurso en la zona (Cheng y Ouazar 2004). En Mar del Plata (Argentina), como consecuencia de la sobreexplotación, se produjo la intrusión de agua de mar en el acuífero, afectando una franja de 3,5 km de ancho (Bocanegra 2005).

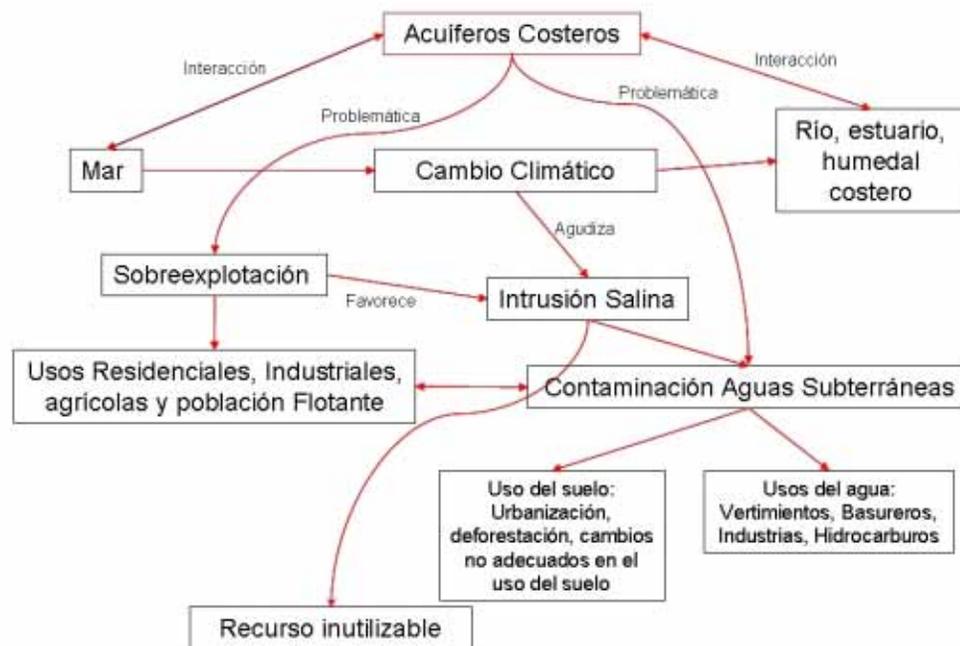


Figura 2.1: Esquema de problemáticas asociadas a acuíferos costeros en donde se detecta al cambio climático como un agravante sobre los problemas de cantidad y calidad del agua subterránea

Son muchos y variados los casos relacionados con la problemática del agua subterránea en Zonas Costeras (Figura 2.1), quizá el aspecto común es la presión antrópica sobre la cantidad y calidad. El entendimiento de diferentes estrategias de manejo relacionadas con los niveles de presión sobre el recurso hídrico subterráneo (como el tipo de bombeo, tasas de bombeo, contaminación), y el rol de cambio climático son esenciales

para el manejo sostenible de acuíferos costeros (Feseker 2007). Por ello, los hidrogeólogos tienen que trabajar cada vez más con investigadores de otras disciplinas tal como socio-economistas, modelizadores agrícolas e investigadores del suelo para evaluar las consecuencias de cambios futuros sobre el agua subterránea que resultan de estos cambios (Holman 2006). La política, los valores sociales, y procesos económicos que se relacionan con la configuración del paisaje que se encuentra encima de los acuíferos son factores potencialmente importantes que influyen el tipo de problemáticas presentes que podrían vulnerar la cantidad y calidad del agua subterránea (Holman 2006). Un esquema y descripción de problemáticas a nivel global se presentan en la Figura 2.1 y Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Problemáticas relacionadas con el agua subterránea en la zona costera

| Problemática | Consecuencias | Frecuencia |
|--------------------------|--|-----------------------------------|
| Gobernabilidad | No hay ordenamiento del recurso, explotación no controlada, choque de disposiciones legales locales, regionales y nacionales | Frecuente en países en desarrollo |
| Sobreexplotación | Alteración de las condiciones hidrológicas naturales Intrusión salina | Frecuente |
| Urbanización | Deterioro de calidad Reducción en la recarga | Frecuente |
| Cambios en uso del suelo | Reducción en la recarga | Frecuente |
| Vertimiento de efluentes | Contaminación del recurso | Frecuente |
| Turismo | Aumento en la demanda del agua en épocas secas | Frecuente |
| Cambio Climático | Agudización de problemáticas en cuanto a calidad y cantidad del agua | |

2.1. Problemáticas relacionadas con el uso del agua

Las actividades antrópicas pueden afectar tanto la cantidad como la calidad del agua subterránea en zonas costeras, principalmente teniendo en cuenta que cerca del 70 %

de la población mundial actual habita en zonas litorales (Cheng y Ouazar 2004; Bocanegra 2005). A nivel de cantidad, el principal problema esta relacionado con la sobreexplotación del acuífero en la propia zona o en zonas adyacentes (Manzano 2002; Foster 1992) y a la falta de planificación de las captaciones subterráneas (Foster 1992; CORALINA 1999). También son comunes los problemas relacionados con la perforación de pozos y aprovechamiento de aguas sin ninguna clase de permiso ni concesión de aguas, lo cual se traduce en una explotación sin control del recurso (CORALINA 1999; CORPOGUAJIRA 2007).

2.1.1. Salinización de acuíferos

Cuando en el agua se presenta alta concentración de solidos disueltos llamadas *sales* se le llama *agua salina, salada o salobre*. Se han implementado diferentes criterios para diferenciar aguas salinas/dulces y para definir el grado de salinidad. Por ejemplo, según USGS (2003) se define el agua dulce como aquella que contiene menos de 1000mg/l, mientras aquellas aguas con mas de 1000mg/l se consideran salinas o saladas. Este límite esta basado en la potabilidad para consumo humano. La concentración aproximada de solidos disueltos en el mar es de 35000 mg/l. Las aguas salobres se definen como aquellas cuya concentración de solidos disueltos está entre 1000 y 35000 mg/l (USGS 2003). Los constituyentes del agua marina (con concentraciones por encima de 1mg/l) y sus concentraciones promedio se presentan en la tabla 2.2, se puede observar que el mayoritario es el ión Cloruro (Cl⁻). La salinidad en las aguas marítimas colombianas tiene un promedio de 35000 mg/l, con un rango de variación entre 33500 y 36000 mg/l, se encuentra relacionada con la temperatura, los afloramientos de fitoplancton y las fuentes de agua dulce procedentes de la tierra (INVEMAR 2003b). En Colombia el valor máximo de cloruros permitido en aguas para consumo humano es de 250mg/l (Decreto 475 de 1998), mientras el máximo de solidos disueltos totales 500mg/l.

Una mezcla de agua con solo el 2% de agua marina produce un notable deterioro. Si la proporción es de 4% existe un serio deterioro para muchos usos. Si es del 6% el agua es casi inútil para usos potables y de riego (Bocanegra 2005). La intrusión salina que resulta de la extracción de agua subterránea (señaladas con * en la figura 2.2) no es el único mecanismo de salinización en acuíferos costeros, a continuación se mencionan algunas fuentes posibles de salinización (Custodio 2002; Araguas 2003):

1. Intrusión de agua de mar en el acuífero, como resultado del intenso bombeo y del desplazamiento ascendente de la interfase agua dulce-agua salada.
2. En el caso de acuíferos confinados, la evolución geoquímica natural a lo largo de una línea de flujo puede originar un progresivo incremento de la salinidad. Si

Tabla 2.2: Concentración promedio de principales constituyentes del agua marina. Tomado de USGS (2003)

| Constituyente | Concentración (mg/l) |
|---------------|----------------------|
| Cloruro | 19000 |
| Sodio | 10500 |
| Sulfato | 2700 |
| Magnesio | 1350 |
| Calcio | 410 |
| Potasio | 390 |
| Bicarbonato | 142 |
| Bromuro | 67 |
| Estroncio | 8 |
| Sílice | 6.4 |
| Boro | 4.5 |
| Fluoruro | 1.3 |

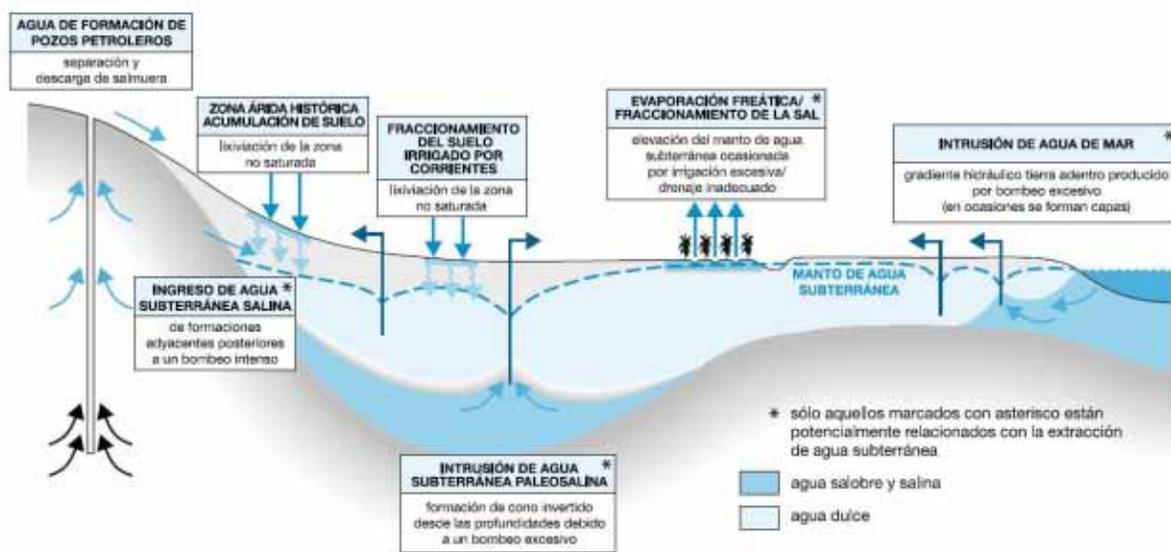


Figura 2.2: Posibles orígenes de la salinidad del agua subterránea y mecanismos de salinización de los acuíferos. Tomada de Foster et al.(2006). Nota informativa 2.

el acuífero esta formado de sedimentos marinos parcialmente lavados, el agua subterránea puede adquirir una composición química similar a la que se observa cuando se produce una intrusión marina real ([Appelo 1993](#)).

3. Rocío de agua marina en lugares costeros: Incorporación de aerosoles de origen marino y posterior concentración de sales en aguas de lluvia que se infiltran en el terreno, especialmente en el caso de climas semiáridos.
4. Evaporación intensa de flujo efluente de agua subterránea en áreas de descarga y humedales.
5. La disolución por parte del agua subterránea de materiales evaporíticos incorporados en la columna estratigráfica. El bombeo intensivo puede inducir el lixiviado de las sales contenidas en horizontes de baja permeabilidad.
6. Desplazamiento del agua subterránea contenida en formaciones profundas: El incremento de la salinidad también puede deberse al movimiento ascendente de agua subterránea salina desde niveles confinados profundos, hasta horizontes acuíferos someros.
7. Infiltración de flujos salinos de irrigación: El retorno de las aguas de riego o la infiltración de aguas servidas de uso doméstico o industrial.
8. La infiltración de aguas salobres desde estuarios o canales artificiales puede ser otra fuente de salinidad. En este caso, pueden estar interactuando en el acuífero tres tipos diferentes de aguas.
9. Presencia de aguas congénitas, salmueras o aguas salobres atrapadas en el medio geológico, que puede estar mezclándose con aguas de niveles más cercanos a los superficiales.

El número de pozos que pueden afectar por salinización a un sistema acuífero costero depende no solo del caudal de extracción sino también de las circunstancias de cada pozo, tales como la descarga, penetración, distancia de la línea de costa, régimen de explotación y características locales del acuífero ([Custodio 2002](#)). Consecuencias representativas de la intrusión salina son ([Bocanegra 2005](#)):

1. Áreas del acuífero inutilizadas por elevada salinidad.
2. Abandono de captaciones.
3. Necesidad de buscar nuevas áreas de explotación.
4. Ascenso posterior de niveles freáticos con posibles problemas de inundación de sótanos

2.1.2. Sobreexplotación del agua subterránea en Zonas Costeras

La naturaleza compleja, heterogénea y no visible de los sistemas hidrogeológicos hace difícil estimar con completa certidumbre las cantidades globales del recurso, sin embargo la capacidad de amortiguamiento de los acuíferos le confiere un rango de aceptabilidad a las estimaciones realizadas. Extraer y utilizar la reserva completa de los acuíferos trae consecuencias irreversibles entre las que se encuentran: intrusión salina masiva, disminución notable de agua en ríos, lagos y manantiales; contaminación a gran escala y/o una consolidación geológica mayor y subsidencia. El potencial para la explotación del agua subterránea a escala local e incluso global es muy amplia (Villholth 2006). Cerca de un 8.2% mundial del recurso hidrogeológico esta siendo extraído para uso humano (Shah,2004 en (Villholth 2006)), esta cantidad cubre una variabilidad global amplia de la recarga que parece poca pero está básicamente reflejada en diferencias de precipitación y formaciones geológicas.

La extracción de agua subterránea impacta el balance hídrico afectando la disponibilidad del recurso en otras partes del ciclo hidrológico, e impacta los niveles del acuífero y por ende los balances a largo plazo entre flujos de entrada y flujos de salida. Por ello, es importante la definición de una explotación que permita el mantenimiento de las fuentes a largo plazo. También es necesario analizar la demanda de los múltiples usuarios, y las compensaciones entre consecuencias positivas y negativas (Técnicas, socioeconómicas y ambientales) de la extracción específica proyectada. En este punto, los términos Almacenamiento Sustentable y Sobreexplotación son términos claves para definir los límites de extracción en una utilización no sustentable (Custodio 2002). Esta clase de términos y estimaciones, aportan a la consolidación de acuerdos para definir los costos negativos aceptables para la sociedad, asociados con el uso intensivo del recurso (Villholth 2006).

Al modificar el flujo a través de la extracción de agua dulce subterránea, y al no compensar esta modificación con un aumento en la recarga (natural o artificial), se producirá un descenso en igual cantidad de la descarga de agua dulce al mar (Bocanegra 2005) lo que conlleva a pérdidas de volúmenes de agua utilizable. Cualquier explotación del agua subterránea por medio de pozos de bombeo y aljibes desemboca en una disminución de los niveles piezométricos en las áreas aferentes y está aumentada al intensificar las tasas de bombeo y el número de pozos.

El término “*Sobreexplotación*” en la hidrogeología ha tenido múltiples interpretaciones reportadas en la literatura, cada tipo de interpretación puede estar ligada al tipo de problemática propia de la zona y a las políticas que guían el uso del recurso hídrico. Es importante anotar que el término sobreexplotación suele ser usado en

la terminología de la Gestión del Recurso mas no cuenta con una definición técnica precisa (Foster, 1992). Esto debido principalmente a dos cuestiones que rodean el asunto:

1. Las áreas en las que se debe realizar el balance hídrico subterráneo, especialmente en zonas en donde se cuenta con una distribución irregular de pozos de bombeo
2. La definición del período de tiempo para realizar el balance, especialmente en zonas donde los eventos de recarga suceden periodicamente

Sin embargo algunas interpretaciones del término son las siguientes:

1. Cuando las tasas de extracción son mayores que las tasas de recarga, se genera sobreexplotación, debido a la cuál no es posible conseguir un equilibrio de aguas dulces y saladas, se presentan disminuciones considerables de las reservas permanentes y una salinización masiva y profunda en el acuífero (Foster, 2006; Custodio, 1992). Este es una de las problemáticas mas importantes relacionadas con el recurso hidrogeológico costero no solo a nivel mundial sino también a nivel del Caribe Colombiano, dada la escasez de agua superficial en algunas zonas que favorecen la explotación intensiva y descontrolada del recurso. Los impactos potenciales de la sobreexplotación varían ampliamente de acuerdo al ambiente hidrogeológico (Tabla 2.4).
2. Un acuífero está sobreexplotado cuando sus niveles de agua subterránea muestran pruebas de descenso continuo *a largo plazo*. La tasa media de recarga de agua subterránea a largo plazo es menor que la extracción. (Villholth 2006).
3. Según Foster (2006), una definición desde la perspectiva económica sea quizá la más apropiada: existe sobreexplotación cuando el *costo general de los impactos negativos de la explotación de agua subterránea rebasan los beneficios netos del uso del agua subterránea*, pero por supuesto, puede resultar igualmente difícil predecir y calcular el costo de dichos impactos y las consecuencias de la extracción intensa de agua subterránea que el valor de la extracción.

Con frecuencia las actividades responsables del impacto, se producen en zonas alejadas (a veces centenares de km.) o, incluso, ocurrieron hace décadas o centenares de años. Adicionalmente, algunas conductas para una gestión incorrecta del recurso hidrogeológico costero son (Bocanegra 2005):

1. Extracción excesiva con respecto a la recarga

Tabla 2.3: Resumen de los principales efectos negativos de la sobreexplotación en acuíferos. Tomado de Foster y Morris (2006)

| Reversibilidad | Efecto adverso de explotación intensa | Causa Fundamental | Frecuencia de Ocurrencia |
|----------------|--|---|--------------------------|
| REVERSIBLE | Incrementos en costos de bombeo | Caída del nivel freático | Común |
| | Reducción en rendimiento específico del pozo | | Común |
| | Reducción en caudales de manantiales | | |
| | Impacto en el río y/o en ecosistemas de humedal | Reducción de descarga en el acuífero | Común |
| | Intrusión Salina en acuíferos | Inversión de gradientes verticales en el acuífero | Muy Común |
| IRREVERSIBLE | Recarga inducida de agua contaminada | Inversión de gradientes verticales en el acuífero | Común |
| | Cambios inducidos en la hidrogeoquímica/calidad del agua subterránea | Disminución de oxígeno en acuíferos naturalmente anaeróbicos y transformación/movilización de algunos minerales (As, Fe, S, Mn) | Escaso |
| | Subsidencia del suelo | Disminución en presión de poros y compactación de acuíferos intermedios | Localizada |
| | Reducción en la transmisividad del acuífero | Compactación de la matriz acuífera | Escaso |

2. Captaciones demasiado próximas al litoral

Tabla 2.4: Resumen de los principales efectos negativos de la sobreexplotación en acuíferos. Tomado de Foster y Morris (2006)

| Ambiente Hidrogeológico | Tipo de efecto adverso | | |
|---|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| | Intrusión Salina | Subsidencia | Contaminación |
| Sedimentos Aluviales | | | |
| Costeros | √√ | √√ | √√ |
| Continetales | √ | √ | √√ |
| <i>Con depositos lacustrinos</i> | √√ | √√ | √ |
| <i>Sin depositos lacustrinos</i> | √ | √√ | √√ |
| <i>Con lavas o brechas permeables</i> | √√ | | √√ |
| <i>Sin lavas o brechas permeables</i> | √ | | √ |
| Acuíferos Sedimentarios consolidados | √ | | √ |
| Calizas costeras recientes | √√ | | √ |
| Depositos Glaciales | √ | √ | √ |
| Complejos de basamentos meteorizados | | | √ |
| Depositos finos de montaña | | √ | |

3. Pozos de explotación a alto caudal
4. Pozos excesivamente cercanos unos a otros
5. Mala construcción e inadecuado proyecto de captación
6. Falta de un régimen de explotación adecuado

Las consecuencias mas representativas de estas acciones son el descenso de niveles piezométricos, degradación de la calidad del agua subterránea, subsidencia del terreno, afección a los cursos superficiales e impactos ecológicos. Un resumen de los impactos de la sobreexplotación pueden verse en las Tablas 4.1 y 2.4.

Relacionando la sobreexplotación con el movimiento y morfología de agua salada en el acuífero se puede decir que la extracción de agua subterránea afecta los volúmenes de descarga del acuífero al mar y el equilibrio dinámico del mismo. Cuando el sistema hidrogeológico es perturbado de esta manera, se genera una tendencia hacia una

nueva posición de equilibrio, traduciendo generalmente en una cuña marina mas penetrante y profunda en el acuífero con una zona de mezcla mas delgada.

La reducción del caudal explotado en el acuífero proveniente principalmente de la recarga, garantizaría una descarga del agua subterránea y por lo tanto una limitación del avance de la cuña salina que esta afectando pozos u otras estructuras de explotación.

Custodio (1988), presenta diferentes situaciones posibles en un acuífero costero sometido a explotación en relación a la ubicación de los pozos (Figura 2.3):

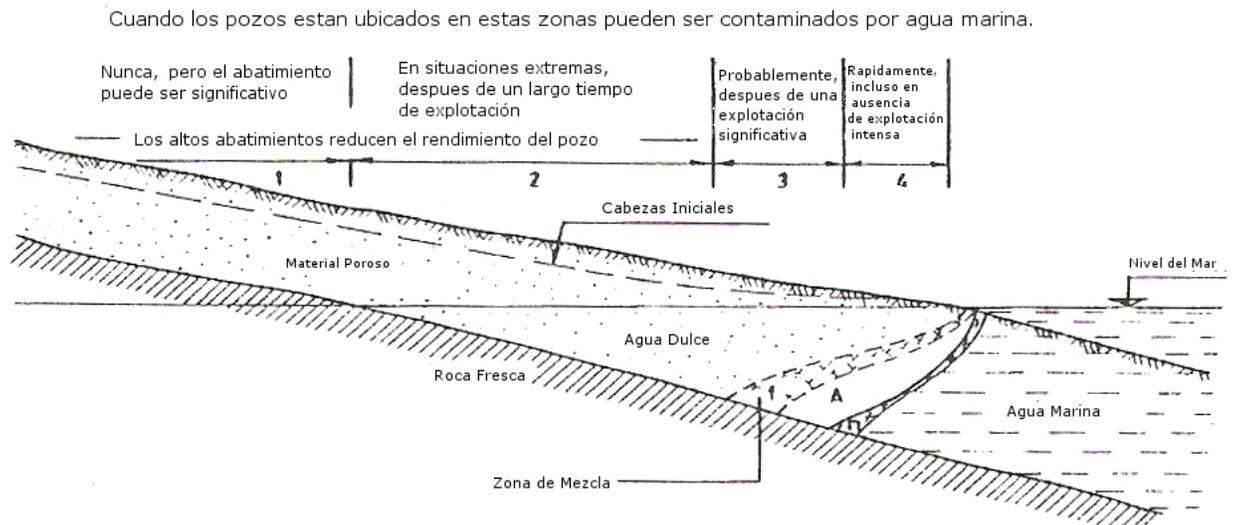


Figura 2.3: Influencia de sobreexplotación y distancia de pozos a línea de costa sobre el avance de la cuña salina en el acuífero costero. Tomado de Custodio (1988)

1. Pozos alejados de la línea de costa, donde el fondo del acuífero está por encima del nivel del mar. No existe un riesgo tan alto de intrusión salina mas una extracción intensa favorece la disminución representativa de niveles freáticos y rendimiento en los pozos.
2. Pozos alejados de la línea de costa y de la cuña salina, pero en donde el fondo del acuífero esta por debajo del nivel del mar. Se presentaria intrusión salina en los pozos unicamente cuando el total de volumen captado sea casi igual al de la recarga total, despues de un tiempo prolongado. Mayores problemas se pueden presentar en acuíferos profundos y cuando existen capas con permeabilidades preferenciales. Al captar agua de zonas cercanas a la costa se puede subsanar relativamente esta situación.
3. Pozos cercanos a la costa, pero en áreas no localizadas dentro de zonas no afectadas por la posición natural de la cuña. En este caso existe un riesgo de salinización cuando se extrae una porción de la recarga.

4. Pozos perforados sobre la cuña salina. Existe un riesgo de contaminación por ascenso del cono de salinización dentro de la zona de captura del pozo, incluso en pozos poco profundos de bajo almacenamiento.

El movimiento de agua salina presenta velocidades muy bajas dado que requiere desplazamientos de grandes cantidades de agua tanto salina como dulce. Por ello, la intrusión salina puede tomar unos cuantos años en ser notoria, a partir del comienzo de la explotación. Una intrusión rápida solo se daría en acuíferos relativamente pequeños y permeables después de que la explotación comience. En acuíferos confinados o semiconfinados en contacto con el mar, también se generan situaciones de sobreexplotación al disminuir considerablemente los niveles piezométricos.

Cuando se extrae el agua de los acuíferos costeros a través de pozos, se conforman abatimientos locales del nivel freático, y cuando el pozo o dren está localizado por encima de la cuña salina, se desarrolla un cono ascendente de agua salada (por debajo del pozo) o una cresta de agua salada (por debajo del dren). Custodio (2002), señala las siguientes posibles situaciones:

1. El agua salina alcanza el fondo del pozo resultando en una mezcla directa de agua dulce y agua salada en el pozo.
2. El agua salina no alcanza el pozo o dren, mas dado que hay un flujo sobre o dentro de la zona de interface hacia el punto de captación, el agua de mezcla acumulada bajo el punto o línea de estancamiento es capturada por este, con algunos rastros de salinización
3. El efecto sobre la interfase es muy poco y el flujo hacia el mar no es interrumpido. El punto de captación no recibe agua de mezcla, pero en general el rendimiento en el pozo debe mantenerse bajo para mantener tal situación.

2.2. Problematicas relacionadas con el uso del suelo

2.2.1. Cambios de uso del suelo que implican disminución ó aumento de la magnitud de la recarga al acuífero

Con frecuencia, los usos que el hombre hace del suelo influyen en la dinámica de volúmenes de agua que recargan al acuífero, un ejemplo claro son los procesos de

deforestación y reforestación en zonas conectadas al acuífero. El tipo de suelo juega un importante papel dentro del ciclo hidrológico. Si se trata de uno arenoso, generalmente, presente en ambientes calizos y coralinos, no es posible la formación de escorrentía superficial debido a la alta permeabilidad; en suelos arcillosos, frecuentes en ambientes volcánicos, la baja permeabilidad sí permite tal escorrentía. La capacidad de retención del suelo, que es función de la textura y profundidad del suelo, es un factor que influye fuertemente los procesos de evapotranspiración y recarga. Los suelos grueso-granulares (como arenas) favorecen el proceso de recarga, a diferencia de los suelos fino-granulares. La vegetación en Islas Pequeñas, generalmente adaptadas a las condiciones locales climáticas, consiste en una variedad de arboles, arbustos y hierbas, que normalmente no requiere irrigación. El tipo y densidad de vegetación afecta el ciclo hidrológico, la interceptación y transpiración reducen la recarga, disminuye la escorrentía superficial y reduce la erosión sobre grandes islas incrementando así la infiltración de agua dentro de la tierra.

2.2.2. Urbanización

La urbanización causa cambios radicales en la frecuencia y tasas de recarga del agua subterránea, afectando así los niveles piezométricos y los regímenes de flujo en acuíferos subyacentes. La alta capacidad de amortiguamiento o tiempo de respuesta del acuífero hace que estos efectos pueden tomar un largo tiempo en ser notorios, incluso décadas antes de que el sistema acuífero alcance el proceso de equilibrio con el proceso de urbanización (Lawrence et al. 1998).

La urbanización impermeabiliza el suelo, lo que reduce la infiltración de la lluvia, al mismo tiempo que reduce la evaporación, lo que genera mayor escorrentía. Algunos procesos de impermeabilización son:

- Construcción de techos y cubiertas
- Construcción de áreas pavimentadas: Carreteras principales y secundarias, zonas de parqueo, aeropuertos, patios industriales, etc

Un elemento importante al querer cuantificar el impacto de la urbanización, es la proporción de área cubierta. La existencia o no de un sistema de drenaje, ya que al no existir tal red la escorrentía busca caminos preferenciales hacia ríos o zonas permeables, mientras la existencia de una red puede ejercer una gran influencia en las tasas de recarga del agua subterránea urbana (Lawrence et al. 1998):

La urbanización genera aumentos en la recarga cuando las ciudades están construidas sobre acuíferos libres o semiconfinados.

El fenómeno asociado con este proceso es el *goteo* de aguas residuales y drenaje urbano.

El potencial de recarga de esos procesos varía con el nivel de desarrollo económico, densidad demográfica, tipo de clima pero casi siempre excede la reducción en la infiltración directa debida a la impermeabilización del suelo.

La presencia de estratos de baja permeabilidad y poco profundos bajo áreas urbanas puede causar un aumento en los niveles por encima del regional y causar impactos sobre obras subterráneas. Sin embargo, esto puede no pasar cuando los acuíferos son suficiente permeables o por una extracción intensa en el área urbana.

2.2.3. Actividades contaminantes sobre la zona de recarga del acuífero

Las mayores fuentes de contaminación costera y marina varian de costa a costa. Las mas comunes y los tipos de actividades que la generan se presenta en la Tabla 2.5 La naturaleza e intensidad del desarrollo de actividades, el crecimiento demográfico, el estado y tipo de Industria y Agricultura son factores que hacen problemas únicos de contaminación de cada país. La contaminación es descargada directamente al mar, o llega a través de ríos y deposición atmosférica ([Bobba 2007](#)).

De otro lado, cuando se pretende controlar y mitigar el impacto de la contaminación en ambientes costeros y marinos, es fundamental la identificación de la clase y carga de los contaminantes. Específicamente deben identificarse los tipos de fuentes y su localización, además de su volumen y concentración. Los puntos fuentes de contaminación pueden ser identificadas estratégicamente por su localización tales como Industrias y Plantas Residuales. Aunque los puntos fuentes son fáciles de identificar, solo tienen en cuenta una fracción de las fuentes superficiales que afectan los ambientes marinos y costeros. Las fuentes no puntuales (son difíciles de identificar, e incluyen agua contaminada transportada por escorrentia urbana y las descargas de contaminantes provenientes de la agricultura ([Bobba 2007](#)).

Las fuentes de contaminación pueden estar localizadas relativamente alejadas de las áreas costeras y tener un impacto a pesar de esta condición. Las fuentes contaminantes y actividades dentro de un área de drenaje pueden ser transportados a la costa por los ríos, además la contaminación proveniente de fuentes distantes pueden llegar al ambiente marino por deposición atmosférica, proceso por el cual los contaminantes son transferidos desde el aire hasta la superficie terrestre por medio de la lluvia, asentamiento de partículas y absorción de gases en el agua (EPA

Tabla 2.5: Contaminadores comunes de agua subterránea y fuentes asociadas de contaminación. Tomado de Foster (2006). Nota informativa 8.

| FUENTE DE CONTAMINACIÓN | TIPO DE CONTAMINANTE |
|---|---|
| Actividad Agrícola | nitratos; amonio; pesticidas; microorganismos fecales |
| Saneamiento in situ | nitratos; microorganismos fecales; trazas de hidrocarburos sintéticos |
| Gasolineras y Talleres Automotrices | benceno; otros hidrocarburos aromáticos; fenoles; algunos hidrocarburos halogenados |
| Déposito Final de Residuos Sólidos | amonio; salinidad; algunos hidrocarburos halogenados; metales pesados |
| Industrias Metalúrgicas | tricloroetileno; tetracloroetileno; otros hidrocarburos halogenados; metales pesados; fenoles; cianuro |
| Talleres de Pinturas y Esmaltes | alcalobencenos; tetracloroetileno; otros hidrocarburos halogenados; metales; algunos hidrocarburos aromáticos |
| Industria Maderera | pentaclorofenol; algunos hidrocarburos aromáticos |
| Tintorerías | tricloroetileno, tetracloroetileno |
| Manufactura de Pesticidas | algunos hidrocarburos halogenados; fenoles; arsénico |
| Déposito Final de Lodos Residuales Domésticos | metales pesados |
| Curtidurías | nitratos; varios hidrocarburos halogenados; plomo; cinc |
| Exploración y Extracción de Petróleo/Gas | cromo; salinidad; algunos hidrocarburos halogenados; fenoles |
| Minas de Carbón y de Metales | salinidad (cloruro de sodio); hidrocarburos aromáticos |
| | acidez; diversos metales pesados; hierro; sulfatos |

online <http://www.epa.gov/owow/airdeposition/>). Las fuentes superficiales de contaminantes, constituyen la mayor amenaza para el Manejo de Acuíferos Costeros (Bobb 2007). Además, los siguientes procesos también influyen en la contaminación del acuífero:

1. Enterramiento no controlado de residuos sólidos y líquidos
2. Disolución de gases y deposición seca de áreas industriales

3. Cambios de la temperatura del agua
4. Cambios de vegetación
5. Cambios de usos agrícolas

2.3. Problematicas relacionadas con el Cambio Climático

Las evidencias de Cambio Climático son contundentes y están basadas en el análisis de múltiples variables hidroclimatológicas alrededor del mundo. Los aumentos en las temperaturas promedio del aire y los océanos a nivel global e incluso a nivel nacional (Perez et al. 1998). En la Figura 2.5, se muestran las tendencias de 3 estaciones ubicadas en el Caribe Colombiano con registros de temperatura del aire a nivel mensual durante las últimas décadas, en estas se nota una clara tendencia ascendente. El aumento en el nivel promedio global del mar (Figura 2.4), provee mayor certeza sobre la existencia de este fenómeno y sus posibles consecuencias sobre los sistemas físicos y biológicos (IPCC 2007). Es muy probable que las prácticas actuales de gestión hídrica no reduzcan los impactos negativos del cambio climático respecto a la disponibilidad de agua, el riesgo de inundaciones, la salud humana, la energía y los ecosistemas acuáticos (IPCC 2007). Por ello, se ha despertado un gran interés dentro de la comunidad científica en cuantificar las consecuencias del cambio climático en estos ámbitos dado que se trata de un fenómeno evolutivo y a largo plazo, y dadas las potenciales consecuencias sobre el sistema socioeconómico, se hace necesario que las autoridades competentes tengan herramientas para determinar las medidas de adaptación y mitigación que permitan sobrellevar este fenómeno de una manera sustentable.

Los efectos del Cambio Climático, sumados al crecimiento poblacional y económico, y los cambios en el uso del suelo, entre los que se incluye la urbanización, generarán fuertes presiones sobre los recursos hídricos. Los impactos en los sistemas de agua dulce y su gestión, se deben a cambios observados y proyectados en los patrones de evaporación, temperatura, nivel del mar y variabilidad de la precipitación que al mismo tiempo desembocaran en cambios sustanciales de la escorrentía superficial y disponibilidad del recurso (IPCC 2007). Sin embargo, existe una fuerte incertidumbre en los pronósticos cuantitativos de cambios en la precipitación, el flujo de ríos y los niveles de agua a escala de cuenca fluvial. Dado que las aguas subterráneas hacen parte del ciclo hidrológico, se espera que la alteración de estos parámetros afectarán también este componente. Sin embargo, las investigaciones reportadas en la literatura

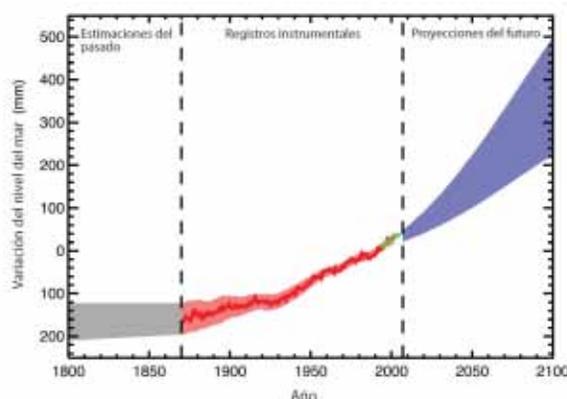


Figura 2.4: Nivel promedio proyectado del mar según IPCC (2007). El nivel del mar no sube uniformemente en todo el mundo. En algunas regiones, las tasas son varias veces superiores al promedio mundial, mientras que en otras regiones el nivel del mar baja (Variación espacial). Esto es debido a cambios no uniformes en la temperatura, la salinidad y relación con los cambios en la circulación oceánica.

no son muy amplias cuando se refieren al impacto sobre el aspecto hidrogeológico mientras se presta un mayor interés en el aspecto superficial (Holman 2006).

El aumento del nivel del mar (ANM) es una de las consecuencias del cambio climático mas frecuentemente citadas en la literatura (Holman 2006; Rozell 2007; INVEMAR 2003b). Este aumento está asociado a la expansión térmica del agua en los oceanos y al descongelamiento de los casquetes polares (Rozell 2007). La tasa promedio mundial de aumento de nivel del mar durante el siglo XX hasta 1990, fue de aproximadamente 1.7mm/año, mientras que en el intervalo comprendido entre 1993 y 2003, el satélite altímetro TOPEX/Poseidón reporto una tasa de 3,1 0,7 mm/año, lo que representa un aumento significativo en esta tasa, esperandose además un aumento de esta al final del presente siglo. Según datos satelitales y modelos climáticos, el aumento del nivel del mar no es uniforme en todo el mundo. En algunas partes puede estar por encima del promedio y en otras por debajo, principalmente debido a cambios no uniformes en la temperatura y la salinidad y a la influencia de las corrientes oceánicas (IPCC 2007).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático en su Cuarto Informe de Evaluación (IPCC-ar4 2007) asegura, con una confianza muy alta, que se incrementaran los riesgos en zonas costeras, entre los que se incluyen aumento acelerado del nivel del mar de 0,2 a 0,6 m o más para 2100 ; aumento de las temperaturas del aire (Tabla 2.6; aumento de las temperaturas superficiales marinas de 1 a 3°C en el futuro;

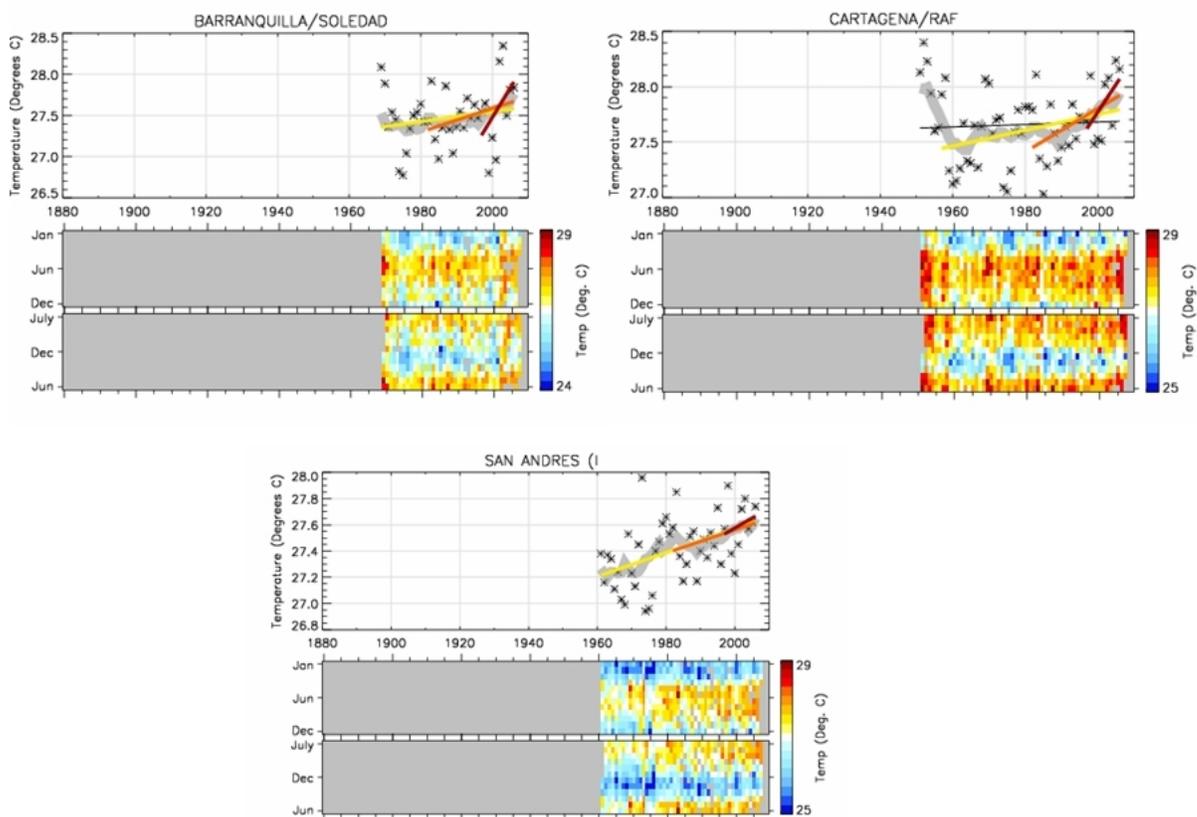


Figura 2.5: Series mensuales de temperatura del aire en tres estaciones del Caribe Colombiano: Barranquilla, Cartagena y San Andrés Islas. Se observa una tendencia creciente durante las últimas décadas. Tomado de Google Earth y NASA (2008)

aumento de la intensidad de los ciclones tropicales y extra ropicales; mayores oleajes con olas extremas y tormentas; modificación de las tasas de precipitación (Tabla 2.7) y escorrentía; y acidificación de los océanos.

Los acuíferos costeros suelen ser cuerpos de agua sometidos a muchas presiones, principalmente debidas al componente poblacional cuyas tasas tienden a aumentar; adicionalmente, el Cambio Climático afectará las tasas de la recarga del agua subterránea, y el aumento del nivel del mar causara un avance de la cuña marina, disminuyendose así la cantidad de agua subterránea disponible para suplir los diferentes demandas (IPCC 2007; Hiscock y Tanaka 2006). Consecuencias potenciales adicionales a estos efectos en los acuíferos son (Rozell 2007):

1. Variaciones en la fluctuación de las superficies piezométricas,

Tabla 2.6: Incremento esperado en la temperatura del aire por región ($^{\circ}$ C), relativo al período 1961-1990. Tomado de IPCC1

| Región | 2010-2039 | 2040-2069 | 2070-2099 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Mediterráneo | 0.60 a 2.19 | 0.81 a 3.85 | 1.20 a 7.07 |
| Caribe | 0.48 a 1.06 | 0.79 a 2.45 | 0.94 a 4.18 |
| Indico | 0.51 a 0.98 | 0.84 a 2.10 | 1.05 a 3.77 |
| Pacífico Norte | 0.49 a 1.13 | 0.81 a 2.48 | 1.00 a 4.17 |
| Pacífico Sur | 0.45 a 0.82 | 0.80 a 1.79 | 0.99 a 3.11 |

Tabla 2.7: Cambio esperado en la precipitación)(%) por región, relativo al período 1961-1990. Tomado de IPCC1

| Región | 2010-2039 | 2040-2069 | 2070-2099 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Mediterráneo | -35.6 a +55.1 | -52.6 a +38.3 | -61.0 a +6.2 |
| Caribe | -14.2 a +13.7 | -36.3 a +34.2 | -49.3 a +28.9 |
| Indico | -5.4 a +6.0 | -6.9 a +12.4 | -9.8 a 14.7 |
| Pacífico Norte | -6.3 a +9.1 | -19.2 a +21.3 | -2.7 a +25.8 |
| Pacífico Sur | -3.9 a +3.4 | -8.23 a +6.7 | -14 a +14.6 |

2. Efectos sobre las presiones de poros del suelo, y
3. Cambios en los volúmenes y calidad del agua.

El manejo óptimo de este recurso requerira, entonces, la evaluación de su vulnerabilidad en el contexto del cambio climático a futuras sequías, procesos de sobre-explotación y deterioro de la calidad, para garantizar una correcta gestión hídrica que balancee la oferta, la demanda, la cantidad y calidad del recurso de acuerdo a las características de determinado acuífero (Struckmeier, 2004 en

Las investigaciones que han sido reportadas alrededor del mundo relacionadas con al análisis de consecuencias e impactos potenciales del cambio climático sobre sistemas hidrogeológicos están generalmente centradas en la salinización de acuíferos debido al aumento del nivel mar y a la alteración de las tasas de recarga (Van Meir y Lebbe 2002; Ranjan et al. 2006; Melloul y Collin 2006; Masterson y Garabedian 2007; Holman 2006; Rozell 2007; Giambastiani et al. 2007; Feseker 2007; Loáiciga y Pingel 2002). Holman (2006), realiza una investigación robusta para evaluar el impacto del cambio climático sobre la recarga del acuífero en East Anglia, Sur del Reino Unido. En

este estudio, se identificaron los factores que afectarán la recarga de agua subterránea futura en esta zona, entre los que se incluyen la precipitación, los ambientes de temperatura cambiados, las inundaciones costeras, la urbanización, el establecimiento de bosques, y los cambios en cultivos y rotaciones. Además, para evaluar el asunto, se propone una metodología con un enfoque horizontal, es decir que no pone al cambio climático como eje fundamental de los componentes sino que admite la interacción entre cada uno de ellos (Cambio Climático, Entorno Físico, Sociedad, Desarrollo, etc.), contemplando la acción de los principales agentes modificadores del paisaje (procesos costeros, agricultura, agua y biodiversidad). La interacción paisaje subterráneo, superficial y usos socio económicos, requieren de un enfoque multidisciplinario que permita abarcar el problema y las variables de entorno (Holman 2006).

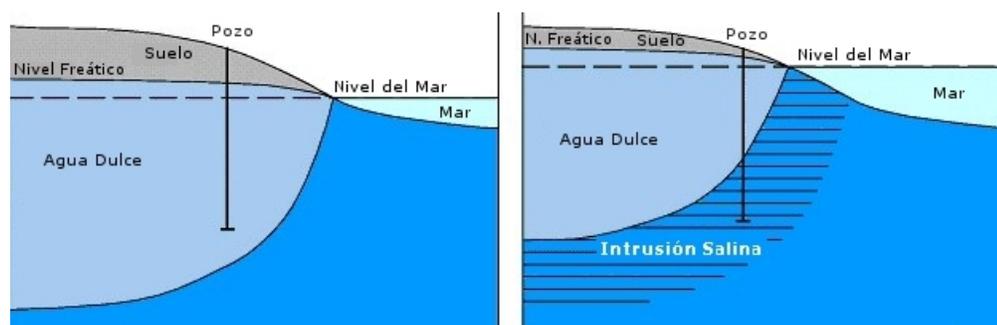


Figura 2.6: Modelo Simplificado de las consecuencias del Aumento del Nivel del Mar en acuíferos costeros (adaptada de Melloul 2006)

Las consecuencias del ascenso del nivel (ANM) sobre los acuíferos costeros serán principalmente la pérdida de volúmenes de agua subterránea dulce, asociadas a la intrusión del océano dentro del continente, y la variación de niveles piezométricos de las superficies freáticas (Melloul y Collin 2006) (Figura 2.6).

A la escala local, se presentan casos representativos que relacionan el impacto del cambio climático sobre las estructuras hidrogeológicas costeras. Uno de estos se presenta en los Atolones del Pacífico. Los recursos hídricos en estos atolones están bajo presiones críticas tales como la urbanización y el aumento del nivel del mar. El agua subterránea se almacena en pequeños volúmenes de agua dulce en forma de lentes poco profundos (5-15 m de profundidad) los cuales descargan a la línea de costa. Según WMO (2005), solo hay 20 litros de agua por persona por día disponibles como recurso. La influencia del Niño y la Niña crean una fluctuación en la lluvia con coeficientes de variabilidad del 40-60 %. Por ejemplo, el Atolón Tarawa del océano pacífico central experimenta variaciones en la precipitación anual desde 300 hasta 4000mm

(WMO 2005). Durante períodos secos, la gente tiene que tomar medidas tan drásticas como salir del atolón debido a la falta de agua potable. Las plantas de desalinización fallan después de 2 a 3 años debido a dificultades técnicas.

El cambio climático es un gran desafío para los atolones debido a la severa reducción de los recursos hídricos análoga a la que sucede durante los eventos El Niño, en los cuales la profundidad de los lentes de agua puede alcanzar los 0.5m de profundidad. La contaminación se suma al problema de la salinización, esta se da sin control en los espacios urbanos, principalmente debida a fuentes contaminantes como derivados hidrocarburos, fertilizantes y aguas negras provenientes de vertimientos por uso humano y agropecuario. El riego para la palma de coco (cada una necesita 170 litros de agua por día) compite con las necesidades humanas. Dado la variedad y sinergia de las presiones sobre el acuífero, han sido tomadas estrategias de mitigación como el uso de tecnologías de bombeo para separar contaminantes (principalmente hidrocarburos) y captar el agua mas sustentablemente, además de establecer medidas correctas entre el recurso disponible y las demandas.

Los principales efectos considerados ante el rápido ascenso del nivel del mar sobre las costas colombianas, son (INVEMAR 2003b):

1. La intensificación de la erosión de las zonas litorales.
2. La inundación de las zonas litorales bajas y
3. La salinización de terrenos y acuíferos, como resultado tanto de la inundación en sí como de la intrusión de la cuña salina.

Capítulo 3

Caracterización de acuíferos costeros

3.1. Caracterización de acuíferos costeros

Las geología, geomorfología e hidrometeorología de una determinada cuenca costera condicionan la existencia de acuíferos que almacenan volúmenes explotables para suplir las demandas solicitadas por diferentes usos, no solo para el abastecimiento humano sino también para ecosistemas costeros. Al igual que en zonas continentales, una cuenca costera está definida básicamente como un área donde el agua entra a través de precipitación, o de aportes superficiales y/o subterráneos de otras cuencas, y sale como evapotranspiración, escorrentía y flujo subsuperficial (Figura 3.1). Sin embargo, en cuencas costeras, los niveles de escorrentía y el flujo subsuperficial, que están vinculados con las propiedades del suelo, la topografía, la lluvia y la evapotranspiración histórica, están controlados por el nivel del mar y por tanto existe una fuerte interacción entre flujos terrestres y marinos de aguas superficiales y subterráneas.

Manzano (2002), hace un análisis de las principales características de los acuíferos costeros, entre las que incluye aspectos físicos, bióticos y sociales relevantes que a la vez determinan la gran complejidad de estos cuerpos en el contexto de las zonas litorales. A continuación, se hace un énfasis en los aspectos físicos destacando características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas. Es importante conocer, estudiar y detallar este tipo de características para modelación y gestión del recurso subterráneo.

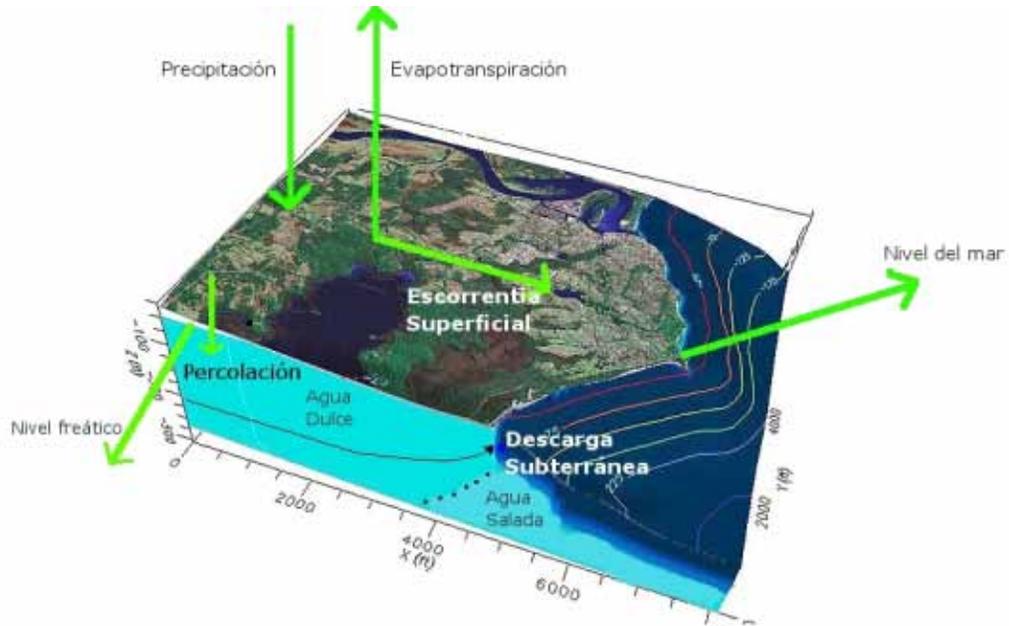


Figura 3.1: Esquema general de Cuenca Costera

3.2. Características Geomorfológicas:

Según [Pethick 1984](#), las estructuras geomorfológicas pueden ser vistas como máquinas, u organismos dinámicos que desarrollan su función con base en varios procesos, principalmente los relacionados con la entrada de energía, los procesos de transporte de sedimentos y la morfología costera, en un equilibrio dinámico. La dinámica morfológica influye en la naturaleza de los acuíferos costeros en diferentes aspectos, por ello, es útil establecer relaciones entre la geomorfología superficial y el relieve subterráneo a la hora de evaluar el componente físico de los acuíferos costeros.

Es difícil plantear una clasificación generalizada de geformas costeras debido a la amplia variedad presente en estas zonas. Sin embargo, es posible afirmar que desde la geología (escala de millones de años) las costas pueden ser divididas en dos categorías ([Pethick 1984](#)):

1. Dominantemente erosivas ó
2. Primariamente sedimentarias

Las erosivas son extensas y variables; típicamente incluyen playas y otras geformas relacionadas con la erosión de sedimentos. Estos procesos favorecen, por ejemplo, la

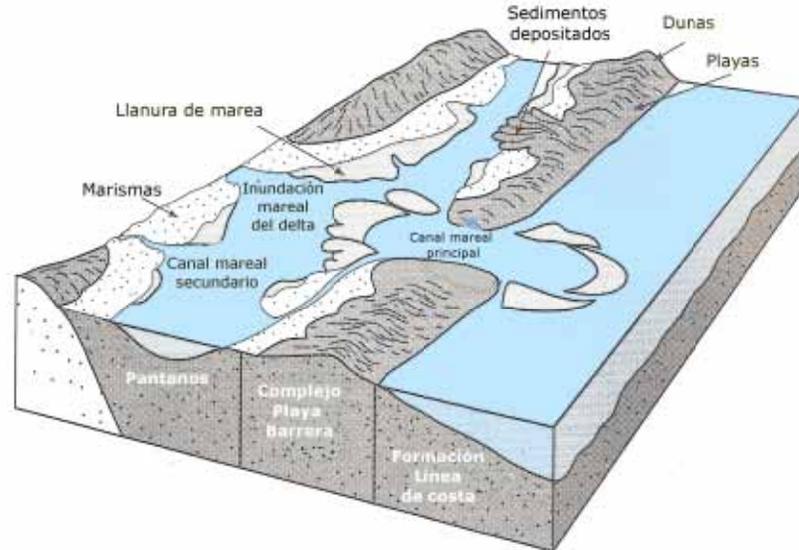


Figura 3.2: Subambientes conformados en un sistema de isla barrera. Tomado de Domenico (1997)

formación de cavernas y grietas, que conforman los espacios por los cuales transita el agua subterránea en rocas ígneas y carbonatadas, tal y como sucede en el acuífero de San Andrés Islas en territorio Insular Colombiano. En estos medios erosivos se presenta una menor variación con respecto al tipo de costas donde predomina la sedimentación, en las cuales se encuentran estructuras como deltas, sistemas de islas barrera, y llanuras costeras, cada una de las cuales agrupa una amplia variedad de configuraciones. Estos procesos favorecen la formación de los ambientes porosos en donde se almacena y transporta el agua subterránea. Custodio (1988) afirma que la interacción mar-acuífero depende, en gran medida, del proceso costero dominante (erosión o sedimentación) de la zona costera objeto de estudio.

En este punto, vale la pena mencionar algunas de las estructuras geomorfológicas más representativas:

3.2.1. Deltas:

Es un depósito de sedimentos dentro de un cuerpo lentic, en este caso el mar. Un delta consiste básicamente de una planicie deltaica superior, y de una parte sumergida. La parte superior presenta características trezadas o patrones meandricos antes de

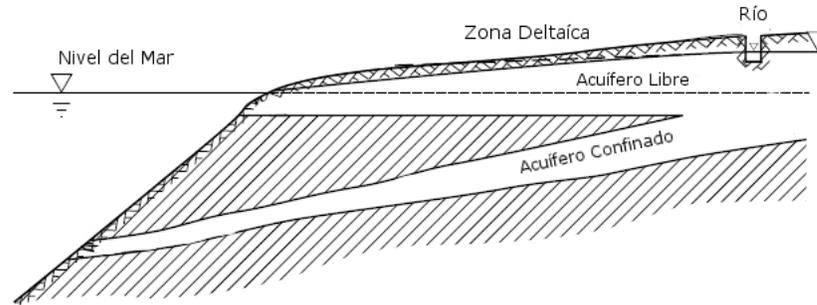


Figura 3.3: Esquema de un sistema deltaico con dos acuíferos, uno superficial y otro confinado que en el caso del Río y Valle del Bajo Llobregat es de mayor importancia hidráulica. Este acuífero fue intruído por agua marina en el Holoceno. Tomado de Custodio (2002)

la zona mareal, la cual se extiende desde el nivel más bajo hasta el más alto de marea. El delta transporta generalmente material de grano fino hacia el mar en la región sumergida (Domenico y Schwartz 1997). El caso del Delta del Río Llobregat en España, es uno de los ejemplos representativos de configuraciones de acuíferos articuladas con estos ambientes geomorfológicos (Custodio 2002) (Figura 3.3).

3.2.2. Llanuras Costeras:

Estas estructuras pueden tener diferentes orígenes y en general son zonas que albergan gran cantidad de acuíferos. Los acuíferos en estas zonas suelen tener características multicapas (USGS 2003). Generalmente, las capas permeables (compuestas por conglomerados, gravas, areniscas y arenas) están confinadas por capas de materiales ricos en finos (limos y arcillas). Es frecuente la coexistencia de depósitos continentales y marinos, sobre todo en la franja litoral donde predominan los sedimentos mixtos y marinos (Custodio 1988). Las condiciones a lo largo de la línea de costa pueden llegar a ser muy importantes dado que la acumulación de materiales de baja permeabilidad favorecen cuñas de agua salada pequeñas. En áreas de depósitos torrenciales, tales como abanicos aluviales, el contacto con el mar y el espesor son importantes para definir la penetración de la cuña salina. Los acuíferos de mayor importancia en Condado de los Angeles (USA), están comprendidos en una llanuras costeras: depósitos en capas sedimentarios aluviales y marinos, en un sistema múltiple de acuíferos permeables compuestos por arena fina, arena gruesa y grava, y acuitardos de más baja permeabilidad compuestos por arena, limos y arcillas. Predominantemente los acuíferos son confinados pero en algunas regiones se encuentran acuíferos semiconfinados y

libres. La profundidad de las cuencas es variable a través de la llanura costera, pero en promedio esta en un rango de varios metros hasta más de 600m debido a las fallas estructurales y a los pliegues que cruzan debido a la forma de las cuencas (Cheng y Ouazar 2004).

3.2.3. Campos de Dunas:

Son montañas de arena que se forman en el borde del mar donde los vientos son fuertes y tienden a soplar en una sola dirección. El viento, al mover los granos de arena, causa el crecimiento en altura de las dunas, así como su traslado. Una duna en crecimiento puede desplazarse hasta 30 m por año. Las dunas son de especial importancia en zonas costeras bajas tales como las de Holanda debido a que son buenos reservorios de agua porque al impedir el escurrimiento de las aguas de lluvia hacia el mar absorben y filtran dichas aguas en sus arenas y las conservan a pocos metros de profundidad.

3.2.4. Cordones Litorales:

Depósitos de arena y grava dispuestos a modo de barreras paralelas a la línea de costa, de la que están separados por lagunas poco profundas, y que sobresalen por encima de la marea alta.

3.2.5. Manglares:

Se llama manglar a una comunidad de árboles y arbustos que crece en aguas saladas o salobres de poco fondo propias de las costas y estuarios de algunas zonas. Comunes en todas las regiones tropicales y subtropicales, son excelentes lugares de nidificación y alimentación para numerosos peces, invertebrados y aves. Pueden estar alimentados en parte por la descarga de agua subterránea, lo que genera gradientes geoquímicos que permiten la presencia de alta biodiversidad en estas zonas dada la variedad de ambientes encontrados.

3.2.6. Areas de marisma mareal o fluvial:

Es una zona pantanosa baja y mal drenada en la que predominan los pastos y plantas herbáceas no leñosas (juncos, eneas, etc.). Suelen formarse junto a las costas e inundarse sólo de agua de mar (salada) debido a su exposición a la acción de las mareas.

La fuerte dinámica y evolución de estas geoformas en el paisaje físico, ocasiona cambios morfológicos (los de menor escala, perceptibles a escala temporal humana) que condicionan el flujo del agua subterránea en zonas litorales, influyendo espacial y temporalmente aspectos como (Manzano 2002):

1. La ubicación y/o extensión de las zonas de recarga y descarga del acuífero,
2. Estimación del balance de entrada y de salida de agua de la cuenca,
3. Direccionamiento de los caminos preferenciales de aguas superficiales y sub-superficiales, etc.

3.3. Características Geológicas:

Debido a que generalmente el agua subterránea está localizada en ambientes geológicos activos, la distribución del agua en estos ambientes está sujeta a los procesos a largo plazo que ocurren en ellos (p.e. el aumento del nivel del mar). El agua subterránea generalmente transita en los espacios porosos de las formaciones geológicas; existen dos tipos de porosidad; la porosidad primaria, que se refiere a los espacios creados al mismo tiempo que se formó la roca (como en arenas bien gradadas no consolidadas), y la porosidad secundaria, que se refiere a espacios que se crean luego de la formación de la roca (tales como fracturas en granitos y conductos carsticos en calizas) (Figura 3.4). Tanto en acuíferos costeros, como en aquellos de carácter continental, la naturaleza del movimiento del agua dentro de la formación geológica específica depende en gran parte de la composición mineral, estructura de la formación y los procesos geológicos que la generaron y la modificaron a través de su historia geológica. Las formaciones geológicas más representativas en acuíferos costeros se pueden resumir en tres grandes grupos: Depósitos no consolidados, depósitos semiconsolidados, y rocas consolidadas (USGS 2003). Los depósitos no consolidados se refieren a fragmentos de roca y granos de minerales que varían desde milímetros (tales como arcillas) hasta varios metros. Al contrario, las rocas consolidadas, comúnmente llamadas roca fresca, consisten en partículas minerales que han sido litificadas por el calor y la presión o han sido cementados por reacciones químicas y precipitación dentro de una masa sólida. Los depósitos semiconsolidados están descritos en medio de las características de ambos

La relación agua dulce-agua salada depende (en escalas de mayor detalle), de las situaciones geológicas locales más que de la piezometría misma (Custodio 1988). En esta subsección se pretenden expandir los conceptos de medios donde predomina la porosidad primaria, que llamaremos *porosos*, y los de aquellos donde predomina la

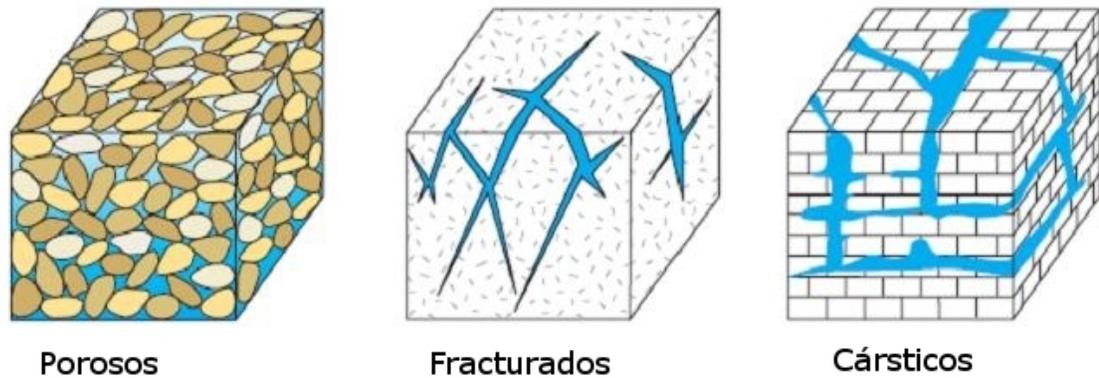


Figura 3.4: Tipos de porosidad formaciones acuíferas

porosidad secundaria causada por disolución de la roca o *cársticos*, debido principalmente a que los primeros son de mayor presencia y productividad en el Caribe Colombiano, y a que los segundos están presentes en el Archipiélago de San Andrés, donde el 85 % de la población utiliza el agua subterránea para abastecimiento, lo que perfila a este acuífero como uno de los de mayor importancia en el país para una zona específica.

3.3.1. Medios predominantemente porosos

En general, las estructuras hidrogeológicas costeras están ubicadas en zonas al extremo final de grandes cuencas de carácter sedimentario. Estas zonas presentan granulometrías medias y finas y grandes cambios laterales de facies litológicas; por ello forman acuíferos con permeabilidades moderadas a bajas y con una elevada heterogeneidad vertical y lateral; además son zonas de descarga de líneas de flujo de largo y medio recorrido (Manzano 2002). Las características estratigráficas y la estructura de los sedimentos pueden ser explicados por la sucesión de eventos en el pasado. Este tipo de conocimientos aportan a un mejor entendimiento de los ambientes físicos tridimensionales en los que se sitúan los acuíferos .

Un ejemplo claro de medios predominantemente porosos son las llanuras costeras, en donde la configuración agua dulce-salada subterránea es compleja debido a la presencia de heterogeneidades, por lo que pueden presentar intercapas de muy baja permeabilidad originadas por transgresiones históricas del mar que crearon ambientes confinados y semiconfinados. Dado que estas intercapas no afloran, no es posible identificarlas excepto por características morfológicas que indican un cambio en la

sedimentación (Custodio 1988). Esta característica se puede presentar tanto en formaciones de origen glacial y fluvio-glacial (como en el Este de USA y oeste de Europa), así como en formaciones originadas en zonas semi-áridas (Piedemonte Mediterráneo), además, la profundidad del nivel freático puede variar desde pocos metros hasta profundidades mayores, principalmente en depositos del cuaternario.

Mulligan et al. 2007 investigaron la relación entre los Paleocauces en llanuras costeras, especialmente del Pleistoceno, y el intercambio de agua dulce-agua salada. Estas estructuras están llenas por sedimentos que son más permeables que la matriz que los rodea y por lo tanto definen caminos preferenciales de flujo y transporte de agua subterránea, esto indica que los paleocauces podrían establecer conexiones hidráulicas entre el mar y el agua dulce que almacena el acuífero. La investigación apunta además a un vínculo significativo entre paleocauces que han incisado acuíferos confinados costa afuera, con la posibilidad de que ocurra una descarga subterránea hacia el mar de agua dulce o intrusión salina hacia el acuífero. Una clasificación más específica de los Paleocauces plantea que son no-conformidades (separación entre rocas de distintos tipos) de dos clases (Hansen 1971):

- **Cerradas:** Aquellas que surgen a partir de ríos en donde predominó el transporte de sólidos suspendidos y a partir de áreas pantanosas. Estos ambientes favorecen la formación de áreas de baja permeabilidad principalmente por la presencia de arenas finas y distribuidas, separadas por sedimentos finos.
- **Abiertas:** Aquellas que se formaron a partir de ríos en los cuáles predominó la carga de fondo. En estos se desarrollan formaciones gruesas y continuas, y algunas veces extensas y permeables, interconectadas y con recarga fácil de adquirir.

Las facies son un conjunto de rocas con determinadas características, ya sean paleontológicas (fósiles) y litológicas (como la forma, el tamaño, la disposición de sus granos y su composición de minerales) que ayudan a conocer dónde y cuando se formó la roca. En zonas costeras, los cambios de facies pueden generarse de las siguientes maneras (Custodio 1988):

- **Paralelas al piso oceánico:** Estas son formadas y atribuidas a procesos marinos y son paralelas al piso oceánico debido al oleaje. Conforman barreras no permeables, debido a la presencia de sedimento muy fino y el cambio puede ser gradacional.

- **Inclinadas:** Son formadas bajo condiciones fluvio-continentales. Generalmente provocan la surgencia de formaciones no-homogéneas que pueden actuar como barreras o estrato permeables.

3.3.2. Medios cársticos

La principal diferencia entre acuíferos rocosos y acuíferos porosos no consolidados es la presencia de discontinuidades tales como fisuras, fracturas, juntas abiertas y fisuras amplias debidas a disolución, llamadas cárst (Tulipano 2006). En algunos de estos ambientes la porosidad primaria es muy baja (calizas compactadas, granitos), en otras la porosidad primaria permanece a pesar de ser dominados por fisuras (toba, rocas volcánicas) (Custodio 1988).

Una estructura cárstica se forma a partir de un proceso de meteorización química que se da cuando las rocas carbonatadas son diluidas por el agua lluvia precipitada, cuando existen grandes cantidades de CO_2 en los ambientes (como zonas con densa vegetación) provocando la formación de ácido carbónico (H_2CO_3), el proceso se podría ver acelerado (Custodio 2002), debido a los procesos de fracturación y carstificación, estos ambientes suelen ser muy permeables cuando las fracturas y conductos no están rellenos de sedimentos. Estas estructuras esta compuestas principalmete por calizas, calizas dolomíticas y dolomitas, pero también podría tratarse de mármoles metamórficos.

La red de conductos adopta un comportamiento altamente irregular y no lineal con orientaciones impuestas por patrones geológicos locales y regionales (Figura 3.5). Los diagramas de direcciones tectónicas locales y regionales son útiles para explicar las direcciones cársticas (Milanovic 1981). El proceso de carstificación está influenciado por la litología, en el sentido de que una roca densamente fracturada es macroscopicamente similar a un medio poroso anisotrópico con alta dispersividad, y a características de fisuras preexistentes (grado de abertura, pendiente y orientación), los patrones de flujo subterráneo y los cambios en el nivel hidráulico; además, los cambios geomorfológicos e hidrogeológicos ocurrieron bajo una gran influencia de la variación del nivel del mar durante el Cuaternario esta variación provocó la formación y aumento de diferentes redes de conductos cársticos en diferentes profundidades, aumentando así la no homogeneidad de la estructura (Milanovic 1981).

Una característica singular de los acuíferos cársicos y, en particular, de los costeros, es la presencia de niveles superpuestos de cavernamiento. Estos niveles, que se definen como sectores de desarrollo preferencial de flujo en conductos, están asociados a las

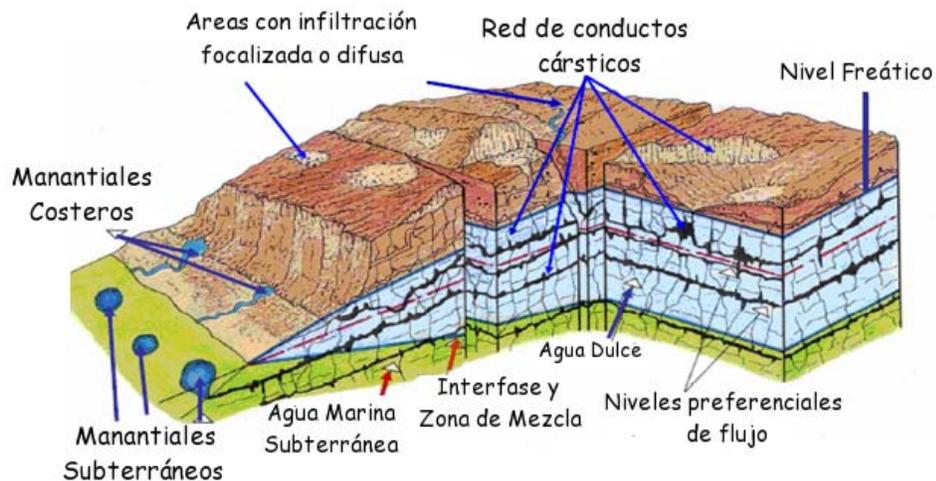


Figura 3.5: Características generales de un acuífero cárstico costero. Cabe resaltar la irregularidad predominante y la red de conductos cársticos interconectados por fracturas (Adaptada de Tulipano, 2006)

variaciones del nivel de base de erosión y son especialmente notables como consecuencia de la extraordinaria amplitud que alcanzó la oscilación del mar durante el Cuaternario. En la región del Golfo de México y el Caribe alcanzó, al menos, los 300 m (Molerio y Flores, 1997). La presencia de niveles de cavernamiento hidrológicamente activos por debajo del nivel actual de las aguas subterráneas llega a alcanzar un valor extremo de -400 m en la Terraza de Portales, al sur de la península de la Florida, en Estados Unidos, pero más comúnmente se reportan entre 0 y 200 m enmarcando, asimismo, mucho más del intervalo útil, explotable, de las aguas subterráneas dulces (Molerio y Flores, 1997). Este desarrollo vertical, variable, del cavernamiento, está localmente diferenciado por la variación facial del corte carbonatado carsificable. Según Milatovic (1981), la salinización en un acuífero cárstico costero puede darse en las siguientes situaciones:

1. Cuando el colector cárstico completo está completamente en contacto con el mar
2. Cuando la barrera hidrogeológica entre el mar y el acuífero ha sido afectada por la erosión o la actividad tectónica.
3. Si la barrera está parcialmente localizada debajo del nivel del mar debido a su posición desfavorable dentro de la estructura

4. Si la barrera es muy poco profunda, la circulación puede tomar lugar debajo de este.

La salinización de acuíferos cársticos costeros ha sido detectada a distancias de hasta 5-10 km tierra adentro desde la línea de costa, como por ejemplo en los acuíferos costeros del Mediterraneo. Generalmente, la influencia del mar decrece con la distancia desde el mar y está generalmente localizada ([Milanovic 1981](#)).

3.4. Características Hidrogeológicas:

En general, el sistema de flujo de los acuíferos costeros está determinado por las configuraciones geológicas derivadas de procesos como la sedimentación, por la cabeza hidráulica que el nivel del mar les aplica y por la mayor densidad del agua salina respecto a la dulce. En la mayoría de estos sistemas, el flujo de agua subterránea fluye naturalmente hacia el mar debido al potencial producido por la recarga tierra adentro. Esta recarga juega un papel fundamental, pues establece los ritmos de almacenamiento y por lo tanto de potencial para contener el flujo marino hacia zonas de producción del acuífero ([Custodio 2002](#)). Indicios para detectar aguas subterráneas almacenadas en zonas costeras, son cuerpos de agua como manantiales, arroyos y ríos que adquieren caudal a lo largo de su cauce sin recibir aportes superficiales. Las manchas de vegetación freatofítica en depresiones del terreno, la formación de costras salinas de forma aislada, el encharcamiento frecuente tras las lluvias en terrenos no arcillosos, etc. son también frecuentes en zonas con potencial acuífero costero ([Manzano 2002](#)). La identificación de estos indicios proporciona un muy buen conocimiento de las zonas donde el agua subterránea está más cerca de la superficie del terreno, conocimiento que es de utilidad para el manejo del recurso.

A continuación, se presentan dos de los conceptos hidrogeológicos más importantes conectados con acuíferos costeros: el primero está relacionado con el flujo de agua dulce que descarga al acuífero, llamado descarga, y el segundo, relacionado con el flujo de agua salina hacia el acuífero, llamado intrusión salina.

3.4.1. Descarga Subterránea

Las evidentes interacciones que se presentan en la zona costera que vinculan los procesos superficiales y subterráneos a nivel hídrico, están principalmente reflejadas en el comportamiento de las líneas de flujo subterráneas que relacionan las zonas de recarga con las zonas de descarga tanto locales y regionales (Figura 3.6). Las zonas de descarga están principalmente localizadas en la línea de costa en donde, dado el

contacto del agua subterránea con el mar, interactúan flujos de agua dulce y agua salada que generan procesos hidrodinámicos en los cuales los esfuerzos de flotación y los efectos de dispersión dominan sobre el equilibrio dinámico de la interfase agua dulce/agua salada, debido principalmente a la diferencia de densidades de los dos fluidos; sin embargo, los factores geológicos determinan en gran medida también las características de estos procesos, principalmente en función de la permeabilidad y tipo de sistema acuífero establecidos por los tipos de estratos geológicos.

Adicionalmente, las zonas de descarga pueden estar relacionadas con cuerpos de agua dulce, como en el caso de humedales costeros alimentados por líneas de flujo de agua subterránea regionales, y por lo tanto de una alta calidad, dado que son menos vulnerables a la contaminación y actividades antrópicas, que en interacción con el agua salada superficial conforman gradientes geoquímicos que permiten la abundancia ecosistemática y biodiversidad en estos cuerpos.

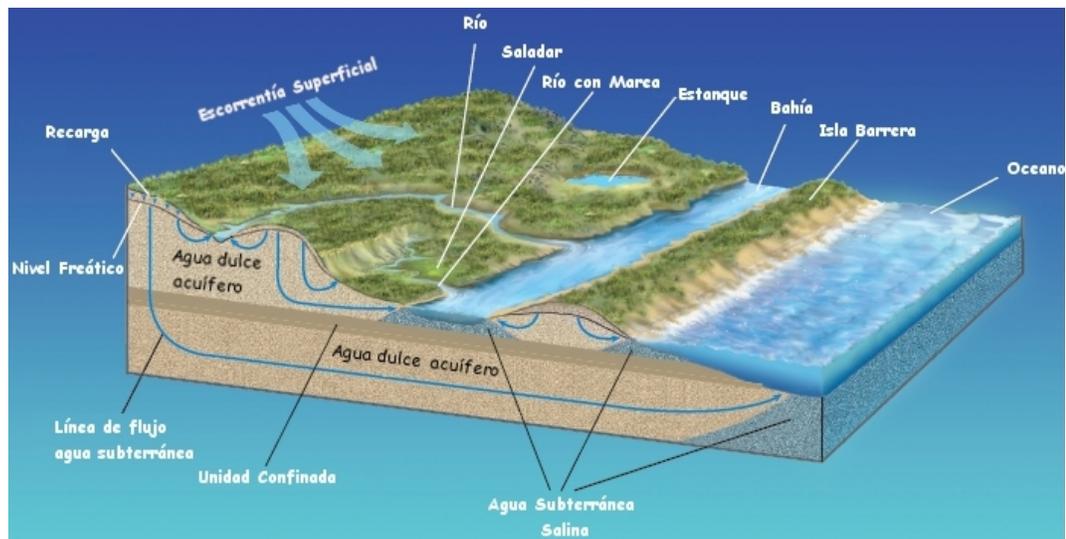


Figura 3.6: Esquema general de Acuífero Costero y líneas de flujo que vinculan zonas de recarga con zonas de descarga en el acuífero. Tomado de (USGS, 2003)

La escorrentía superficial transporta los flujos de agua y de sedimentos a través de los ríos. En el caso de la descarga de aguas subterráneas, conocida en la literatura como *Submarine groundwater discharge (SGD)*, se posee menos conocimientos y datos para su investigación (Bokuniewicz 2001). La descarga subterránea como fuente de agua y compuestos disueltos, a pesar de que transporta gran cantidad de nutrientes y contaminantes, ha sido la menos estudiada de los componentes de los balances

de agua, sal y nutrientes de las zonas costeras (Zektser, 2000 en (Michael et al. 2005)). “ *La SGD puede ocurrir en cualquier lugar que el acuífero este hidráulicamente conectado a través de rocas o fondos permeables y donde la cabeza este por encima del nivel del mar* ” (Johanes, 1980 en (Michael et al. 2005)). Recientemente, se viene dando un interés científico sobre este tema, dado que es un fenómeno que se presenta en casi cualquier costa, y es de especial importancia detectar en donde las actividades humanas puedan afectar ecosistemas marinos muy sensibles a las acciones antrópicas sobre este flujo.

Otra posible interpretación es que dentro de la planicie costera y los sedimentos del fondo oceánico, existe una zona compleja de agua dulce y agua salada. Esta zona ha sido llamada “ Estuario Subterráneo” (Moore, 1999 en (Stieglitz et al. 2008)), en reconocimiento de las similitudes de procesos químicos y físicos que ocurren en estuarios superficiales. Una de las principales razones vinculadas con la falta de entendimiento de este tópico se relaciona con las complicaciones logísticas que implican las mediciones del flujo subterráneo de agua en la interfase costera .

3.4.2. Aspectos generales de la Interacción Acuífero-Mar

Se define como cuña de agua salada o cuña salina la masa de agua salada de gran longitud con sección en forma de cuña, apoyada en la base del acuífero y con el vértice tierra adentro (Vélez 2004) (Figura 3.7). Dado que el flujo de agua dulce influencia la estratificación de la sal en el acuífero, se conforman superficies de isoconcentración que generalmente comienzan cerca a la línea de costa llegando hasta el piso del sistema acuífero; así, es que se origina la cuña de agua salina en el acuífero o el lente flotante de agua dulce, en el caso de los ambientes insulares (Custodio 2002). La intrusión salina es el movimiento de la cuña salina dentro del acuífero y frecuentemente es causada por el bombeo desde pozos costeros. El agua marina que se introduce en el acuífero tiene altas concentraciones de sólidos disueltos totales y ciertos compuestos inorgánicos, por ello no es apta para el consumo humano y otros usos antropogénicos. La intrusión salina reduce el almacenamiento de agua subterránea potable, y en casos extremos, obliga al abandono de pozos de abastecimiento cuando concentraciones de iones disueltos exceden los estándares de agua para consumo humano (USGS 2003).

El flujo de agua dulce que descarga al mar juega un papel esencial en el mantenimiento de las condiciones de equilibrio de la interfaz agua dulce-agua salada en un acuífero costero:

1. Induce dispersión por lo que se desarrolla una zona de mezcla agua dulce/agua salada que puede abarcar desde unos pocos decímetros a decámetros. A su

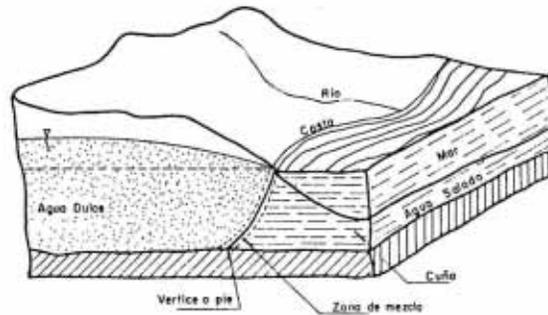


Figura 3.7: Esquema básico de cuña salina en un acuífero costero. Tomado de Custodio (1976).

vez, esta zona de mezcla es influenciada por las heterogeneidades del sistema acuífero. Este concepto será ampliado en el capítulo 3.

2. Arrastra la mezcla de agua hacia la costa, especialmente en la zona alrededor de la interfase. Este mecanismo controla el ancho de la zona de mezcla, pero también generará la entrada de sal en el acuífero para mantener el balance de sal (Custodio 2002).

Si hay intrusión salina, existe un mayor movimiento de agua salada hacia el interior del continente y el nivel piezométrico del agua salada aumenta, la interfaz es más profunda y más inclinada, lo que origina que el espesor de la zona de mezcla sea más delgada. Cuando el flujo de agua dulce predomina, desplazando el agua marina, la interfaz es más alta, presentando bajas pendientes y el ancho de la zona de mezcla es considerable. El conocimiento de los factores que afectan la zona de mezcla en un determinado acuífero costero puede alcanzar un alto grado de complejidad por lo que requiere de un monitoreo adecuado que permita identificar los patrones de distribución espacial del flujo y la sal en el acuífero (Custodio 2002).

Las condiciones de permanencia del nivel del mar y de la distribución de sal que se asume en acuíferos costeros son válidas principalmente para formaciones de tiempo de residencia cortos (Custodio 1988). Hace 10000 a 11000 años, se han estimado variaciones en el nivel del mar aproximadamente de 100m. El nivel del mar es más o menos estable hace 6000 años (IPCC 2007). En acuíferos de gran espesor y anchura, o acuíferos de menor tamaño pero de muy baja permeabilidad, la configuración del flujo y la distribución de sal pueden estar aún respondiendo a cambios en el nivel del mar pasados (Cheng y Ouazar 2004). Igualmente procesos de erosión-sedimentación, responsables de cambios en costas (zonas deltaicas rápidamente erodadas y áreas costeras subsidentes), cambios en la recarga a largo plazo debidas a factores climáticos

o usos del suelo en las zonas del acuífero, pueden generar variaciones en las distribuciones de sal y flujo esperadas en acuíferos costeros.

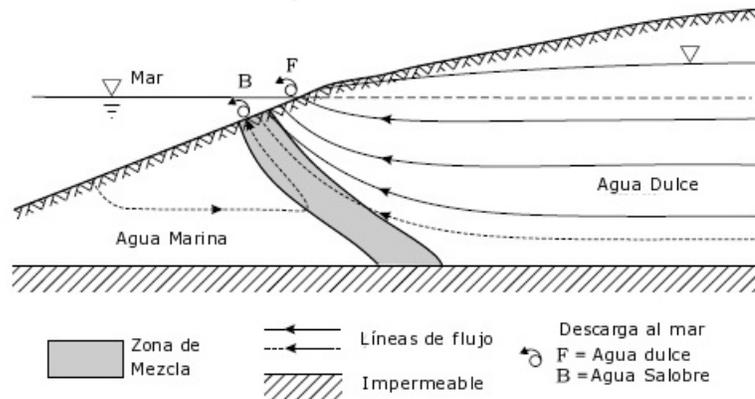


Figura 3.8: Relación agua dulce-agua salada en un acuífero costero libre idealizado con recarga proveniente de zonas aledañas. La escala vertical ha sido exagerada con respecto a la horizontal. Se muestra la zona de mezcla. Tomado de Custodio (2002).

En un acuífero libre costero idealizado se encontraría distribuciones como la que se observa en la Figura 3.8, en estos generalmente la recarga proviene de zonas aledañas, acuíferos vecinos, fuentes superficiales (ríos, lagunas, pantanos y otros), o procesos de infiltración y percolación en las mismas zonas del acuífero. La interfase agua dulce/agua salada generalmente toma la forma de cuña antes explicada.

En acuíferos confinados costeros, la descarga de agua dulce está condicionada por el nivel piezométrico del acuífero a la salida del mar. Si este es mayor que la columna de agua salina superior que la limita, es posible que el flujo de descarga vaya mar adentro, de lo contrario no existe tal descarga y sería en cambio el mar el que penetraría de manera parcial o total en el acuífero (cuando la cabeza en el acuífero llegue a ser muy baja). (Custodio 2002) (Figura 3.9).

En acuíferos confinados con capas goteantes (Figura 3.9(A)), los flujos verticales entran a jugar un rol importante en la interacción acuífero-mar, ya que estos pueden generar una separación total o parcial entre capas de mayor permeabilidad generándose así diferentes relaciones agua dulce/agua salada vinculadas a las cabezas piezométricas de cada acuífero o subacuífero, este caso es observable también en acuíferos multicapa como el mostrado en la figura 3.10, donde las características

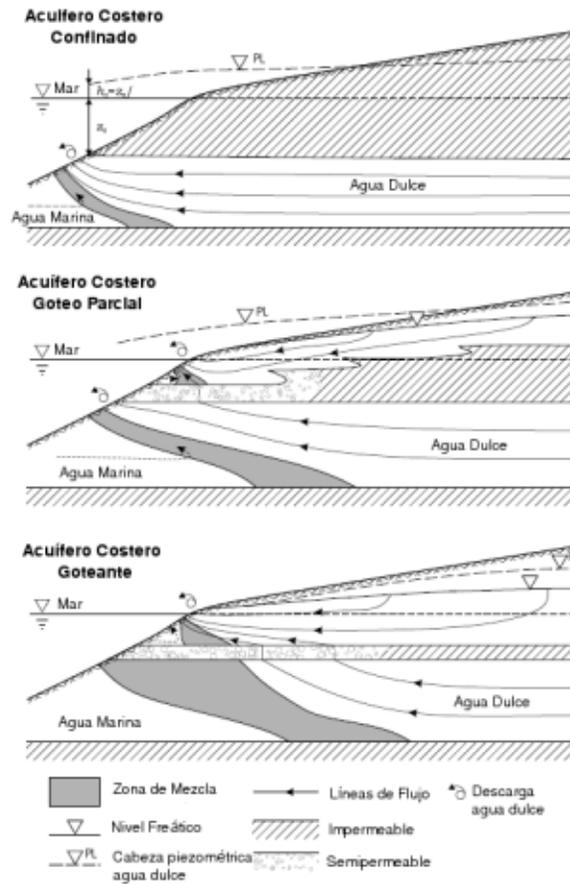


Figura 3.9: Esquema de cuña salina en un acuífero confinado. Tomado de Custodio (2002).

multicapa y heterogeneidades permiten la formación de variadas cuñas cuyo máxima penetración depende de las relaciones piezométricas agua dulce/agua salada y de la permeabilidad del acuífero. En la Figura 3.9(B), se muestra el caso de un acuífero parcialmente goteante, en donde la capa filtrante disminuye de espesor a medida que se aproxima a la costa configurando así una descarga parcial en el acuífero libre superior y una zona de descarga en el mar, mientras que en la figura 3.9 (C), la capa goteante es totalmente delgada lo que permite la descarga completa del acuífero confinado en el libre, por lo que no se presenta descarga del confinado al mar.

En acuíferos insulares las diferencias provocan que el agua dulce flote sobre el agua de mar dando lugar a un esquema de flujo como el presentado en la Figura 3.11 (Rozell 2007). En este se puede observar como el lente de agua dulce flota sobre el

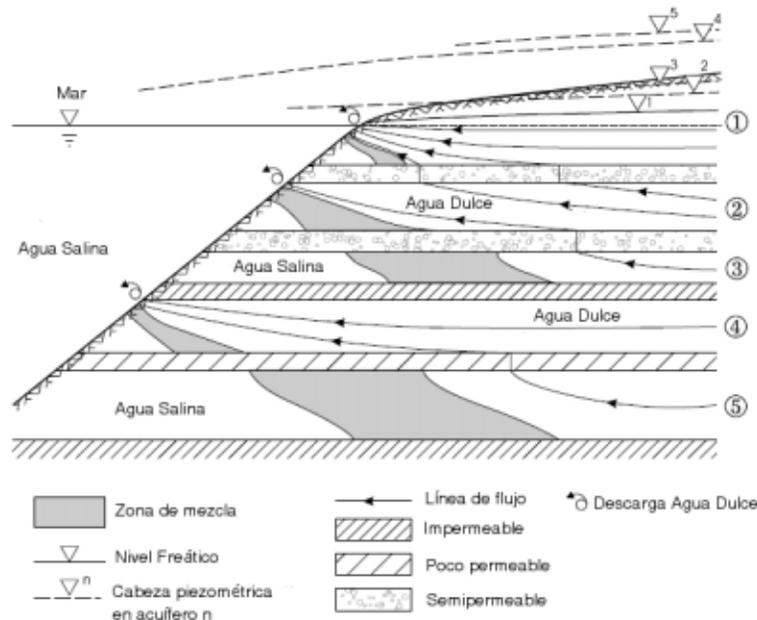


Figura 3.10: Esquema de cuñas características de acuífero multicapa. Tomado de Custodio (2002).

agua marina.

3.4.3. Modelos Conceptuales de Intrusión Salina en Acuíferos Costeros

Al realizar el análisis de un problema de intrusión salina se debe tener un modelo conceptual del mecanismo de intrusión salina como hipótesis de trabajo para analizar este fenómeno bajo la modelación numérica y física. Según Maimone (2002), los acuíferos costeros pueden ser susceptibles a tres formas de intrusión salina:

1. Movimiento horizontal de la interfase

Este mecanismo de intrusión salina se presenta como un empuje lento tierra adentro con tendencia ascendente. Puede darse a escala regional, y resulta en la *cuña de agua salada* característica desde el fondo de un acuífero. Se presenta una interfase agua dulce-agua salada que puede ser abrupta o con zona de dispersión amplia (Maimone 2002). Siempre hay potencial de intrusión salina a lo largo de la costa, y la interfase esta constantemente cambiando en respuesta a los cambios del nivel del mar y los cambios en las cabezas del acuífero debido a las tasas de bombeo o recarga. Este

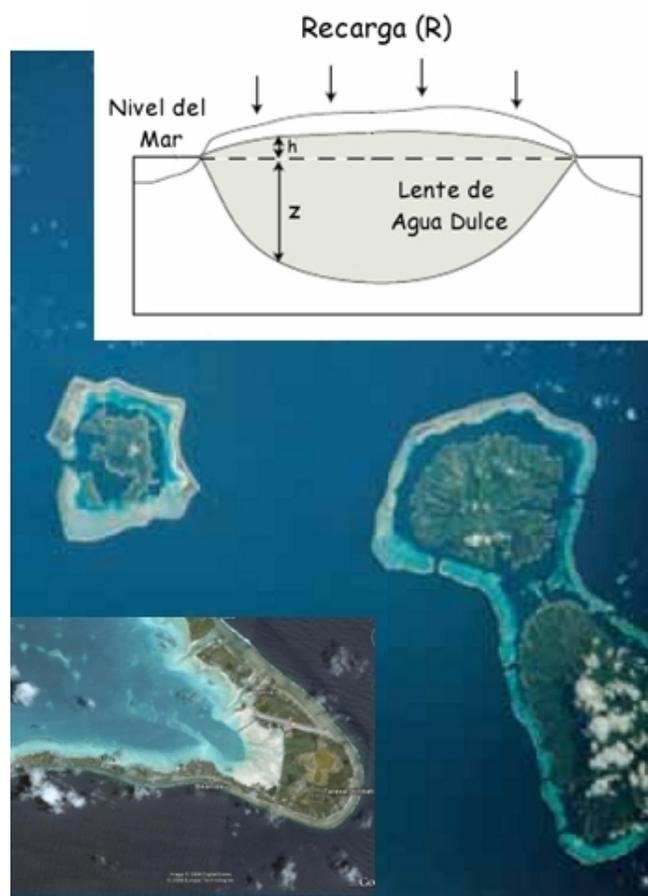


Figura 3.11: Modelo Simplificado de Acuífero Insular. El área en gris es el lente de agua dulce , h representa la altura de la superficie freática por encima del nivel del mar, y z representa la profundidad de la interfase agua salada-agua dulce por debajo del nivel del mar (Adaptada de Rozell, 2007)

mecanismo ha sido identificado en la mayoría de los acuíferos del mundo (Cheng y Ouazar 2004).

2. Goteo descendente de agua desde una fuente superficial

Este mecanismo de intrusión salina es de naturaleza más local. No genera cuña desde el fondo del acuífero y típicamente ocurre dentro de los límites de la zona de captura de pozos de bombeo donde un abatimiento significativo del nivel freático ocasiona infiltración inducida superficial, además se hace más evidente en épocas de caudales

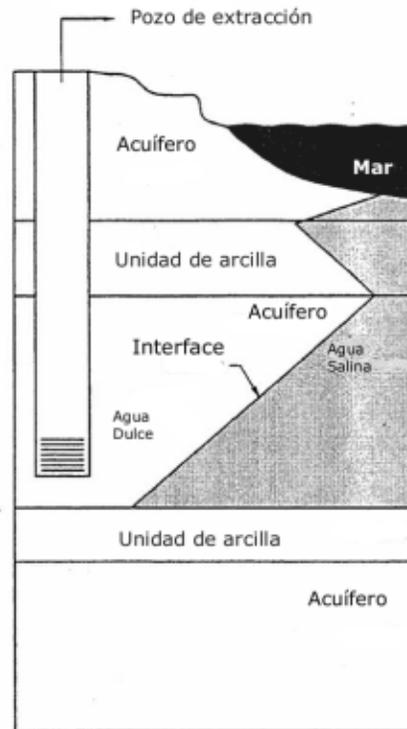


Figura 3.12: Esquema de cuña salina en el mecanismo de movimiento horizontal de la interfase. Adaptado de (Maimone 2002)

mínimos. Ejemplo de este mecanismo se ha observado en zonas de Estados Unidos como Florida, Delaware y New Jersey (Maimone 2002).

3. Cono ascendente de agua salina

La formación de un cono ascendente de agua salina tal y como se observa en la Figura 3.14, ocurre dentro de la zona de captura de los pozos de bombeo. El mecanismo consiste básicamente en el movimiento de agua salina, existente debajo del acuífero o en porciones profundas del mismo, que migra hacia el pozo en forma de embudo. A causa de un incremento en la tasa de bombeo, el cono puede llegar a ser inestable y la interfase aumentaría abruptamente hacia y dentro del pozo. Este es generalmente un problema de intrusión local, experimentado por pozos individuales o campo de pozos. Casos en donde se observa este mecanismo son reportados en Nebraska, Texas, New México y otros (Maimone 2002).

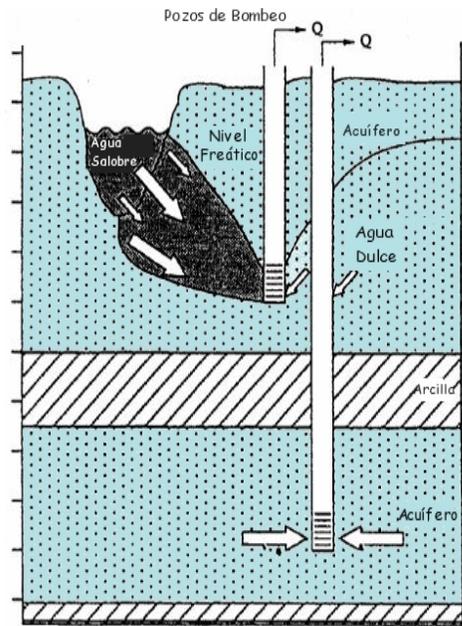


Figura 3.13: Mecanismo de goteo descendente desde fuente superficial a la zona de captura del pozo

3.5. Aspectos Bióticos

Dada la abundancia de sales en ambientes costeros, los ecosistemas que estos albergan son sensibles a las concentraciones de estos componentes y a la cantidad de nutrientes que descargan las fuentes superficiales y subterráneas en aguas costeras (USGS 2003). Específicamente, la descarga del agua subterránea representa un importante porcentaje de las aguas que alimentan ambientes marinos como humedales, lagunas y pantanos. Los gradientes fisicoquímicos que se generan, facilitan la biodiversidad de especies. En general, estas aguas provienen de líneas de flujo regional lo que les da un carácter de excelente calidad química dado que viajan centenares de metros debajo de la superficie, lo que las protege en gran medida de las fuentes contaminantes y de las variaciones estacionales e interanuales en la cuantía de la recarga. Además los acuitardos son vitales para la biota costera dada la lenta velocidad con que transporta el agua lo que permite un mayor aprovechamiento de las especies que allí residen (Manzano 2002).

Generalmente, el hombre extrae el agua subterránea a partir de estructuras artificiales tales como pozos y aljibes. Sin embargo, los acuíferos costeros exhiben formas de

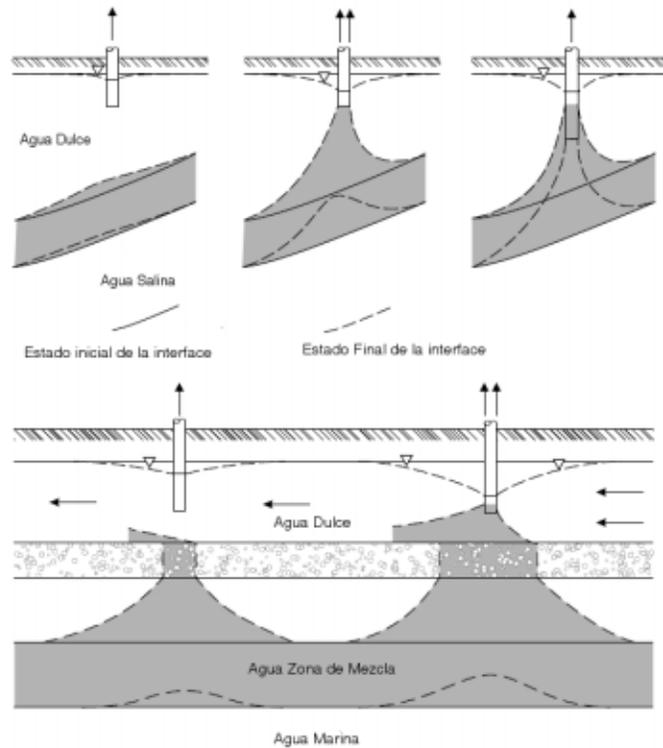


Figura 3.14: Mecanismo de cono ascendente hacia la zona de captura del pozo. Tomado de Custodio (2002).

descarga naturales como surgencias localizadas, cuyo mejor ejemplo son los manantiales, que resultan del cruce de un acuífero con la superficie topográfica del terreno, y surgencias difusas que pueden generar arroyos, lagunas y otros. Estos ambientes siempre tienen asociados ecosistemas terrestres y dada la dinámica de los nutrientes, las redes y cadenas tróficas contemplan esta interacción. La topografía y morfología del terreno vinculada a las zonas de descarga influyen en la formación distintos tipos de humedales: lagunas permanentes o temporales, charcas de inundación estacional o intermitente, criptohumedales, etc. Además, como se menciono en párrafos anteriores las geoformas litorales condicionan la forma de descarga y por ello se generan por ejemplo lagoons litorales cuya salinidad varía significativamente de forma espacial y/o a lo largo del año, marismas en cuyo balance hídrico la descarga de agua dulce a lo largo de su borde interno es cuantitativamente importante, ríos en las cuales el componente subterráneo es también significativo, etc. Los acuíferos costeros permiten

mantener los niveles de agua y balances de agua dulce de estos cuerpos y por lo tanto de los ecosistemas que ellos sostienen. ([Manzano 2002](#))

Capítulo 4

Modelos usados para estudiar y simular la Intrusión Salina

Los modelos para detectar la posición actual y predecir movimientos de la interfase agua dulce-agua salada en un acuífero costero, varían en complejidad de acuerdo a las hipótesis y formulaciones teóricas en las que se fundamenta el modelo, que implican la entrada de datos y parámetros específicos (IGME 1988). Las principales hipótesis para diferenciar los modelos para simular la intrusión salina se presentan en la Figura 4.1. Básicamente la diferencia entre modelos radica en el tipo de hipótesis sobre el tipo de interfaz entre aguas dulces y saladas, como se describe a continuación:

1. Interfaz abrupta o neta: Involucra los principios de la hidrostática dado que esta basada en los principios de fluidos inmiscibles. Uno de sus principales *paradigmas* es el principio de Ghyben-Herzberg. Entre los principales métodos de solución para este tipo de modelos se encuentran los analíticos (IGME 1988), bidimensionales, entre otros. Detalles sobre esta clase de modelos se encuentran en Custodio (1976).
2. Interfaz con zona de mezcla: Esta basada en los principios de la hidrodinámica involucrando parámetros de flujo subterráneo y de transporte de solutos como dispersión, advección y difusión. Esta basada en la hipótesis de fluidos miscibles por lo que involucra un gradiente de densidades en la zona de mezcla. Detalles sobre esta clase de modelos se encuentran en Diersch y Kolditz (2002).

4.1. Modelos basados en la Hidroestática

Los primeros estudios de la relación agua dulce-agua salada en regiones costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben (1889) y Herzberg (1901) res-

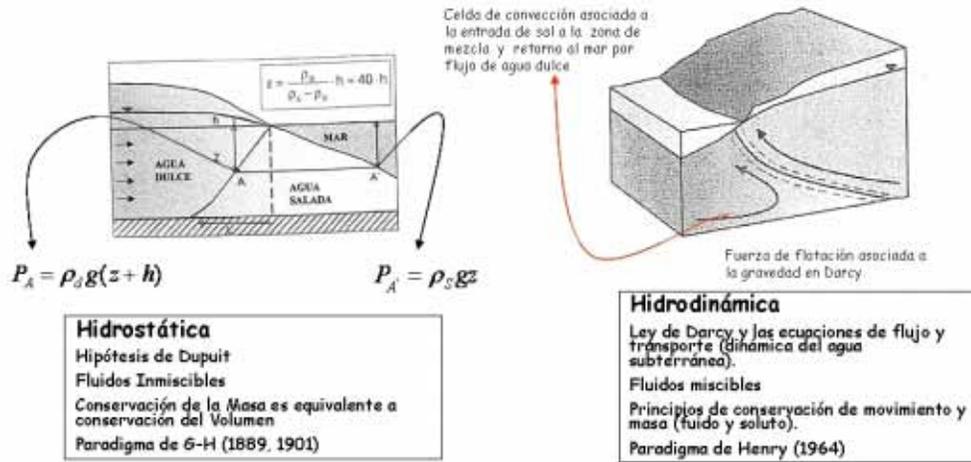


Figura 4.1: Análisis de las principales hipótesis y fundamentos de las formulaciones para modelar la interface agua dulce-agua salada en un acuífero costero: El caso hidroestático cuyas bases se fundamentan en las leyes de los Holandeses Ghyben Herzberg y el caso hidrodinámico cuyo uno de los casos mas representativos es el de Henry (1964)

pectivamente y se basan en el equilibrio estático de las columnas de agua de diferente densidad (Vélez 2004). Este es la formulación más simple en la consideración de una interfase sin zona de mezcla entre aguas dulces y saladas. Las hipótesis bajo este modelo son:

1. Equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad.
2. El flujo de agua dulce es horizontal, el potencial es constante en la vertical.
3. No hay flujo de agua salada.
4. La interfaz es un plano, no hay zona de mezcla

Con estas hipótesis y basados en la condición de equilibrio sobre la vertical del punto A en la Figura 4.2, se tiene la siguiente formulación:

$$(h_d + z) \gamma_d = z \gamma_s \tag{4.1}$$

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_d \tag{4.2}$$

Definiendo,

$$\alpha = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \quad (4.3)$$

$$z = \alpha h_d \quad (4.4)$$

En donde h_d es la cabeza piezométrica de agua dulce medida desde el nivel del mar, z es la distancia desde el nivel del mar hasta la interface agua dulce/agua salada, γ_d es el peso específico del agua dulce y γ_s es el peso específico del agua marina.

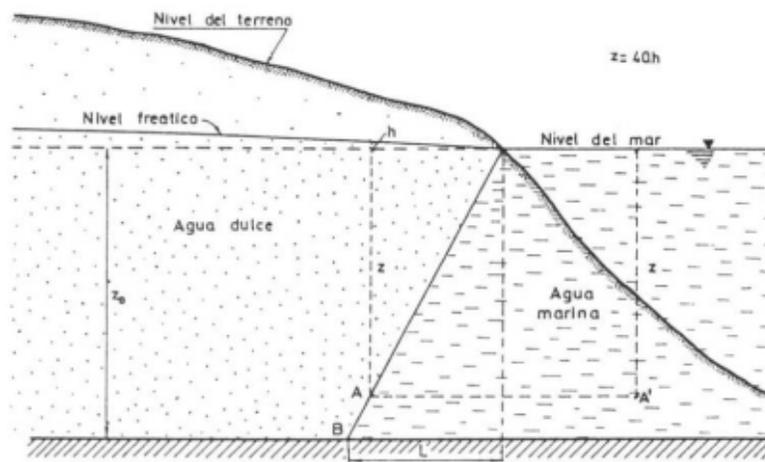


Figura 4.2: Análisis de cuña salina bajo formulación de Ghyben y Herzberg. Tomado de Custodio (1976)

Donde, h_d es la cota sobre el nivel del mar del agua dulce en la vertical del punto A, z es la profundidad bajo el nivel del mar del punto A, γ_d es el peso específico del agua dulce y γ_s es el peso específico del agua salada (1,020-1,030 kg/m³).

El valor de α es aproximadamente de 40 para circunstancias normales (diferencia de densidades agua salada-agua dulce de 25kg/m³) (Custodio 2002). Esto quiere decir que la interfaz se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota de agua dulce sobre el nivel medio del mar en este punto (Vélez 2004). En un acuífero profundo, altamente permeable, con un flujo reducido de agua dulce, la cuña puede penetrar varios kilómetros continente adentro dado que la pendiente del nivel freático es baja. Por el contrario, en un acuífero poco profundo, con una permeabilidad muy baja y con pendientes altas del nivel freático, la cuña es casi inexistente y presenta una pendiente alta (Custodio 1988).

Algunas de las limitaciones que presenta la formula desarrollada por Badon Ghyben y Herzberg son las siguientes:

- Si el acuífero no esta bajo condiciones hidrostáticas, la presión sobre la interface no corresponde con la profundidad del agua, especialmente si existen cuerpos superficiales de agua cercanos a la costa. Casi siempre, la interface bajo equilibrio es mas profunda que la calculada (Custodio 1988), especialmente cerca a la línea de costa en donde se presenta la descarga al mar.
- Si el mar esta en equilibrio, solo se pueden evaluar situaciones de estado permanente.
- Si el ancho de la zona de mezcla es importante, la formula de Ghyben Herzberg resultará en una interface dentro de la zona de mezcla.

Sin embargo la formula de GH ha sido ampliamente usada alrededor del mundo para cálculos simples y puede ser efectiva si se aplica correctamente, evaluando las hipótesis en el caso de aplicación, usando correcciones cuando sea necesario, y evitando situaciones extremas

Con el fin de evitar la primera de las limitaciones señaladas, Hubbert (1940), propuso una modificación en la ecuación de Ghyben-Badon para involucrar los efectos de la cabeza de agua salada en el cálculo de la profundidad de la interfase sobre la vertical de un punto (Figura 4.3):

$$h_d + z) \gamma_d = (h_s + z) \gamma_s \quad (4.5)$$

$$z = \alpha h_d - (1 + \alpha) h_s \quad (4.6)$$

Se estima que si $h_s < 0$ se presenta Intrusión Salina en el acuífero, la interfaz es profunda e inclinada, además de presentar un espesor de zona de mezcla delgado. Por el contrario si $h_s > 0$ se trata de un desplazamiento de agua dulce, una interfaz más alta, con una menor pendiente y un mayor ancho de la zona de mezcla. Este modelo aporito al conocimiento del fenomeno dado que se pudieron diseñar mejores enasayos de campo dado que el tipo de información para definir el fenómeno pudo ser claramente definida.

Glover (1959), propuso una solución exacta en 2-D para un acuífero costero con interfaz sin zona de mezcla y bajo las hipótesis mencionadas en párrafos anteriores, añadiendole en la estimación el flujo y descarga de agua dulce. La superficie de salida del flujo es asumida horizontal (Figura 4.4). El potencial de agua dulce se obtiene a partir del flujo total de agua dulce q_0 , la permeabilidad k del acuífero y el número de equipotencial :

$$h = \frac{\phi q_0}{k} \quad (4.7)$$

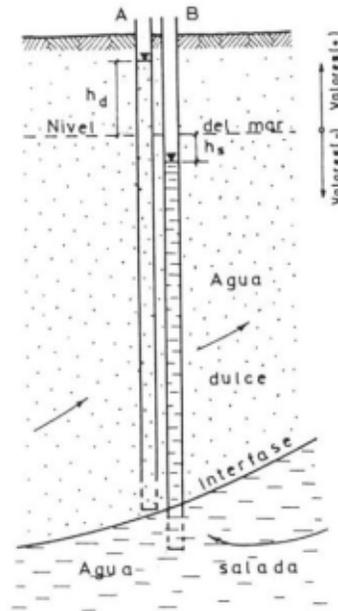


Figura 4.3: Esquema de Hubbert para la modificación de la ecuación de Ghyben-Herzberg. Tomado de Custodio (1976)

La ecuación para la interfaz según este modelo esta dada por la expresión:

$$Z^2 = 2\alpha q_0 \frac{x}{k} + \left[\frac{\alpha q_0}{k} \right] \quad (4.8)$$

El agua escapa al mar por una franja de ancho x_0 , cuyo valor según Glover es:

$$x_0 = \frac{Q_0}{2k\alpha} \quad (4.9)$$

Custodio y Llamas (1976), describen modelos analíticos para calcular la profundidad de la interfase bajo diferentes tipos de configuraciones de tipos de acuíferos (Libres, confinados y semiconfinados), bajo las siguientes hipótesis principales:

1. El acuífero es homogéneo
2. No hay zona de mezcla
3. El flujo cumple los supuestos de Dupuit-Forchheimer de flujo horizontal si se trata de un acuífero libre
4. Es válida la fórmula de Ghyben-Herzberg $h = \beta z$

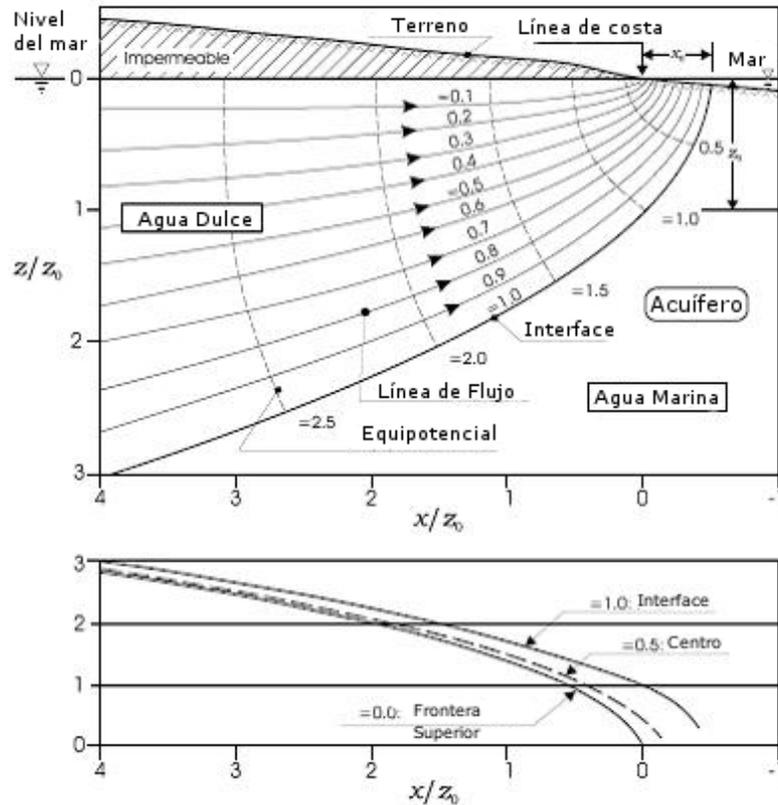


Figura 4.4: Esquema utilizado por Glover para el modelo de Intrusión Salina. Tomado de Custodio (2002)

5. Se cumple la Ley de Darcy

El análisis se realiza en una sección vertical perpendicular a la línea de costa y la formulación está planteada para obtener resultados por unidad de ancho de costa.

4.1.1. Acuífero libre recargado uniformemente por la lluvia

Este es un caso típico de un acuífero libre en estado permanente, recarga uniforme sobre todo el área y condiciones de borde del mar que implican el desarrollo de la cuña (Figura 4.5). Básicamente se presentan formulaciones matemáticas para el nivel piezométrico (h), profundidad de la interfaz (z) y longitud del pie de la cuña (L):

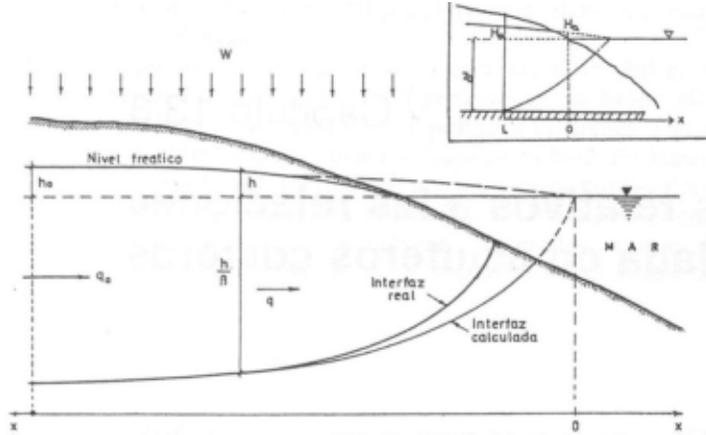


Figura 4.5: Esquema de acuífero libre con recarga constante. Tomado de Custodio (1976)

$$h_0^2 - h^2 = \frac{2q_0x + Wx^2}{k(1 + 1/\beta)} z_0^2 - z^2 = \frac{2q_0x + Wx^2}{k\beta(1 + \beta)} \quad (4.10)$$

Donde, W es la recarga en altura de agua por unidad tiempo, β es la relación de densidades, q_0 es el flujo de agua dulce por unidad de ancho de costa, correspondiente al punto de origen en $x=0$.

Se debe anotar que es posible que el nivel piezométrico alcance su mínimo valor mas allá de la línea de costa debido a la descarga de agua dulce (Figura 4.5), por lo que el valor de L no debería situarse sobre la línea de costa. Sin embargo, en muchos casos no se comete gran error al suponer que la interfaz corta el nivel del mar en la propia línea de costa. También, es posible extrapolar el nivel freático hasta que corte el nivel del mar sin tener en cuenta la recarga que cae sobre el mar (Santing, 1963 en (Custodio y Llamas 1976)). Si el fondo del acuífero está a una profundidad z_0 bajo el nivel del mar y h_a es el nivel piezométrico en cercanías en la costa, puede calcularse la penetración de la cuña tomando $x=0$ en el pie de la misma (Figura 4.5). Así, se reemplaza en la ecuación 4.10 para $x=L$ para $h = h_a$, siendo $h_0 = \beta z_0$

$$L = \frac{-q_0}{W} + \sqrt{\frac{q_0^2}{W^2} + \frac{\beta(1 + \beta)k}{W} \left(z_0^2 - \frac{h^2}{\beta^2} \right)} \quad (4.11)$$

Suponiendo que el nivel freático corta en la línea de costa, se tiene $h_a = 0$ y por tanto:

$$L = \frac{-q_0}{W} + \sqrt{\frac{q_0^2}{W_2 + \frac{\beta(1+\beta)k}{W} (z_0^2)}} \quad (4.12)$$

4.1.2. Acuíferos confinados

Este caso se ilustra en la figura 4.6, se debe evaluar lo que sucede en zonas con y sin cuña salina, aplicando la ley de Darcy para hallar los niveles (h), para posteriormente transformarlos en profundidades de la interfase mediante la formulación de Ghyben-Herzberg y teniendo en cuenta que el flujo por unidad de ancho q_0 es constante, b es el espesor saturado confinado del acuífero y a es el espesor de la capa confinante medida desde el nivel del mar. Se tiene la siguiente formulación:

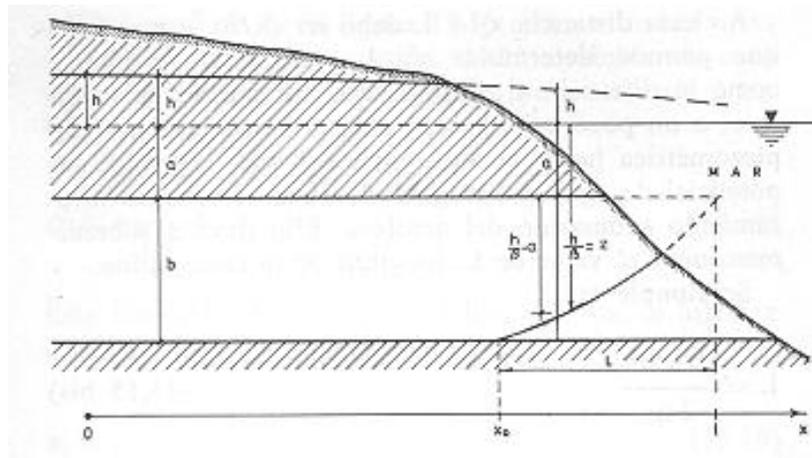


Figura 4.6: Esquema de variables para cálculo analítico de longitud de cuña salina en un acuífero confinado. Tomado de Custodio (1976)

$$b^2 - (z - a)^2 = \frac{2q_0}{\beta k} (x - x_0) \quad (4.13)$$

Esta ecuación es de tipo parabólico. Se debe determinar una distancia $x_0 + L$ en donde $(h/\beta) - a = 0$, para así determinar x_0 . El valor de $L + x_0$ se puede determinar como la distancia al afloramiento submarino del acuífero e igualmente podría extrapolarse el nivel freático hasta una distancia en la que se determine que el potencial de agua dulce

es igual al correspondiente al afloramiento submarino del acuífero. Posteriormente, es posible calcular el valor de L de la siguiente manera:

$$L = \frac{\beta kb_2}{2q_0} \quad (4.14)$$

4.1.3. Acuíferos semiconfinados

Dada su complejidad desde el punto de vista analítico, Custodio y Llamas 1976 proponen calcular la longitud de vertido al mar en un acuífero semiconfinado l (Figura 4.7). Para ello, se analizan la circulación horizontal y vertical en el acuífero por unidad de longitud de costa, para obtener la siguiente expresión:

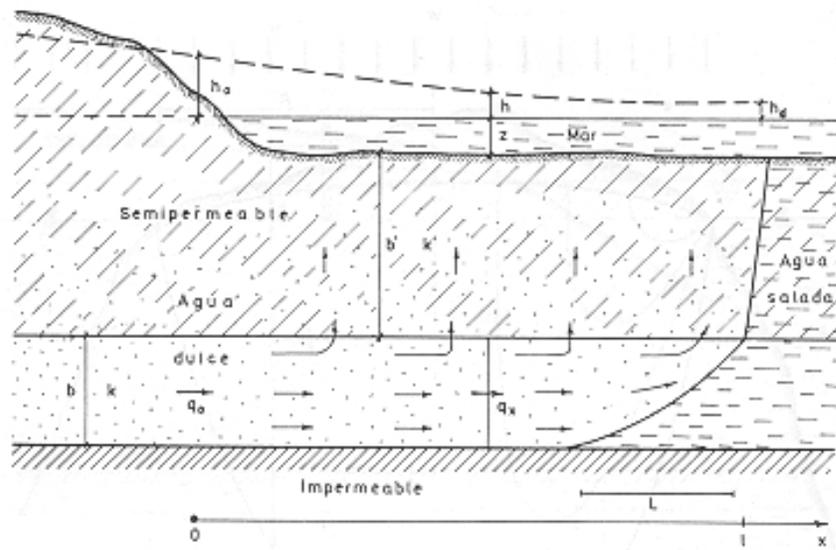


Figura 4.7: Esquema de calculo analítico en acuífero costero semiconfinado. Tomado de Custodio (1986)

$$l = B \ln \frac{h_0 - h_d}{\frac{q_0 b'}{B k'} (h_0 - h_d)} \quad (4.15)$$

Donde

$$B = \sqrt{\frac{kb}{k'/b'}} = \text{Coeficiente de Goteo} \quad (4.16)$$

Y, h_0 es la cabeza de agua dulce en la línea de costa, h_d es el potencial de agua dulce correspondiente al fondo del mar, q_0 es el flujo de agua dulce en el acuífero, b es el espesor del acuífero y b' es el espesor de la capa goteante, k es la conductividad del acuífero y k' es la conductividad de la capa goteante y L es la Longitud de la cuña. Para la solución de esta ecuación es necesario que $l \gg L$, pues si no se cumple esta condición se llega a una ecuación diferencial sin solución exacta. Mayores detalles para la deducción de esta expresión se pueden encontrar en Custodio y Llamas (1976).

4.2. Modelos basados en la Hidrodinámica

En un escenario más realista se observa un equilibrio dinámico en la zona de contacto de aguas dulces y marinas dentro del acuífero, bajo el siguiente proceso:

- Se genera mezcla de ambos fluidos principalmente a través de la dispersión microscópica y macroscópica
- El agua salina es arrastrada hacia el mar por el flujo de agua dulce
- Para mantener el balance de sales, debe haber un flujo de agua salina hacia el acuífero (Figura 4.8).
- Esto desemboca en una celda de convección vertical, como la mostrada en la figura 4.8 y un equilibrio dinámico de la interfase como situación real.

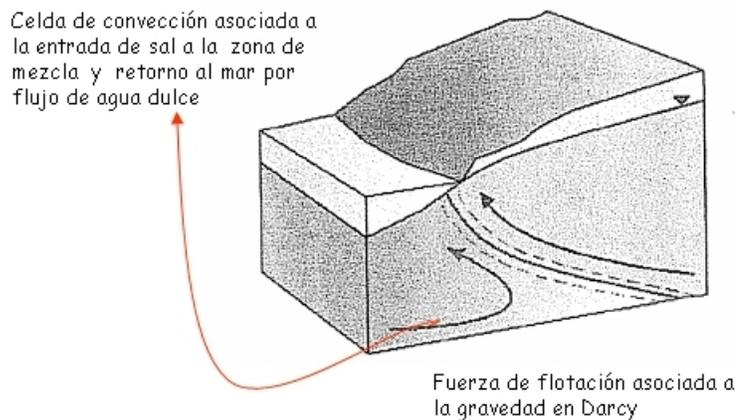


Figura 4.8: Esquema de celda de convección vertical en la intrusión salina en formulación hidrodinámica. Adaptado de Hidalgo (2007)

El flujo salino entrante produce una pérdida de cabeza en el acuífero, y entonces la presión sobre el lado salino de una interfase delgada es menor que el correspondiente a la profundidad bajo el nivel medio del mar. El efecto es magnificado cuando la penetración de agua salina es disminuida por un piso marino fino compuesto de sedimento de baja permeabilidad.

Cooper (1959) desarrolló una teoría para explicar la zona de dispersión y la circulación continua de sal asociada a esta zona, detectada en varias investigaciones de campo realizadas hasta ese momento. La formulación determinada por Cooper (1959) sirvió de base para lo que hoy se conoce como “Modelación de Densidad Variable”. Igualmente, Cooper definió la cantidad de mezcla atribuida a las fluctuaciones de las olas en ambientes marinos.

A partir de allí son muchísimas las aplicaciones que se han venido dando para simular la intrusión a partir de la formulación de densidad variable a través de modelos numéricos. La herramienta de modelación está basada en un conjunto de ecuaciones de balance continuo del flujo y el transporte en el medio poroso que están fuertemente acopladas, presentando un alto grado de no-linealidad debido al comportamiento del material sobre la concentración de sal y temperatura (IGME 1988). Los modelos de agua subterránea con densidad variable tienen incertidumbre adicional a los de densidad constante dado que las velocidades del flujo dependen de la concentración (Langevin et al. 2003). Para detalles más rigurosos sobre la formulación física y matemática de la “Modelación de Densidad Variable” referirse a (Diersch 2002).

Desde la hidrodinámica, la intrusión marina está regida por la ley de Darcy y las ecuaciones de flujo y transporte. Estas tres ecuaciones determinan la dinámica del agua subterránea con un significado físico. Los principios de conservación de cantidad de movimiento y masa son de gran importancia para entender, caracterizar y modelar la intrusión salina bajo la formulación de densidad variable (Hidalgo et al. 2007)

4.2.1. La ley de Darcy

Formulando la ley de Darcy en términos de la segunda ley de Newton, se encuentra que sobre el medio poroso actúan básicamente tres tipos de fuerzas (Figura 4.9):

$$V = \frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g) \quad (4.17)$$

Siendo $V[LT^{-1}]$ la velocidad de Darcy, $k[L^2]$ el tensor de permeabilidad hidráulica, $\mu[MLT^{-1}]$ es la viscosidad dinámica, $[ML^{-3}]$ es la densidad del fluido y $g[LT^{-2}]$ es el vector gravedad.

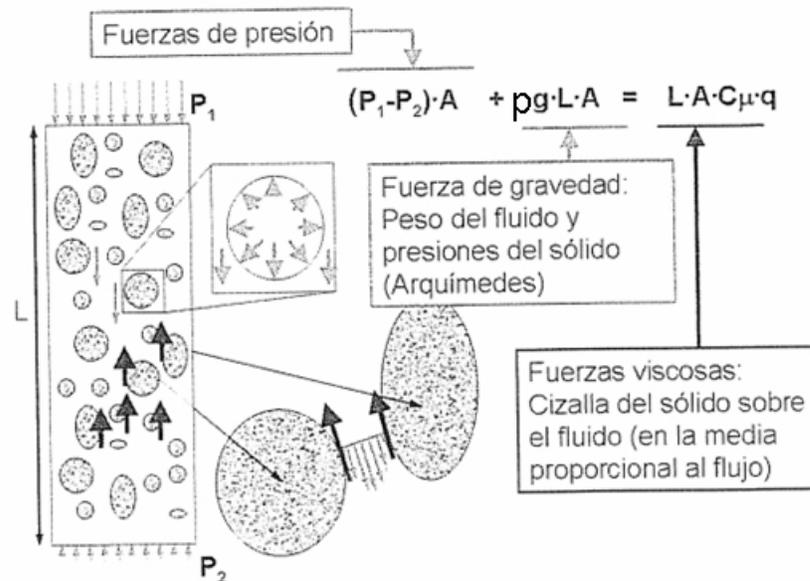


Figura 4.9: Fuerzas en el medio poroso en equilibrio: Fuerzas de presión, gravitatorias y viscosas. Tomado de Hidalgo (2007)

1. **Fuerzas de Presión:** Involucran la conservación cantidad de movimiento del fluido y actua directamente sobre este.
2. **Fuerzas de Gravitación:** Involucran el peso del agua mas la resultante de las fuerzas normales ejercidas por los granos
3. **Fuerzas de Viscosidad:** Fuerzas de cizalla proporcionales a la velocidad y viscosidad del fluido.

Es decir que el fluido se mueve bajo la acción de las fuerzas de gravedad y presión, oponiendosen al movimiento las fuerzas viscosas que son proporcionales a la velocidad y representan la resistencia al flujo. La fuerza de flotación esta relacionada con el término que involucra la gravedad. Teniendo en cuenta que la cabeza equivalente de agua con la misma presión medida se puede formular como:

$$h_f = -\frac{p}{\rho_0 g} + z \tag{4.18}$$

Siendo h_f la cabeza equivalente de agua dulce y ρ_0 , la densidad del fluido mas denso. Se reemplaza la ecuación 4.18 en la formulación de la densidad de Darcy (ecuación 4.17), y se obtiene:

$$V = -\frac{k}{\mu_o} g \left(\nabla h_f + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \nabla z \right) \quad (4.19)$$

El término $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$ representa una fuerza en dirección vertical dependiente del *Gradiente de Densidades*, es decir la fuerza de flotación que experimenta un fluido de densidad ρ inmerso en otro de densidad ρ_0 (IGME 1988). En síntesis las implicaciones de esta formulación son las siguientes (Hidalgo et al. 2007):

1. Efecto tridimensional (Topografía Fondo y flujos laterales)
2. El flujo no se puede representar como el gradiente de un campo escalar (No hay potencial hidráulico)
3. La densidad depende de la concentración

Según Voss y Souza (1987), para el rango de concentración que se encuentra en la Intrusión Salina una aproximación lineal es suficiente y generalmente es del siguiente tipo:

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta_w), \rho = \rho_0 e^{\beta_w \omega} \quad (4.20)$$

Donde β_w es una constante empírica, que según Baxter y Wallace (1916) se acerca a 0.7143 para concentraciones de sal variando desde 0 hasta 35 kg/m³.

4.2.2. Balance de Masa del fluido: Ecuación de flujo

La masa de fluido por unidad de volumen de medio se representa como:

$$M_f = \rho \theta \quad (4.21)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua, es decir el volumen de fluido por unidad de volumen del acuífero.

La formulación de la conservación de la masa en un fluido esta dada por:

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho V) + \rho_0 Q \quad (4.22)$$

Donde $\rho_0 Q$ es el término que representa fuentes y sumideros en forma líquida. Siendo $Q[L^3 T^{-1} L^{-3}]$ el volumen de fluido por unidad de tiempo y volumen de acuífero y ρ_0 la densidad fluido. Se necesita no solo saber el caudal extraído o inyectado sino también su densidad para lograr modelar tanto agua dulce como fluido con cierta cantidad de sal (Hidalgo et al. 2007). El primer miembro representa la variación de

la masa con el tiempo, en un volumen infinitesimal. El término ρV representa la variación de masa debida a los flujos entrantes y salientes del volumen infinitesimal. El caudal de recarga, Q , tiene en cuenta las adiciones externas de fluido, por unidad de volumen del medio poroso (IGME 1988). Esta ecuación representa el equilibrio entre las cantidades que salen y entran y el almacenamiento en el sistema. El fluido en este caso esta conformado por el componente agua y el componente sal.

El almacenamiento de fluido se produce tanto por la compresibilidad del medio poroso y del propio fluido como por las variaciones de sal disuelta. Si se expande en terminos de agua dulce y fracción masica de sal ω , se obtiene:

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = \rho S_s \frac{\partial h_f}{\partial t} + \rho \beta_w \theta \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (4.23)$$

Donde $S[L^{-1}]$ es el coeficiente de almacenamiento específico.

Es necesario imponer condiciones de frontera a la ecuación del flujo para poder resolverla. Estas condiciones establecen una relación entre el flujo externo y el interno en la frontera del sistema. Las condiciones de contorno son de caracter tanto de flujo como másico y tiene la siguiente forma matemática:

$$\rho q \cdot n = \rho_0 q_b \cdot n + j_s \quad (4.24)$$

Donde n es el vector normal al contorno, y $q_b[LT^{-1}]$ es el flujo en el contorno y $j_s[ML^{-2}T^{-1}]$ es el flujo de sal pura expresada por unidad de superficie. Dentro de la modelación es posible especificar el flujo en el contorno o prescribir el valor de la variable de estado, es decir utilizar fronteras en donde se conoce la presión como ríos, el mar, humedales y otros. Cuando se trabaja con cabezas equivalentes de agua dulce se debe ser cauteloso ya que los niveles piezométricos medidos dependen del porcentaje de mezcla y no corresponde al medido (Custodio y Llamas 1976).

Cuando se especifica el flujo en el contorno se debe tener en cuenta que este tiene un caracter másico y no volumétrico como en el caso de la densidad constante debido al caracter de la Ecuación 4.24. Recientemente se han venido utilizando condiciones de frontera mixtas en donde el flujo másico depende de la variable de estado en el contorno y es proporcional al flujo externo (Hidalgo et al. 2007)

4.2.3. Balance de Masa del soluto: Ecuación de Transporte

Al igual que en la ecuación de flujo se representa la conservación de la masa de fluido, en esta ecuación se representa la conservación de la masa del soluto en el acuífero . La

conservación de la masa de soluto por unidad de volumen de acuífero $\rho\theta\omega$ se expresa como:

$$\frac{\partial}{\rho\theta\omega}\partial t = -\nabla \cdot (\rho q\omega) + \nabla \cdot (\rho (D_m + D) \nabla\omega) + \rho_0 Q\omega_0 + m_s \quad (4.25)$$

donde $D_m[L^2T^{-1}]$ es el coeficiente de difusión molecular, $D[L^2T^{-1}]$ el tensor de dispersión hidrodinámica y ω_0 la fracción másica de sal de la fuente de sal o sumidero de soluto y $m_s[ML^3T^{-1}]$ representa las fuentes o sumideros de sal pura. La variación de la masa de soluto por unidad de acuífero se debe a dos factores: a variaciones de concentración y variaciones de volumen de fluido θ . El flujo másico por difusión-dispersión esta descrito según la ley de Fick. Según Hidalgo (2007), la dispersión es un factor decisivo en la modelación de la intrusión salina desde la hidrodinámica, dado que afecta la forma y penetración de la cuña: Una dispersión alta esta relacionada con una zona de mezcla ancha y una penetración poco profunda de la interfase, mientras que una dispersión baja involucra lo contrario. Según Abarca (2007), el ancho de la zona de mezcla es proporcional a la razón entre la dispersividad longitudinal y transversal. Para tratar de definir mejor este aspecto, Voss y Provost (2002) proponen utilizar coeficientes de dispersión longitudinal y transversal diferentes.

Para resolver la ecuación de conservación de solutos es necesario imponer condiciones de frontera de flujo másico. Estas condiciones de frontera se refieren al flujo másico que pasa a través de las fronteras del modelo. Matemáticamente se expresa en la ecuación 4.26:

$$(\rho\omega q - \rho D \nabla\omega) \cdot n = \rho_0 q_b \omega_0 + j_s \quad (4.26)$$

Según Hidalgo (2007), se suele cometer un error al imponer la condición en la frontera acuífero-mar como una concentración constante, dado que introduce gran cantidad de solutos en el sistema por mecanismos difusivos-dispersivos (Konokow et al. en (Hidalgo et al. 2007)). La forma correcta de simular el mar es usando condiciones de flujo másico con concentración dependiente de la dirección del flujo, la cual determina que si se trata de una entrada, el fluido tendra la concentración externa y si se trata de una salida, el fluido tendra la concentreración en el acuífero. La comparación entre ambos tipos de fronteras se puede observar en la figura 4.10.

4.2.4. El problema de Henry

Uno de los casos mas representativos o *paradigmas* de la intrusión salina bajo la formulación de Densidad Variable fue desarrollada por Henry en el año de 1964 (Henry

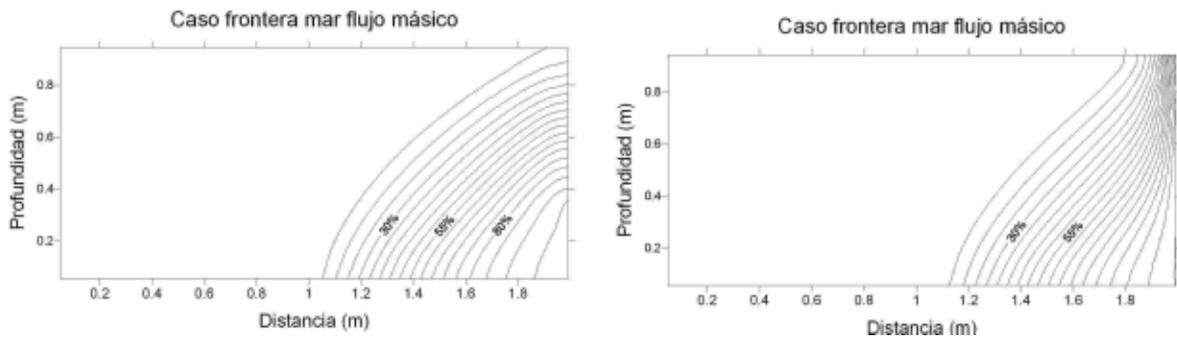


Figura 4.10: Comparación de resultado de líneas de isoconcentración de sal (del 10% al 100%) en un modelo con frontera de flujo másico con concentración de pendiente de la dirección del flujo y de concentración constante asociada al mar

1964) apoyado en los planteamientos de Cooper (1959). En este caso se muestra como la Intrusión Salina en acuíferos costeros define una estratificación natural y estable de la densidad cuando el agua salina de mayor densidad penetra debajo del agua dulce (Abarca et al. 2007), la solución encontrada aportó enormemente a la construcción de los conceptos hidráulicos de la Intrusión Salina como la entiende la ciencia hoy en día. El problema de Henry consiste básicamente en una sección transversal perpendicular a la línea de costa; el modelo conceptual del problema es simple, se trata de un acuífero confinado de forma rectangular, conductividad isotrópica homogénea, cuyas condiciones de frontera consisten en (Figura 4.11):

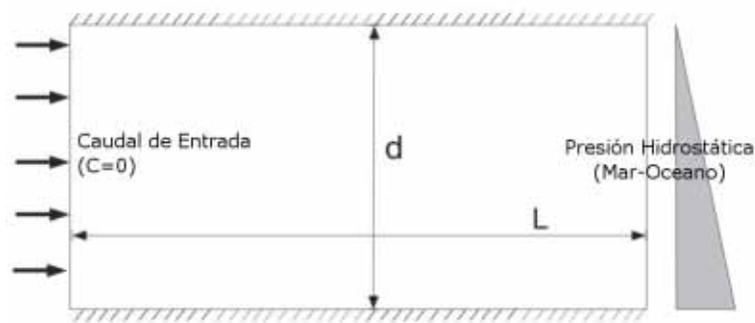


Figura 4.11: Esquema de Modelo Conceptual problema de Henry

- Fronteras de no flujo en la capa superior y de fondo: Para garantizar que el acuífero es de carácter confinado

- Flujo constante a lo largo de la frontera tierra adentro:
- Presión hidrostática constante en la frontera marina

Esta configuración ejemplifica la penetración característica de la cuña salina sobre el fondo de acuíferos costeros. El problema original de Henry considera advección y difusión, mas no dispersión. Lo interesante de este problema es que Henry (1964), halló una solución semianalítica basada en series infinitas y por ello ha sido posible usar este caso, junto con otros como el de Elder (1967), como referencia para evaluar la veracidad de códigos numéricos utilizados en la modelación de la densidad variable como en el caso SUTRA (Voss y Provost 2002) y SEAWAT (Langevin et al. 2003). La solución semianalítica ha sido corroborada por varios autores entre ellos Segol (1994). De otro lado, y mas recientemente, Dentz et al. (2005), propusieron un metodo de perturbación, en el cuál la solución del problema específico de Henry depende de tres parámetros adimensionales.

Tabla 4.1: Valor de parámetros de entrada para el problema de Henry (1964)

| Parámetro | | Valor | Unidades |
|-----------------------|--|---------|---------------------|
| L | Longitud sección transversal | 2 | m |
| d | Espesor | 1 | m |
| n | Porosidad | 0.35 | |
| k | Conductividad | 864 | m/d |
| ρ_s | Densidad agua marina | 1025 | kg/m ³ |
| ρ_d | Densidad agua dulce | 1000 | kg/m ³ |
| Q_r | Caudal de recarga | 5.702 | m ³ /d |
| ω_d | Concentración de entrada | 0 | mg/l |
| ω_{mar} | Concentración en el mar | 350000 | mg/l |
| $\alpha_T - \alpha_L$ | Dispersividades longitudinales y transversales | 0 | m |
| D_m | Coficiente de difusión molecular | 1.62925 | m ² /día |

$$a = \frac{q_b}{K\epsilon} \quad b = \frac{D_m n}{q_b d} \quad \zeta = \frac{L}{d} \quad (4.27)$$

Donde q_b es la tasa de recarga, K es la conductividad, ϵ es el parámetro contraste de densidad, D_m es el coeficiente de difusión molecular, n es la porosidad, d el espesor específico y L la longitud del acuífero.

Problema de Henry Caso Difusivo: Líneas de isoconcentración de sal

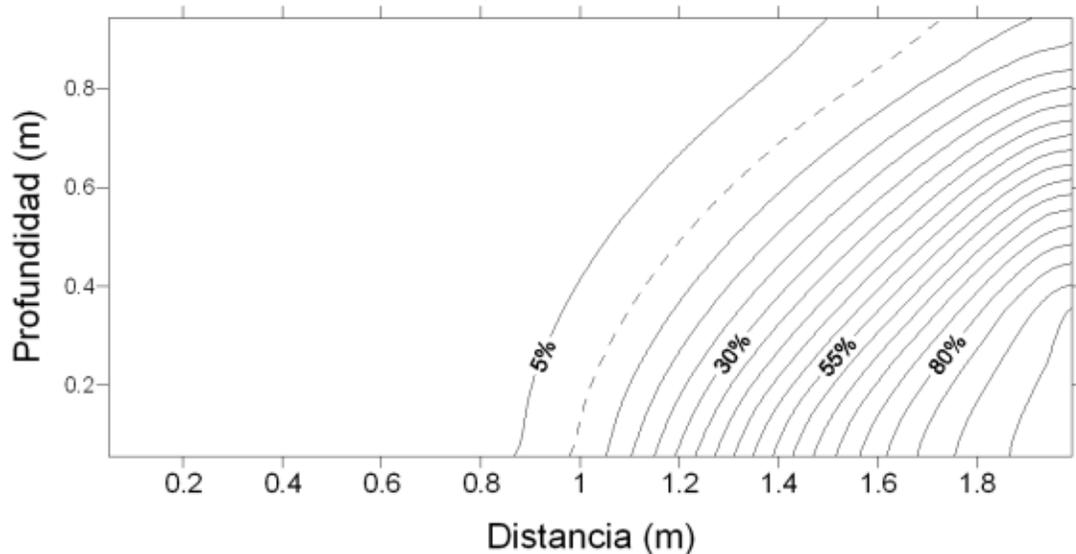


Figura 4.12: Isolíneas de concentración de sal en el problema de caso difusivo Henry

El parámetro a compara fuerzas viscosas (q_b/K) y boyancia (ϵ), b corresponde al número de Peclet, que compara fuerzas advectivas y difusivas del flujo de sal y ζ es el factor de forma. La solución hallada analíticamente por Henry (1964) corresponde a los parámetros $a=0.263$, $b=0.1$ y $\zeta = 2$.

Según Abarca (2006), algunas de las limitaciones del problema de Henry son:

1. Considera que la zona de mezcla entre aguas dulces y saladas es el resultado de una difusión constante: El ancho y forma de la zona de mezcla no se parecen a las observadas en campo. Esta conclusión se argumenta en una serie de análisis de perfiles verticales de salinización en acuíferos costeros del Mundo, para mayor detalle referirse a Abarca (2006).
2. El coeficiente de difusión aplicado es muy alto

4.2.5. Métodos Numéricos usados en modelos hidrogeológicos

Hay tres grandes familias de métodos numéricos de discretización para la modelación del agua subterránea (Hidalgo et al. 2007):

1. Los métodos Eulerianos: Comprenden los elementos finitos, diferencias finitas y elementos mixtos. Utilizan una grilla fija. Integran la ecuación de balance sobre los elementos de la grilla, resultando en un conjunto de ecuaciones discretas. La ventaja de este tipo de métodos es que garantizan que la ecuación escogida se cumpla tanto a nivel local (Celdas) como global (Dominio). Se pueden considerar condiciones de frontera fácilmente conformando el término fuente sumidero de las ecuaciones discretas. Estos métodos funcionan bien para simular la intrusión salina, aunque pueden llegar a ser computacionalmente costosos (Hidalgo et al. 2007) entre los modelos mas notorios que utilizan estos métodos se encuentran modelos de diferencias finitas: SEAWAT (Langevin et al., 2008), MOCDENS3D (Oudde Essink, 1999) y MODHMS (HydroGeoLogic, 2002), y de Elementos Finitos : SUTRA (Voss y Provost, 2002) y FEFLOW (Diersch, 2004), entre otros.
2. Los métodos Lagrangianos: Se representa al fluido como un conjunto discreto de partículas que se mueven con la velocidad del agua, para cada partícula se escoge un sistema de coordenadas que sigue a la partícula. En este sistema solo se da la difusión, dispersión y reacción mas no la advección. Sí se considera a cada partícula como un nudo de la discretización espacial, la grilla va cambiando en cada paso de tiempo y se puede llegar a tener mallas muy irregulares (Hidalgo et al. 2007). Esto puede generar un coste computacional alto por lo que se opta muchas veces por grillas rígidas.
3. Lagrangianos y los eulerianos-Lagrangianos o Mixtos: Cuando se usa una malla fija con los métodos lagrangianos resultan métodos como el de las características (MoC) y el método modificado de las características que utiliza partículas en una grilla rígida de elementos o diferencias finitas (MMoC). El modelo SEAWAT (Langevin et al. 2003) permite utilizar el MMoC. Este método es robusto por el manejo del término advectivo, pero tienen problemas de conservación de masa a nivel local y global debido a las interpolaciones entre partículas que no tienen en cuenta este aspecto. Uno de los métodos que surge como solución a estos problemas es el ELLAM (Eulerian-Lagrangian localized adjoint method) (Celia et al. (1990) en Hidalgo et al. (2007)), integra la ecuación de transporte tanto en el tiempo como en el espacio, y utiliza ecuaciones de forma que dependen tanto de tiempo como del espacio. Las funciones se escogen de forma tal que son constantes en líneas características de flujo a través del tiempo. Estas funciones de forma respaldan una interpolación con sentido físico. el método conserva la masa a nivel global. La desventaja es que no hay un código de densidad variable que utilice el método debido a lo relativamente joven del método(Hidalgo et al. 2007).

4.2.6. Modelos Numéricos representativos

Las soluciones analíticas modelan efectivamente escenarios teóricos simples, pero los métodos numéricos permiten modelar escenarios totalmente complejos, irregulares y heterogéneos. El más ampliamente usado de los programas de modelos numéricos de flujo subterráneo es el programa de la USGS llamado MODFLOW, originalmente documentado por McDonald y Harbaugh (1984), basado en métodos eulerianos, el cual usa métodos de diferencias finitas para simular flujo tridimensional (Harbaugh et al. 2000). Dentro de una grilla compuesta por celdas, MODFLOW resuelve iterativamente las siguientes ecuaciones diferenciales para cada nodo en cada celda (Harbaugh et al. 2000)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.28)$$

Donde K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son las conductividades hidráulicas, y, x , y , z son los ejes coordenados, asumidos como paralelos a los ejes de mayor conductividad, h representa la cabeza piezométrica, W es un flujo por unidad de volumen que representa fuentes y sumideros de agua, con $W < 0$ representando flujo de salida del sistema de aguas subterráneas y $W > 0$ flujo de entrada. S_s el almacenamiento específico del material poroso.

1. SEAWAT (Langevin et al., 2008)

SEAWAT es el software usado en las simulaciones presentadas en esta tesis, por ello se hace un especial énfasis en este modelo y en describir los fundamentos físicos y matemáticos que lo sustentan. El software SEAWAT está diseñado para simular problemas hidrogeológicos que involucran flujo subterráneo con densidad variable y transporte de solutos (Langevin et al. 2003; Cheng y Ouazar 2004). El SEAWAT ha sido aplicado mundialmente para evaluar casos tales como intrusión salina (Masterson y Garabedian 2007; Larabi et al. 2008; Dausman y Langevin 2005; Rozell 2007; Thoma y Nelson 2008) descargas submarinas de agua subterránea (Langevin 2001; Mulligan et al. 2007; Robinson et al. 2007), almacenamiento y recuperación de acuíferos, migración de agua salada e hidrología de humedales costeros (Langevin et al. 2002). El código fuente, documentación, y el software están disponibles al público en página Web de la United States Geological Service (USGS) (water.usgs.gov/ogw/seawat/). La ecuación (4.28) asume fluido de densidad constante, que no puede ser usada para el fenómeno de intrusión salina. SEAWAT se desarrolló como un modelo de flujo de densidad variable (Langevin et al. 2003) ya que utiliza MODFLOW-2000 (Harbaugh et al. 2000) y MT3DMS (Harbaugh et al. 2000), una de las aplicaciones más recono-

cidas para transporte de solutos en aguas subterráneas, en un único programa que resuelve acopladamente las ecuaciones de flujo subterráneo y transporte de solutos. Las ecuaciones de flujo y transporte son articuladas de dos maneras:

1. Las velocidades que resultan de resolver la ecuación de flujo son usadas en el termino advectivo de la ecuación de transporte de solutos.
2. Se resuelve la ecuación de transporte de solutos , se usa una ecuación de estado para calcular las densidades del fluido a partir de la actualización de las concentraciones de solutos. Entonces, estas densidades del fluido son usadas directamente en la próxima solución de la ecuación de flujo subterráneo con densidad variable.

Dentro de una grilla de celdas, SEAWAT resuelve iterativamente la siguiente ecuacion diferencial parcial para el nodo de cada celda:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{d\alpha} \left(\frac{\partial h_d}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_d}{\rho_d} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{d\beta} \left(\frac{\partial h_d}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_d}{\rho_d} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{d\gamma} \left(\frac{\partial h_d}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_d}{\rho_d} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right) \right) + \rho_s q_s = \rho S_f \frac{\partial h_d}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Donde α , β y γ son ejes coordinados ortogonales, alineados con las principales direcciones de la permeabilidad; t es el tiempo; C es la concentración de soluto; ρ es la densidad natural del agua del acuífero; ρ_d es la densidad del agua dulce; Z es la elevación del punto de medida; ρ_s es la densidad de la fuente o sumidero de agua; y q_s es la tasa de flujo volumétrico de fuentes y sumideros por unidad de volumen del acuífero. Adicionalmente, K_d es la conductividad hidráulica de agua dulce equivalente, definida como:

$$K_{d\alpha} = \frac{k_\alpha \rho_d g}{\mu_d} \quad (4.30)$$

Donde k_α es la conductividad hidráulica medida en la dirección α , g es la aceleración debida a la gravedad, y μ_d es la viscosidad de el agua dulce bajo condiciones estándar (Langevin et al. 2003). Por otra parte, S_d es el almacenamiento específico equivalente de agua dulce el cual es definido como:

$$h_d = \frac{\rho}{\rho_d} h \frac{\rho - \rho_d}{\rho_d} Z \quad (4.31)$$

y

$$h = \frac{\rho_d}{\rho} h_d \frac{\rho - \rho_d}{\rho_d} Z \quad (4.32)$$

Comparando las ecuaciones 4.28 y 4.29: los primeros tres términos sobre el lado izquierdo de cada ecuación representa el flujo neto al otro lado de la cara de la unidad de volumen, el cuarto término de este lado representa el flujo desde fuentes y sumideros dentro de la unidad de volumen, y el primer término del lado derecho de cada ecuación representa la tasa de tiempo de cambio de agua almacenada dentro de la unidad de volumen. La más importante diferencia es que la ecuación 4.28, usa flujo volumétrico mientras que la ecuación 4.29 usa flujo de masas para estimar con densidad variable. El segundo termino de la derecha en la ecuación 4.29, el cual no tiene correspondiente término en la ecuación 4.28, representa la tasa de cambio de la masa del fluido debido a cambios en la concentración (Rozell 2007). Si no hay cambio de soluto y la densidad es constante, este término es igual a cero y las ecuaciones 4.28 y 4.29 se convierten equivalentes funcionalmente.

En el caso de las simulaciones de intrusión salina, el flujo de densidad variable es acoplado con transporte de solutos y se asumen cambios de densidad para ser completamente dependientes de la concentración de solutos (es decir la temperatura y presión son ignorados). Esta relación es definida como:

$$\rho = \rho_d - \frac{\partial P}{\partial C} C \quad (4.33)$$

Y el usuario debe proveer valores para ρ_d , la densidad de agua dulce, y $\frac{\partial P}{\partial C}$, típicamente equivale a 0.7143 para simulaciones estándar de agua dulce/ agua salada (Langevin et al. 2003).

2.FEFLOW (Diersch, 2004)

El software FEFLOW es un paquete comercial para modelar agua subterránea con elementos finitos y fue desarrollado por WASY (Alemania). El código resuelve flujo subterráneo, transporte de solutos, transporte de solutos dependiente de la densidad, transporte y calor acoplados y flujo saturado y no saturado. El software funciona por licencias que varían con el precio de acuerdo a las necesidades del usuario. La versión más barata incluye flujo 2D, mientras la más costosa incluye Flujo 3D y procesos de Transporte y Calor. Al igual que el SEAWAT, el FEFLOW puede ser corrido bajo estado estacionario o permanente. Se presentan aplicaciones para simular la cuña salina en países como la India (Kumar et al. 2007), California-USA (Loáiciga y Pingel 2002), Massachusetts-USA (Michael et al. 2005), entre otros.

3.MOCDENS3D (Oudde Essink, 1999)

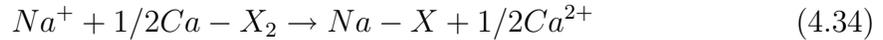
El software MOCDENS3D puede simular flujo de agua subterránea y acoplar el transporte de solutos en medios porosos. El código está basado en el programa tridimensional de diferencias finitas producido por la USGS llamado MOC3D, el cual es de dominio público. Las diferencias de densidad para este caso fueron tomadas dentro de la formulación matemática. Además los términos de cabezas de agua dulce y boyancia son introducidos. Como resultado, es posible simular flujo no estacionario de agua subterránea dulce, salobre y salina en acuíferos costeros. El MOCDENS3D es similar al SEAWAT: el primero usa MOC3D para el transporte de solutos, mientras que el segundo usa MT3DMS. El MOCDENS3D ha sido usado en el Acuífero de Ravenna (Italia) (Giambastiani et al. 2007), en acuíferos costeros de Bélgica (Van Meir y Lebbe 2002) y en Holanda para asesorar la respuesta del acuífero ante el aumento del nivel del mar en Holanda (Oudde E. (1999) en Cheng). Algunos de los parámetros del modelo son: Condiciones iniciales, condiciones de frontera, propiedades del acuífero en cada nodo, descriptores de grilla y ecuaciones lineales de los parámetros que relacionen la densidad y la viscosidad del fluido para la concentración de solutos.

4.MODHMS (HydroGeoLogic, 2002)

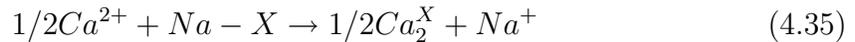
MODHMS es un amplio sistema de modelado hidrológico que está unido al MODFLOW para incluir la zona no saturada, la escorrentía superficial, y las características canal/agua superficial. Las rutinas de transporte de contaminantes también son incorporadas para cálculos de destinos y transporte en sistemas porosos únicos o duales. El acoplamiento de la densidad del campo de flujo con concentraciones de algunas o todas las clases proporciona un amplio análisis de las capacidades para problemas complejos en costas. Las capacidades de MODFLOW son extendidas por el MODHMS para resolver la ecuación de Richards para flujo subterráneo tridimensional saturado y no saturado, acoplados con las ecuaciones de onda difusiva para escorrentía bidimensional y flujo en un canal unidimensional (incluyendo efectos de escala, almacenamiento de encharcamiento, asignación de ruta y estructuras hidráulicas). Algunas de las aplicaciones más notorias se dan en el Valle Pioneer en Australia (Werner y Gallagher 2006) para generar mapas de potencial de intrusión salina y en el Distrito Administrativo del Agua en el Sur de la Florida (Panday et al. (2004) en Cheng (2004)).

4.2.7. Hidrogeoquímica relacionada con la cuña de agua salina en el acuífero

En el agua marina los iones dominantes son Na^+ y Cl^- , y los sedimentos en contacto con agua marina podran adsorber en gran parte el Na^+



Donde X indica el coeficiente de intercambio del suelo. El sodio es retenido por el intercambiador y el Ca^{2+} es liberado. Así, el agua subterránea cambia de tipo de agua $NaCl$ a $CaCl_2$. El proceso inverso se da cuando el flujo de agua dulce es mucho mayor que el de agua salada:



Donde se toma Ca^{2+} del agua, en cambio de Na^+ , resultando un tipo de agua $NaHCO_3$. Por ello, la calidad del agua puede indicar un ascenso de agua salina en pozos, o al contrario un flujo de agua dulce suficiente para evitar la intrusión de agua salina ([Appelo 1993](#)).

Las muestras de agua subterránea en áreas costeras pueden mostrar un excedente de Ca^{2+} lo cuál indica intrusión de agua salina, o un excedente de Na^+ lo cual indica un flujo suficiente de agua dulce conteniendo este avance. Las reacciones químicas en los desplazamientos de agua dulce/agua salada pueden ser deducidos calculando una composición basada en la mezcla conservativa de ambos fluidos, y comparando las concentraciones conservativas con aquellas encontradas en el análisis de agua. La concentración de un ión i , por mezcla conservativa de agua dulce y salada es:

$$m_{i,mezcla} = f_{mar} * m_{i,mar} + (1 - f_{mar}) * m_{i,dulce} \quad (4.36)$$

Donde, m_i es la concentración de i (mmol/l), f_{mar} es la fracción de agua de mar en la mezcla, que esta generalmente basada en la concentración de Cl^- en la muestra ya que este es de caracter conservativo. La ecuación para hallar la fracción de agua de mar en la mezcla tiene la siguiente forma:

$$f_{mar} = \frac{m_{Cl^-,muestra} - m_{Cl^-,dulce}}{m_{Cl^-,mar} - m_{Cl^-,dulce}} \quad (4.37)$$

Los iones en el agua dulce cerca de la costa están frecuentemente asociados a rocios de mar, y únicamente Ca^{2+} y HCO_3^- son adicionados debido a la disolución de la calcita.

4.3. Modelos y Cambio Climático

La definición de escenarios que permitan explorar las posibles condiciones de futuros desconocidos y plantear tanto a nivel físico como socioeconómico un espectro de posibles situaciones que permitan a técnicos y decisores considerar las implicaciones del cambio climático sobre el recurso hidrogeológico respecto a las situación actual, es una manera eficiente de conectar las herramientas de modelación con las futuras políticas de gestión y planificación del agua subterránea en zonas costeras. A continuación se hace una descripción de los principales escenarios propuestos por el IPCC para evaluar el cambio global ([Arnell 2004](#)):

1. CCC (Constant Composition Commitment): Compromiso de Composición Constante, muestra el hipotético e imposible escenario donde se congelan de inmediato todas las emisiones de gases de invernadero y la atmósfera permanece con su composición actual. Este escenario se utiliza como muestra científica y no como una posibilidad. La temperatura media global y el nivel del mar continuarán debido a la inercia termal del océano. El calentamiento podría exceder 1°C. Y el pronóstico para el año 2400 es de 2° a 6°C. Par el nivel del mar, el CCC es de 10 centímetros por siglo (con rangos de 1 a 30 centímetros por siglo). Par evitar estos cambios se necesitaría una reducción de las emisiones a un nivel sustancialmente menores a los niveles actuales. El alza del nivel del mar sería de todos modos imposible de evitar.
2. FAMILIA A1: Describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica:
 - A1FI: Utilización intensiva de combustibles de origen fósil.
 - A1T: Utilización de fuentes de energía de origen no fósil.
 - A1B: Utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (entendiéndose por “equilibrada” la situación en la que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares).

3. FAMILIA A2: Describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
4. FAMILIA B1: Describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.
5. FAMILIA B2: Describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional

A escala mundial, Ranjan et al (2006) proponen investigar la relación entre el cambio climático y las pérdidas de agua subterránea dulce en acuíferos costeros, esencialmente debidas a intrusión salina y modificación de parámetros climáticos que afectan la recarga. Para ello utilizan el modelo climático global del Centro Hadley HadCM3, con los escenarios A2 y B2 correspondientes a altas y bajas emisiones (IPCC, 2000. Special Report in Emissions Scenarios, SRES) para los años 2000 al 2099 a escala mensual. Para la intrusión salina, se considera un modelo numérico de diferencias finitas basado en la aproximación de fluidos inmiscibles e igualmente las tasas de aumento del nivel del mar para los correspondientes escenarios del IPCC. Se seleccionaron cinco áreas costeras del mundo cuyos recursos hídricos están bajo alta presión: Norte de África/Sahara, Sur África, Mediterráneo, Asia del Sur y Centroamérica. Los resultados sugieren, bajo ambos escenarios, una tendencia creciente a largo plazo en las pérdidas de agua subterránea en todas las áreas de estudio excepto en el Sahara, que bajo estas condiciones parece ser la menos afectada, estimadas en el lapso analizado. Se observan gradientes máximos hasta del 0.078 %/año en la zona

de Surasia, zona con mayor impacto potencial según el estudio. Posteriormente se correlacionaron las pérdidas de agua subterránea y los cambios en precipitación y temperatura afectadas por el cambio climático. Se encontró que la temperatura y la precipitación individualmente no mostraban buenas correlaciones con las pérdidas de agua subterránea. Sin embargo, al aplicar el concepto del Índice de Aridez cuyo valor es el cociente entre estas dos variables y al estimar la correlación de este valor vs. las pérdidas de agua subterránea, se obtuvieron valores negativos globales representativos para Centroamérica, Suráfrica, Surasia y Mediterráneo, con valores mayores a 0.5. Lo anterior indica que los efectos combinados de los dos parámetros alcanza a relacionar con mayor robustez las interacciones entre los parámetros climáticos.

Siguiendo el planteamiento de una interfaz sin zona de mezcla (Fluidos inmiscibles), Melloul (2006) propone un modelo simplificado para cuantificar las pérdidas de agua dulce en acuíferos costeros debidos al Cambio Climático, aplicado al acuífero de Israel, debidas al avance lateral de la cuña de agua salina y a la disminución del perfil piezométrico.

La evaluación de las pérdidas debidas al avance lateral consiste en comparar lo que sucedería bajo un retroceso de la base de drenaje actual del punto O a un punto O' como consecuencia del aumento del nivel del mar (Figura 4.13). El proceso se presenta de la siguiente manera:

1. Bajo un escenario actual, el pie de la cuña está ubicado a una distancia I_1 de la base de drenaje.
2. Después de T años y bajo un escenario sin Cambio Climático, pero con una explotación relacionada con el crecimiento socioeconómico proyectado a futuro, el avance del pie de la cuña sería I_2 siendo $I_2 > I_1$, sin embargo la base de drenaje O se mantendría y los volúmenes de reserva de agua dulce perdidos, con respecto a la situación actual, se cuantificarían con base en el triángulo OI_1I_2 como $OI_1I_2 * n * ancho$, siendo n la porosidad del acuífero.
3. Ahora bien, bajo un escenario con ANM y sobrexplotación asociada, la base de drenaje avanzaría desde O hasta O', lo que generaría un avance del pie de la cuña a una distancia I_3 del punto O siendo $I_3 > I_2 > I_1$. Esto sugiere que los volúmenes de pérdida se cuantificarían en base al paralelogramo OI_1I_3O' como $OI_1I_3O' * n * ancho$. Es de anotar que bajo esta formulación el área del paralelogramo OI_1I_3O' depende en gran medida de la inundación superficial.

De otro lado, la aplicación de modelos de diferencias finitas para cuantificar los efectos del cambio climático en acuíferos costeros del mundo, se reportan especialmente en

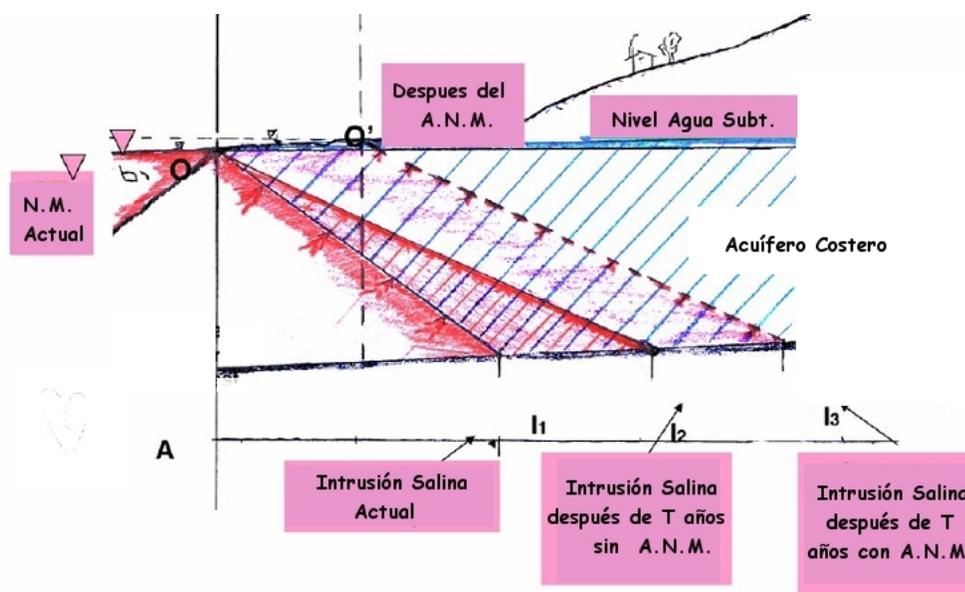


Figura 4.13: Esquema de consecuencias de Intrusión Salina en acuíferos costeros. Tomado de Melloul (2006)

países como Holanda (Essink (2001) en (Cheng y Ouazar 2004)), Bélgica (Van Meir y Lebbe 2002), Estados Unidos (Masterson y Garabedian 2007; Rozell 2007; Dausman y Langevin 2005), Alemania (Feseker 2007), Grecia (Lambrakis y Kallergis 2001), Italia (Giambastiani et al. 2007), Inglaterra (Holman 2006) y Cuba (Barros 2001). En la isla de Nantucket (Massachusetts), se ha implementado esta clase de modelos en la evaluación del problema (Urbano, 2001 en (Rozell 2007)). Para ello, se utilizaron las estimaciones del Programa de Investigación sobre Cambio Climático en Estados Unidos que predicen variaciones en la recarga entre el -30% hasta 20% para el año 2100. Además utilizaron predicciones del ANM propuestas por el IPCC-2001, que proponen un aumento de 20 a 90cm a una tasa de 5mm/año (IPCC, 2001). Así, el modelo predijo que una reducción del 5% en la recarga, incrementaría un 20% la intrusión salina en el acuífero de la Isla. Igualmente una tasa de 5mm/año en el ANM provocaría un 8% de incremento en la tasa de intrusión salina. Tiruneh and Motz (2003), usaron el SEAWAT para implementar un modelo teórico de un acuífero costero bajo Cambio Climático y extracción por medio de pozos, utilizando 6 escenarios propuestos por el IPCC-2001. El modelo predijo que después de 100 años, bajo un escenario de solo bombeo asociado al crecimiento socioeconómico, la tasa de intrusión salina se incrementaría en un 2%; bajo un escenario solo con ANM aumentaría esta tasa un 8%, y bajo un escenario que involucra ambos fenómenos,

esta tasa aumentaría en un 12 %.

Rozell (2007), utilizó el SEAWAT para modelar el acuífero de la Isla Shelter (New York, USA) bajo los efectos del bombeo, disminución en la Recarga y ANM. Para ello utilizó las predicciones del IPCC (2007) sobre cambios en la precipitación y ANM para calibrar el modelo. Bajo un escenario optimista, que involucra un aumento en la precipitación del 15 % y un aumento del nivel del mar de 0.23m, dió como resultado un movimiento de la interfase (pie de la cuña) costa afuera de 28m en promedio y 75m como máximo. Mientras bajo un escenario pesimista, que involucra una disminución de la precipitación del 2 % y un aumento del nivel del mar de 0.76m, la interfase avanza costa adentro 21m, presentandose un valor máximo de avance del pie de la cuña de 46m. Estas distancias corresponden a la línea de isocentración de cloruro de 250 mg/l, que determina el límite del agua potable según la legislación Americana.

Capítulo 5

Elementos metodológicos para el Manejo de Acuíferos Costeros y Herramientas técnicas disponibles

La Ley 99 de 1993 establece que las instituciones ambientales del Estado se estructurarán teniendo como base los criterios de manejo integral del medio ambiente y su interrelación con los procesos de planificación económica y social; posteriormente los decretos 1768 y 1865 de 1994 reglamentan la articulación de los procesos de planificación ambiental y el desarrollo territorial, determinando que las CAR (Corporaciones Autónomas Regionales) deben elaborar los planes de gestión ambiental en armonía con la planificación de los departamentos, distritos y municipios. Mediante el decreto 048 de 2001, el Ministerio del Medio Ambiente modifica estos decretos, buscando generar una mayor armonía y concurrencia entre los procesos de planificación del desarrollo, el territorio y el ambiente. En este decreto se define el Plan de Gestión Ambiental Regional –PGAR- como un instrumento de Planificación ambiental de las CAR. Este PGAR trasciende la articulación de los procesos de planificación en términos exclusivamente normativos y busca el desarrollo de un proceso dinámico que compromete la participación y el compromiso de los diferentes actores regionales.

Básicamente la propuesta de esta tesis se fundamenta en la articulación del Manejo de Acuíferos Costeros a los Planes de Manejo de Cuenca (Decreto 1729 del 2002). Es decir, se plantea la necesidad de formular planes de manejo integral de cuencas costeras bajo el formato y las premisas determinadas por la Guía Técnico Científica para el manejo de cuencas (IDEAM, 2004 y 2007) que incluyan específicamente el componente aguas subterráneas, sin perder de vista que la característica de las cuencas ubicadas en este espacio geográfico es la interacción en el extremo final con el mar tanto a nivel superficial como subterráneo, lo que evidencia la susceptibilidad de ambos

cuerpos de agua a la intrusión salina. Características a nivel urbano, socioeconómico y ambiental hacen del espacio costero un caso específico para la planificación y por lo tanto, necesaria la utilización de estrategias para estas zonas, contempladas dentro del Manejo Integrado de Zona Costera (MIZC)(([INVEMAR 2003a](#))) y otras más específicas a escala municipal con los planes de ordenamiento territorial (POT)(Ley 388 de 1997, capítulo III) y los Planes de Gestión Ambiental Regional (PGAR, decreto 048 de 2001). Un estudio detallado sobre el marco normativo sobre los planes de manejo involucrados en zonas costeras y las instituciones responsables se encuentra en Parra (2009).

Las siguientes son las etapas que consolidan un plan de manejo de cuenca (([IDEAM 2007](#))):

1. Aprestamiento
2. Diagnóstico
3. Prospectiva
4. Formulación
5. Implementación
6. Seguimiento

Según IDEAM (2007), este proceso de planificación se debe caracterizar por ser:

1. Permanente, sistemático, previsorio e integral: El objetivo central debe ser el manejo eficiente, sostenible y equitativo de los recursos hídricos. Además, debe estar orientado hacia el análisis detallado de los problemas y sus causas, continuando con lo que es necesario hacer para solucionarlos (MMA et al., 2002).
2. Adelantado por el conjunto de actores que interactúan en y con el territorio de una cuenca
3. Conducente al uso y manejo de los recursos naturales de una cuenca manteniendo o restableciendo un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura y la función físico biótica de la cuenca

En síntesis, se trata de un proceso cíclico, iterativo y evolutivo (Figura 5.1) que le brinda la oportunidad al plan de retroalimentarse y corregir posibles errores u omisiones a través de un diagnóstico y formulación cada vez más completo. Son varias las ventajas a nivel técnico y de gestión de adoptar esta estrategia de ordenación y manejo, algunas de ellas son:

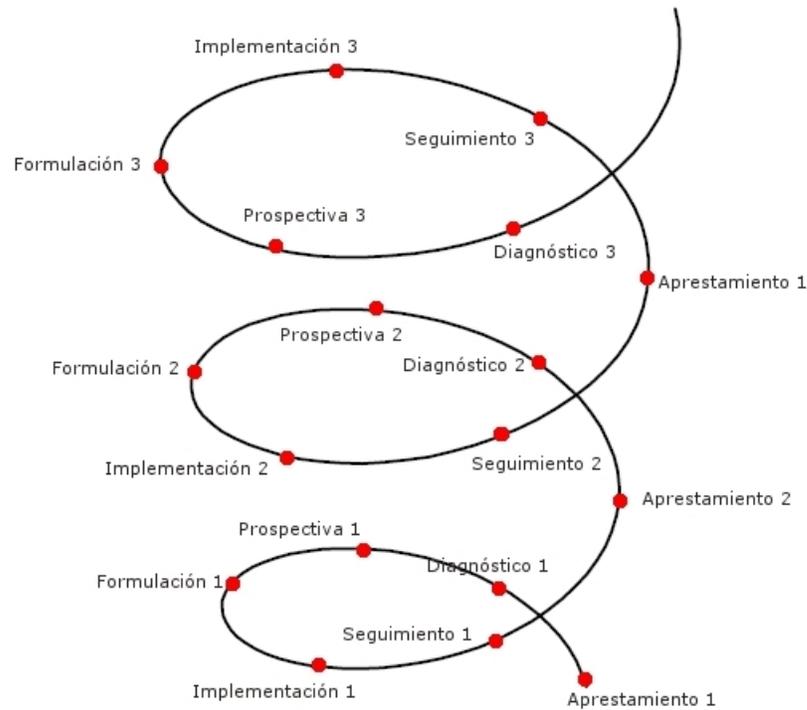


Figura 5.1: Esquema de un Plan de ordenamiento de una cuenca bajo la metodología de los ciclos crecientes, el proceso tiene carácter cíclico-evolutivo lo que le da poder de retroalimentación y mejoramiento a medida que se avanza en el conocimiento del contexto físico y socioeconómico. Adeptada de IDEAM (2004)

1. El peso legal que este decreto le imprime a la formulación e implementación de las medidas adoptadas para el caso específico de los acuíferos. Este aspecto le aporta a la autoridad encargada mayor gobernabilidad para hacer valer estas disposiciones, dado que a lo largo de la experiencia mundial han demostrado ser de difícil implementación por el carácter descentralizado de la explotación.
2. Posibilidad de articular elementos de manejo sobre otros componentes costeros que se han identificado como altamente sensibles y que de alguna manera pueden impactar el sistema hidrogeológico tales como las inundaciones y erosión costera, el manejo de vertidos de hidrocarburos, el manejo de vertidos residuales industriales, urbanos y agrícolas, etc.
3. Es posible integrar la planificación del agua subterránea y superficial, que están íntimamente relacionadas, con el fin de darle un carácter más integral y adecuado al manejo del agua evaluando y analizando las consecuencias recíprocas

de explotar cada una de las dos fuentes. Por ejemplo, la posibilidad de que la recarga de agua subterránea puede depender del flujo aguas arriba de los ríos y que el flujo de los ríos aguas abajo puede depender, a su vez, de la descarga del acuífero, asimismo que al afectar los niveles de un río se propicie una mayor intrusión salina debido a la conexión entre los dos cuerpos.

4. La definición de una fase de aprestamiento en donde el objetivo es articular de una manera coherente las escalas e instituciones involucradas.
5. La definición de una fase de prospectiva que permite al conjunto de grupos interesados determinar escenarios futuros deseados acotados por la definición de escenarios posibles determinados por técnicos basados en el conocimiento profundo del sistema hidrogeológico y sus componentes. Así, se abre la posibilidad de evaluar el impacto del cambio climático (Aumento del nivel del mar, disminución o aumento de volúmenes de recarga) e incluir las medidas necesarias para garantizar un manejo sustentable del recurso bajo este fenómeno.
6. La posibilidad de aplicar soluciones con enfoques diferentes según la situación hidrogeológica. Es evidente que no se puede dar una fórmula única para la gestión de acuíferos costeros dadas las múltiples configuraciones y condiciones hidrogeológicas que se puedan presentar en las zonas costeras. Un plan bajo esta estructura permitiría analizar cada situación en particular, esto puede ser tanto a nivel de la escala del acuífero (tamaño), como de su relación con las aguas superficiales
7. Posibilidad de una mejor gestión de la integración suelo-agua con objeto de conservar la recarga y la calidad del agua subterránea y de facilitar la asignación del recurso a diferentes usos (incluyendo el ecológico)(Garduño et al. 2006).
8. Las etapas sucesivas y evolutivas permiten una coherencia clara entre los problemas reales, la planificación y la implementación del plan.

En el contexto nacional es importante tener en cuenta los actores interesados, los procesos y planes de ordenación y gestión y los elementos de manejo del acuífero costero tanto a nivel natural y antrópico (Figura 5.2). Aunque la propuesta está basada en el esquema del POMCA, este tipo de planes deben responder a los planes de manejo de escalas espaciales mayores como las UAC (Unidades Ambientales Costeras) y sus respectivos MIZC (Manejo Integrado de Zonas Costeras Colombianas), que definen los lineamientos y políticas a nivel macro tanto a nivel ambiental como a nivel económico y los balances entre estos aspectos. A la escala del municipio, se hacen útiles medidas dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) para

hacer valer disposiciones del Plan de Manejo del Acuífero Costero en las zonas urbanas o rurales de mayor importancia para los objetivos.

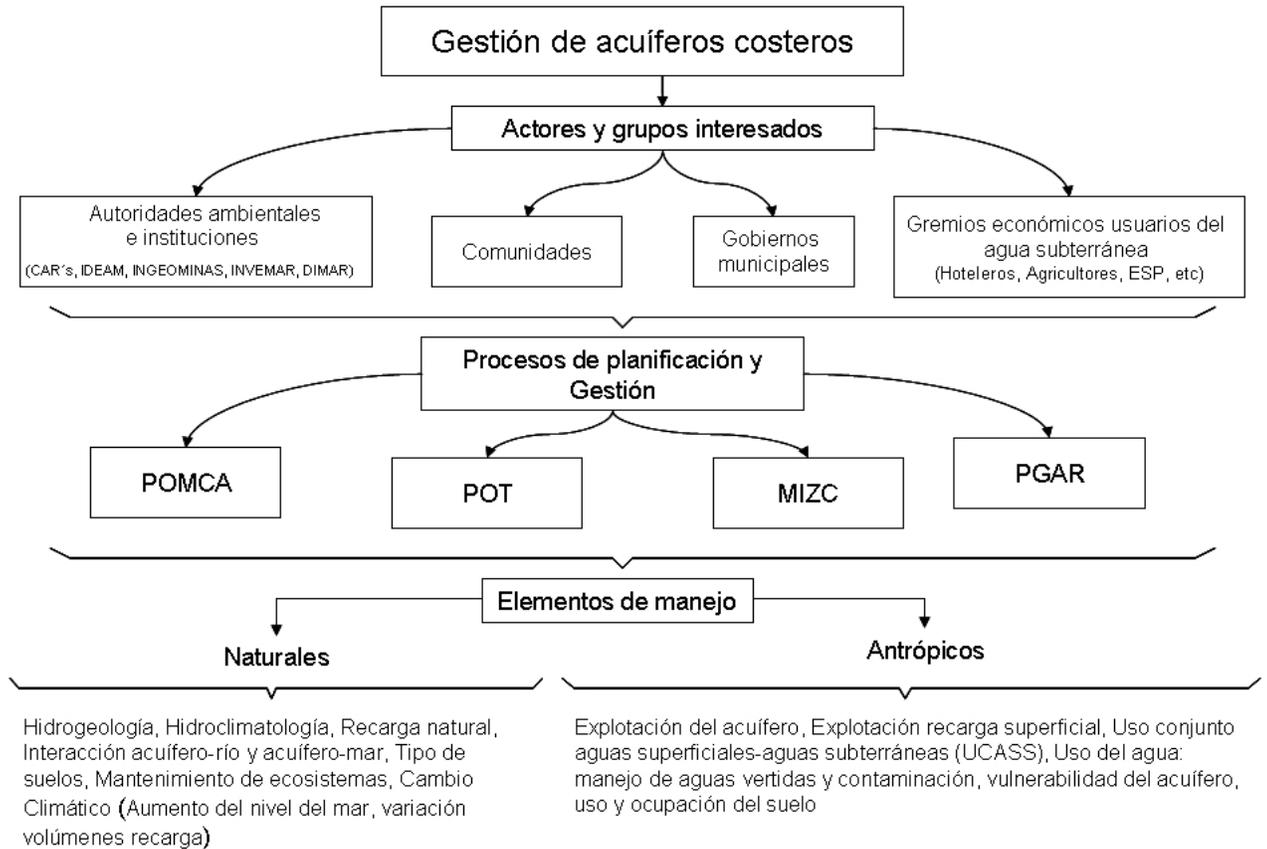


Figura 5.2: Esquema de manejo de acuíferos costeros y factores que involucra (Actores, Procesos de Planificación y Elementos de manejo)

El plan de manejo de un acuífero costero, básicamente, se define como un conjunto de medidas que una institución o conjunto de estamentos encargados del recurso y los respectivos grupos interesados, deben tomar para prevenir o limitar la entrada de contaminantes al acuífero y evitar la disminución de las reservas de agua subterránea (Tulipano 2006). En la figura 5.3 se detallan los aspectos relevantes para la construcción del plan de manejo. Es de gran importancia un buen diagnóstico que ilustre adecuadamente las condiciones actuales del acuífero involucrando la dimensión de la cuenca, las interacciones río-acuífero, un modelo conceptual correctamente definido con condiciones de frontera coherentes, y un análisis detallado de la recarga, super-

poniendo a ello, el uso que la sociedad le da el acuífero a nivel de explotación y con la amenaza que representan las actividades antrópicas para la calidad del agua del acuífero.

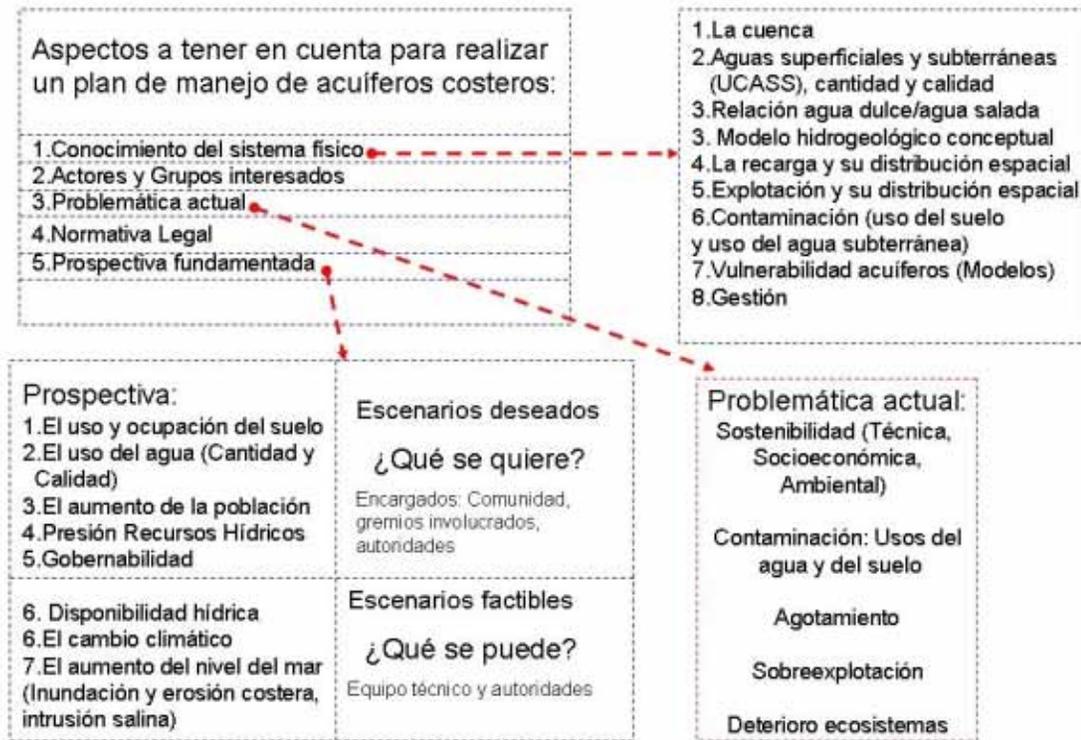


Figura 5.3: Aspectos importantes en el manejo de acuíferos costeros

Según Nanni et al. (2006), la implementación exitosa de la legislación del agua subterránea depende de diversos factores, entre ellos:

1. el sistema administrativo y el nivel de capacitación de los administradores de agua
2. una clara comprensión de los papeles y funciones institucionales a todos los niveles pertinentes
3. un nivel adecuado de conciencia y aceptación pública de las disposiciones legales
4. la voluntad política para promover y lograr una gestión sustentable del agua subterránea.

En el año 2002, el Ministerio de Medio Ambiente junto con otras entidades publicaron la *Guía metodológica para formular proyectos de protección integrada de aguas subterráneas*, la cual contiene premisas y pasos metodológicos para la elaboración de estos planes que fueron validados con experiencias en el Valle del Cauca y en la Isla de San Andrés. Aunque la Guía no está referida explícitamente al caso de los Acuíferos Costeros, se destacan aspectos de planificación de gran importancia en el esquema general de Manejo de Acuíferos. Dentro de los aspectos más importantes se encuentra el planteamiento del Marco Conceptual para el manejo de recursos hídricos

5.1. Pasos Metodológicos para la formulación de un Plan de Manejo de Acuíferos Costeros

5.1.1. FASE DIAGNOSTICO: [Recolección y análisis de información, Diseño y Calibración de Modelo Numérico del acuífero Costero]

Etapa 1: Definición del área de estudio

Con un aprestamiento previo realizado por la totalidad de instituciones involucradas, grupo técnico asignado y usuarios, en esta etapa se hace una delimitación del área de estudio de acuerdo a las características propias de la zona (tales como geoformas costeras predominantes), cuyo carácter define las particularidades de la unidad a estudiar. Los aspectos hídricos superficiales junto a aspectos topográficos (mayores alturas pueden estar asociadas a zonas de recarga) y geológicos (que influyen en la permeabilidad de la unidad y las fronteras) definen los límites de la cuenca subterránea que puede o no coincidir con los de la cuenca superficial. De otro lado están los objetivos de la gestión que condicionan el área de estudio también. Sin embargo, dado que el propósito primordial es el manejo integral de la microcuenca costera, es importante no perder de vista del funcionamiento total del sistema hidrogeológico que no está separado por fronteras políticas e institucionales.

Etapa 2: Recolección de la información

El objetivo de esta etapa es recoger los datos, información y estudios suficientes para definir y entender adecuadamente el sistema de acuíferos costeros y los problemas de intrusión salina asociados. Se recolectará toda la información cartográfica, geológica, hidrológica e hidrogeológica, además mapas de demanda y oferta hídrica y mapas de suelos que existan sobre el área de estudio, particularmente estudios realizados por entidades departamentales y municipales, empresas de acueductos, perforadores

Tabla 5.1: Marco Conceptual para la Planificación Integrada de los Recursos Hídricos

| | |
|---|--|
| Definir fundamento y objetivo | Acordar objetivos e indicadores económicos, sociales y ambientales; evaluar complementariedades, conflictos y compensaciones recíprocas entre los anteriores. |
| Integrar la oferta y la demanda | Conceptualizar vínculos y flujos entre la demanda de agua y los recursos hídricos; comprender los vínculos entre las aguas subterráneas y otras fuentes de agua; evaluar las cargas de contaminantes y presiones sobre el sistema de abastecimiento. |
| Analizar la situación problema | Definir la naturaleza del problema desde diferentes perspectivas: insuficiencias e irregularidades en el abastecimiento, deficiencias en la calidad del agua, y problemas de sostenibilidad. |
| Diagnosticar causas, impactos y compensaciones recíprocas | Evaluar: i) causas inmediatas y subyacentes ii) impactos sociales, económicos y ambientales iii) compatibilidades, conflictos y compensaciones recíprocas. |
| Identificar limitaciones y barreras | Identificar por qué suceden las cosas, la manera en que lo hacen y los factores que limitan un mejor manejo institucionales, político/culturales, financieros y económicos, a escala local y macro (incluido el fracaso de las políticas y del mercado). |
| Identificar opciones de manejo | Identificar medidas e instrumentos disponibles, incluyendo incentivos y desincentivos económicos, reorganización institucional, planificación, regulación/control, educación/conciencia, y acción común. |
| Evaluar y elegir las opciones | Evaluar el mérito técnico y eficacia en función de los costos de cada campo de acción, y considerar los impactos directos e indirectos. |
| Formular plan de desarrollo sostenible | Organizar el plan, preparar marco-registro y propuesta de financiamiento; monitorear y actualizar a medida que se disponga de más información y comprensión. |

particulares y Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) e información existente en otras entidades gubernamentales como el IGAC, IDEAM e INGEOMINAS. Para el desarrollo de esta etapa el coordinador del equipo técnico se debe desplazar a los lugares fuente de información, para vigilar que la información adquirida sea clara,

coherente y suficiente para los resultados esperados, de lo contrario se deberá formular un plan de muestreo para complementar los datos faltantes.

Etapa 3: Disposición de la Información

Los estudios en acuíferos costeros tienen naturaleza multidisciplinaria (hidrología, geología, hidrogeología, socioeconomía). Por ello, el desarrollo y aplicación de una adecuada base de datos se perfila como un elemento de gran importancia en la planificación de estos cuerpos de agua, para optimizar la gran cantidad de datos que se puedan acumular. En esta etapa, se deben analizar los formatos digitales y manejo de bases de datos por parte de las diferentes instituciones, se deberán clasificar y organizar los datos para hacer un resumen de tal manera que se pueda consultar de la forma más ágil y eficiente. Los datos deben ser organizados de forma que esta pueda ser analizada espacialmente, en tres dimensiones, así como temporalmente. Por ello, para dinamizar la disponibilidad de datos para el análisis y modelamiento se debe hacer uso de un sistema de información geográfica integrado a una base de datos de manera interactiva. La disponibilidad de la información de manera oportuna se garantizará a través de un adecuado inventario, de listados, de registros, de archivos y formatos definidos con base en la aplicación de prácticas modernas de oficina. Las decisiones adoptadas con respecto al manejo de la información serán normalizadas y manejadas por diversos medios, según sea su naturaleza. Esta etapa permite a usuarios, técnicos y decisores analizar y encontrar la información, y manejar los datos en un formato consistente para pre y post-procesamiento del modelamiento y posteriormente como herramienta fundamental en la toma de decisiones.

Etapa 4: Análisis de la información a la escala del pozo

Inicialmente se analizarán los archivos de entidades tanto públicas como privadas, que realicen o hallan realizado inventario de pozos, aljibes o manantiales. Esta información será guardada en las tablas y formatos. Los puntos se ubicarán en planchas topográficas a escalas adecuadas al tamaño de la zona de estudio delimitada. Se debe hacer una revisión de los datos existentes de niveles piezométricos y concentraciones de cloruros en todos los pozos desde los cuales se capta el agua. Si es posible se deben realizar estudios geoleléctricos para detectar la posición actual de la cuña salina. En adición a los datos físicos y químicos de pozos de abastecimiento y monitoreo se debe analizar información no-técnica y anecdótica recogida en campo. Es de gran importancia ubicar exactamente las zonas de extracción en el acuífero. La información típica colectada incluye:

1. Información de pozos (profundidad, localización, geología).

2. Información de bombeos históricos y proyectados (vinculados a la información del pozo).
3. Datos de muestras de cloruros (fechados, vinculados a la localización de los pozos).
4. Datos de niveles de agua (fechados, vinculados a localización de los pozos).
5. Mapas de características superficiales (carreteras, ríos, localizaciones de pozos, características topográficas).
6. Pruebas de Bombeo para estimación de parámetros hidrogeológicos del acuífero (transmisividad, conductividad hidráulica, rendimiento específico, almacenamiento, otros).
7. Mapas de las localizaciones estimadas de la interfase y profundidades.
8. Granulometrías asociadas.

Posteriormente se determinara la distribución de puntos de agua, distribución de puntos de agua por caudales y unidad geológica, distribución de puntos por tipos de equipos de bombeo y unidad geológica, distribución de puntos por rangos de profundidad y unidad geológica captada, distribución de puntos de agua con relación al uso y por unidad geológica, distribución de los puntos de agua de acuerdo a los parámetros físicos y por unidad geológica, entre otros. Además, los análisis que se pueden llevar a cabo en esta etapa son:

1. Tendencia de calidad de agua y análisis espacial.
2. Análisis de bombeo: mensual, estacional, anual
3. Niveles de agua y mapas de equipotenciales
4. Concentración de cloruros y mapas de tendencias
5. Proyecciones de demanda de agua

Etapa 5: Análisis Hidrológico

En esta etapa se analizara toda la información hidrológica disponible así como los estudios previos realizados al respecto. Se analizaran las condiciones oceanográficas, la influencia de fenómenos climáticos a diferentes escalas espaciales y temporales, el clima y la variabilidad hidrológica. Este será un insumo para el análisis de la recarga y la correlación de los eventos hidrológicos con el avance y retroceso de la cuña salina. El estudio hidrológico comprenderá las siguientes actividades:

1. Obtención de un modelo digital de terreno Con la información topográfica disponible, propiedad del IGAC o disponible en las instituciones involucradas, se construirá el Modelo Digital de Terreno (MDT) lo que permitirá la delimitación de cauces y cuencas y posibilitara la extracción automática de variables morfométricas asociadas al terreno y a la red de drenaje correspondiente. La topografía se deberá rasterizar e interpolar, y el mapa resultante se debe corregir para que no presenten zonas planas ni sumideros y la red de drenaje sea continua. Se pueden usar algoritmos de procesamiento de modelos digitales de terreno como los incorporados en el software HydroSIG v.3.0 Beta (Ramírez y Vélez, 2002, Garbrecht y Martz, 1997 y UNAL-UPME-COLCIENCIAS, 2000). Posteriormente se utilizarán algoritmos de extracción de direcciones de drenaje y se obtendrán mapas de variables geomorfológicas inherentes a la red de drenaje y a la topografía resultante, como: pendientes máximas del terreno; áreas acumuladas de drenaje; longitud canales; entre otros. A partir de estos mapas se calcularán las variables morfométricas en distintos puntos de las cuencas.
2. Caracterización climática y realización de Balances Hídricos Con la información disponible se estimarán variables climáticas tales como: precipitación, evaporación y temperatura. Para estimar la precipitación se utilizarán los registros existentes en la zona de estudio. La evaporación y temperatura se pueden obtener utilizando metodologías de estimación indirecta

Los resultados de esta etapa serán consignados en mapas en formato SIG.

Etapa 6: Evaluación de información geológica y definición de unidades hidrogeológicas del acuífero

La evaluación geológica estructural se realizará por medio de la información secundaria recolectada y deberá contener como mínimo los siguientes elementos:

1. Marco Geológico Regional: Se deberá presentar la caracterización de los principales elementos litoestructurales que conforman la región de la cual hace parte el área de estudio. Dicha caracterización se efectuará a partir de condiciones del ambiente de formación de las diferentes unidades de roca que conforman el elemento y de la edad y tipo de actividad tectónica
2. Geología local: Se deberán identificar y caracterizar las principales unidades geológicas presentes en el área de estudio. La cartografía de estas unidades se efectuará en escala adecuada. La caracterización incluirá como mínimo los siguientes elementos: Formaciones que conforman la unidad, edades, ambientes de formación, textura, estructuras, composición y tipos de contactos con las unidades subyacentes y suprayacentes.

3. Geología estructural: Se deberá identificar y caracterizar las principales estructuras geológicas presentes en el área de estudio.
4. Geomorfología Local: Se identificarán y analizarán las unidades geomorfológicas y que estén relacionadas con zonas de recarga y descarga en el acuífero

Como productos gráficos de la evaluación geológica se entregarán:

1. Mapa Geológico - Estructural a escala adecuada al tamaño de la zona de estudio
2. Mapa Geomorfológico
3. Cortes geológicos dentro del área estudio.
4. Diagramas geológicos de bloques.

Toda la información debe llevarse a un sistema de información geográfica

Etapa 7: Correlación de la información técnica

Con los registros de niveles de agua en los pozos inventariados, con la información obtenida de los sondeos geoelectricos, de la geología, calidad de aguas, pruebas de bombeo (recogidas en las instituciones y realizadas durante la fase de diagnostico) se determinarán:

1. Extensión y tipo de acuíferos
2. Parámetros principales de los acuíferos
3. Análisis de la calidad del agua subterránea
4. Espesor de las principales formaciones acuíferas
5. Mapas de isopiezas
6. Mapas de isopácas
7. Direcciones de circulación del agua subterránea.

En esta etapa se generaran mapas en formato SIG de los respectivos tópicos mencionados.

Etapa 8: Evaluación del Modelo conceptual del acuífero

Como primer requisito para un entendimiento de la coexistencia de aguas dulces y salinas en acuíferos costeros, se debe tener un entendimiento general de la situación hidrogeológica. Es indispensable la formulación de un modelo conceptual (una serie de hipótesis y asunciones que reducen el problema y el dominio real a una versión simplificada de la realidad), en el que se tengan en cuenta los diferentes aspectos que rigen el movimiento del agua y que determinan su calidad, cantidad, direcciones de flujo y en general su interacción con las otras fases del ciclo hidrológico, como son la precipitación, la escorrentía superficial directa y la recarga. En esta etapa se evaluará el modelo conceptual actual para representar el acuífero a nivel de estructura hidrogeológica y las condiciones de frontera que simulan el ambiente real de la zona de estudio. Si no se cuenta con estos datos se debe iniciar un proceso de formulación y validación del modelo conceptual para posterior modelamiento numérico. Es necesario entonces, para esto, identificar el área de interés y las condiciones de frontera del modelo. Se definirán lo que se conoce como unidades hidroestratigráficas, entendiéndose éstas, como unidades geológicas que presentan condiciones hidrológicas y geológicas similares (Maxey, 1964). Para establecer el modelo conceptual de la zona a escala adecuada se tendrá toda la información geológica, geofísica, inventario de puntos de agua, hidroquímica, pruebas de bombeo y estudio hidrológico. La clasificación hidrogeológica de las diferentes unidades geológicas se hará con base en los siguientes aspectos:

1. Características geológicas (litología, aspectos estructurales, geomorfología, espesores, etc.) de las diferentes formaciones del área.
2. Características geofísicas de las rocas (valores de resistividad eléctrica, potencial espontáneo y ensayos gamma).
3. Distribución espacial de las rocas tanto en superficie como en profundidad.
4. Calidad del agua subterránea.
5. Mapas de isopiezas
6. Propiedades hidráulicas de las rocas obtenidas a partir de ensayos de bombeo.
7. Recarga por precipitación.
8. Se elaborará un mapa hidrogeológico a escala adecuada, donde se delimitarán las unidades hidrogeológicas, la dirección del flujo subterráneo, la calidad físico química de las aguas subterráneas y las zonas potencialmente acuíferas.

9. Igualmente, toda la información cartográfica y temática se entregará en un SIG, debidamente estandarizado, que incluya un diccionario de datos donde se defina adecuadamente cada elemento representado.

Etapa 9: Calculo y/o verificación del valor actual estimado de la recarga en el acuífero y replanteamiento si fuese necesario

Como primer paso en esta fase, se analizarán los estudios actuales de recarga en el acuífero. De otro lado, con los registros hidrológicos obtenidos de las estaciones ubicadas en la zona, se debe hacer un balance hídrico. Para esto es necesario delimitar los diferentes tipos de suelos en la zona, con sus principales parámetros hidráulicos, a saber, capacidad de campo y punto de marchitez posiblemente con planos del IGAC o de instituciones que hayan realizado estudios en la zona. El resultado final será un balance hídrico que permita determinar el volumen del agua infiltrada anualmente o estacionalmente (períodos secos y períodos húmedos). Es importante analizar la influencia de fenómenos macroclimáticos como el Niño y la Niña en la recarga de los acuíferos. Adicionalmente, se deben realizar pruebas de consistencia y homogeneidad e independencia a las series hidrológicas analizadas, que garanticen la confiabilidad de los valores estimados de recarga.

Etapa 10: Evaluación del comportamiento de la salinidad en el acuífero bajo diferentes escalas temporales a partir de datos históricos y evaluación de patrones verticales de salinización

En esta etapa se analizará toda la información histórica relacionada con la salinidad en el acuífero a nivel temporal y espacial en la zona de estudio para detectar patrones de variabilidad y su correlación con aspectos hidrológicos y de extracción. Para ello se analizarán los datos de muestras de cloruros y conductividad eléctrica (fechados, vinculados a la localización de los pozos), y se correlacionará la ubicación de todos los pozos y zonas de extracción con estos patrones. De otro lado, se analizarán los sondeos geoelectrónicos realizados para analizar la evolución de los perfiles verticales de salinidad en el tiempo. Los resultados de esta etapa serán consignados en mapas en formatos SIG y los análisis serán consignados dentro de un capítulo en el informe final de la fase de análisis y disposición de la información.

Etapa 11: Definición del Modelo conceptual de intrusión salina

Se debe tener un modelo conceptual del mecanismo de intrusión salina como hipótesis de trabajo para analizar este fenómeno bajo la modelación numérica y física. Este modelo se infiere a partir de conclusiones de las etapas anteriores que involucran el

análisis de la representatividad de la escala local o regional en la evolución y avance de la cuña salina. Esta es una de las piezas críticas del modelo conceptual, pues una determinación de si la posición de la interfase pre-desarrollo estaba en equilibrio, o, si el acuífero está todavía respondiendo a un cambio de largo plazo en el nivel del mar desde el último período glacial influye en los resultados finales de calibración del modelo numérico. Paralelamente se acoplará el modelo conceptual de la intrusión salina y el análisis de la representatividad de la escala local o regional en la evolución y avance de la cuña.

Etapa 12: Identificación de factores de desarrollo y análisis de la demanda a través del estudio de patrones históricos de bombeo

En esta etapa se pretende analizar el papel potencialmente importante que tienen aspectos políticos, valores sociales, y procesos económicos en la configuración del paisaje que se encuentra encima de los acuíferos. Por ello el desarrollo de esta etapa debe ser realizado por un grupo de profesionales de diferentes áreas. El agua subterránea no puede considerarse aislada de este paisaje y la sociedad que interactúa con estos cuerpos de agua (Holman, 2006). El éxito de esta identificación radica en evaluar de manera correcta los usos actuales del suelo dentro de los cuales se encuentra la urbanización, la agricultura, el turismo, la ganadería. El objetivo fundamental es encontrar cuál variable o conjunto de variables controlan este aspecto en el momento de hacer el plan y como esta condicionando este factor el uso del agua subterránea en la zona de estudio. Es decir evaluar si el uso actual del agua subterránea es sostenible y cuantificar por medio de indicadores la sensibilidad del agua subterránea a los factores de desarrollo identificados. A partir de los resultados de los censos existentes, de los planes de desarrollo y ordenamiento de la zona de estudio, se definirán los posibles estimativos de caudales necesarios para los distintos usos.

Etapa 13: Diseño y calibración del Modelo Numérico

Dentro del planeamiento del recurso hidrogeológico en zonas bajo riesgo de intrusión salina, es de gran importancia el modelamiento numérico ya que representa el corazón del plan de manejo del acuífero, y es la base sobre la que soportan diferentes actividades y decisiones en las etapas del proceso de formulación, ejecución y monitoreo de estos planes (Figura 5.4).

Por ello, la decisión sobre el tipo de método de resolución y modelo a escoger para analizar la intrusión salina en un caso específico, depende de (IGME 1988):

1. Objetivos del estudio
2. Tipo de hipótesis y simplificaciones que se hagan

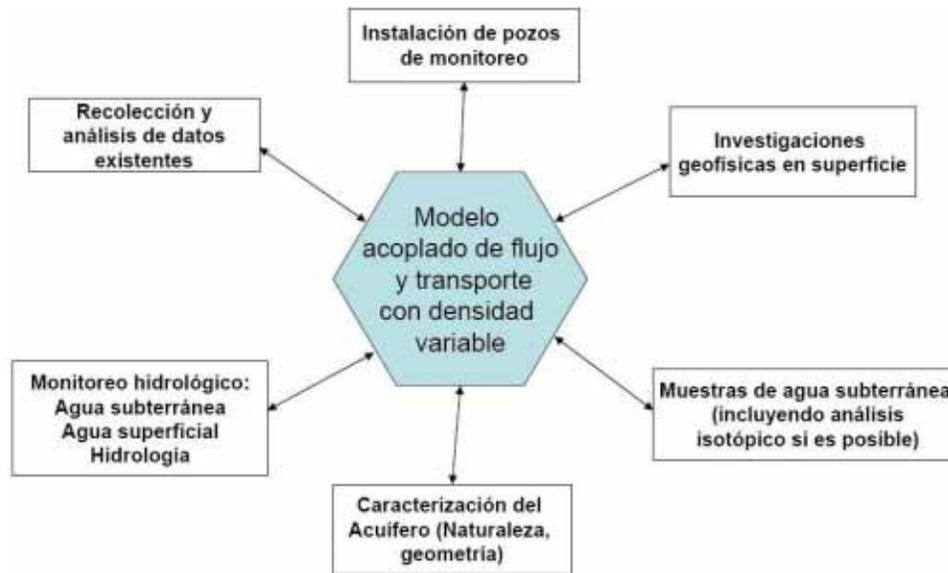


Figura 5.4: Articulación de diferentes actividades involucradas a través del modelamiento numérico de un acuífero costero hacia una visión integrada de la gestión. tomada de Maimone (2005)

3. Cantidad de Datos
4. Conocimientos Técnicos
5. Presupuesto disponible

En el proceso de recolección y análisis de datos se adquiere visión acerca del problema; pero, solamente a través del modelamiento del mecanismo de intrusión salina, puede ser completamente conocido y evaluado. Las siguientes son las ventajas de realizar esta modelización (Maimone 2002; Cheng y Ouazar 2004):

1. El modelo proporcionará entendimiento del mecanismo potencial de intrusión salina en el acuífero, y será la mejor herramienta para integrar e interpretar los datos que estén actualmente disponibles.
2. El modelo detectará la necesidad de datos adicionales, el tipo de datos necesarios, y las localizaciones críticas y profundidades para recolectarlos.
3. El modelo permitirá investigar y evaluar hipótesis (ej. hipótesis de recarga, de localización de la interfase, etc.). Así, se desarrollan y evalúan teorías de intrusión, y se avanza en un entendimiento de la sensibilidad del sistema acuífero costero a cambios en sus componentes hidrológicos.

4. El modelo será una excelente herramienta de visualización. Actualmente los paquetes de software ofrecen capacidades practicas de zoom, manejo, visión de secciones transversales a través de cualquier parte del área modelada, contorno de equipotenciales o concentraciones de cloruro en un plano de visión o sección transversal, localizaciones de interfase, e imágenes de puntos de datos en planos y secciones transversales.

Seleccionar el modelo correcto depende de un escenario y objetivos claros para la simulación. Por ejemplo, un objetivo puede ser la asesoría técnica de estrategias para continuar usando el acuífero como un recurso viable para abastecimiento, inclusive, estando bajo fuertes presiones, como problemas de intrusión intensa.

Una de las decisiones más importantes del Plan de Manejo del Acuífero Costero estudiado se toma en esta etapa, pues de acuerdo a la formulación del modelo conceptual y a criterios matemáticos relacionados con este planteamiento, se elige el modelo para la simulación de la intrusión salina, este tema se trato en el Capitulo 4 pero vale la pena aclarar algunos aspectos. Por ejemplo, cuando se trata de cuñas saladas a escala regional, una aproximación efectiva y práctica para modelar, es simplificar, a través de algunas suposiciones que permitan soluciones razonables, con las que se puedan cuantificar las relaciones entre agua salada y dulce. La suposición más importante esta relacionada con la habilidad del agua dulce de mezclarse con el agua salada. Bajo muchas condiciones costeras, estos dos fluidos miscibles pueden ser considerados inmiscibles, separados por una interfase sin zona de mezcla. Esta suposición ha sido usada con éxito en muchos estudios junto con simplificaciones matemáticas significativas para la formulación del proceso físico. Por ejemplo en la península de Yucatán, zona localizada en áreas cársticas, se utilizó un modelo de interfase sin zona de mezcla para simular el flujo y avance de la interfase con un gran éxito, verificado en la calibración del modelo (Marín, L.E. 2003 en Cheng y Ouazar, 2004). Si los gradientes de concentración son importantes, pueden ser aplicados los modelos de flujo de densidad variable, o modelos acoplados de flujo y transporte. Este tipo de modelos permiten incorporar dentro de las simulaciones los efectos de gradientes de densidad del fluido sobre el flujo de agua subterránea asociados con gradientes de concentración de solutos. Además, son útiles en simulaciones de ambientes hidrogeológicos más complejos. Las principales aplicaciones están en estudios de intrusión de agua salina donde la dispersión de sal dentro de la zona de agua dulce necesita ser cuantificada y localizada geográficamente. El ejemplo mas representativo de este tipo de modelos es el SEAWAT-2000 (Langevin et al., 2003) el cual esta basado en la ecuación de cabeza equivalente de agua dulce.

Entre las actividades que se desarrollaran en la etapa de diseño del modelo de aguas subterráneas están:

1. Definición de Geometría del acuífero
2. Definición de discretización espacial (número de columnas, filas y capas)
3. Definición de parámetros hidráulicos del modelo del acuífero y su variabilidad espacial (Unidades, hidrogeológicas, Transmisividad, Conductividad, Rendimiento específico, dispersión, permeabilidad)
4. Definición de períodos de asociados a los '*estres*': Evaporación, Precipitación, Recarga, extracción
5. Definición de pasos de tiempo y umbral temporal de simulación
6. Determinación de condiciones iniciales (posición actual de la cuña, concentraciones iniciales, cabezas iniciales)
7. Definición de condiciones de frontera (cabezas constantes, cabezas generales, no flujo, no transporte, concentraciones constantes, entre otras)

Posteriormente, se calibran los resultados de corridas del modelo con los datos medidos de cabezas y concentración de cloruros, evaluando al mismo tiempo los modelos conceptuales del acuífero y de intrusión salina. Diferente a otros tipos de modelos de aguas subterráneas, que pueden ser calibrados cuidadosamente, los modelos de intrusión salina frecuentemente no tienen datos suficientes que permitan la tradicional *calibración y verificación*. La carencia típica es la falta de datos sobre la posición de equilibrio o natural de la interfase (Estado estacionario antes del uso antrópico), sobre si la interfase estaba en equilibrio antes del bombeo, sobre la actual localización y tasa de movimiento, sobre la profundidad de la cuña salina y el grado de difusión en la zona de transición, y sobre la historia de la intrusión. Una aproximación que ha tenido éxito para evaluar la precisión del modelo, ha sido comparar el movimiento simulado del agua salina con datos históricos existentes de cloruros. En la mayoría de los casos, sin embargo, únicamente se puede contar con la estimación de la posición actual. Entonces, la calibración se hace evaluando la racionalidad de una hipótesis de localización de la interfase de predesarrollo (Estado estacionario antes del uso antrópico), simulando el movimiento de la interfase sobre los archivos históricos de bombeo. Los resultados deben compararse con la posición actual basada en los datos existentes. Al mismo tiempo, se deben hacer ajustes a los parámetros hidráulicos para que la distribución de cabezas simuladas sea acorde a los niveles de agua medidos. Entre las actividades a desarrollar en la calibración se tienen:

1. Análisis de sensibilidad de parámetros que permita identificar cuales son los parámetros que cambian los resultados arrojados por el modelo ante variaciones en el valor asignado.

2. Generación de suposiciones para evaluar teorías de intrusión y análisis de las mismas, que aporten a ganar un entendimiento de la sensibilidad del sistema acuífero costero a cambios en sus componentes hidrológicos.
3. Definición de incertidumbre en la calibración
4. Definición de limitaciones del modelo

Los análisis y definiciones realizadas en esta fase serán consignados en tablas y documentos suficientemente argumentados y en formatos SIG.

5.1.2. FASE PROSPECTIVA: [Definición de escenarios Socioeconómicos y de Cambio Climático y simulación en el modelo calibrado]

Etapa 1: Definición de escenarios

La definición de escenarios que permitan explorar las posibles condiciones de futuros desconocidos y plantear tanto a nivel físico como socioeconómico un espectro de posibles situaciones que permitan a técnicos y decisores considerar las implicaciones del cambio climático sobre el recurso hidrogeológico respecto a las situación actual, es una manera eficiente de conectar las herramientas de modelación con las futuras políticas de gestión y planificación del agua subterránea en zonas costeras. Los principales factores físicos introducidos en los escenarios planteados en el modelo son (Figura 5.5):

1. Las tasas de aumento del nivel del mar,
2. La variación de parámetros climáticos tales como precipitación y temperatura,
3. Cambios en el uso del suelo.
4. La explotación en el acuífero

A nivel socioeconómico es posible considerar el crecimiento poblacional y económico a través de los regímenes de explotación de agua subterránea para abastecer estos crecimientos. La definición de factores climáticos y del nivel del mar puede partir de Modelos Climáticos Globales (MCG), cuyos resultados han sido analizados en los reportes del IPCC u otras entidades encargadas del asunto. Sin embargo, debido a las generalizaciones a escala mundial establecidas en estas entidades y a la incertidumbre en la cuantificación de los parámetros involucrados, las estimaciones globales deben ser tomadas con sumo cuidado para estudios que soportan la toma de decisiones

en programas de reducción de la vulnerabilidad de los sistemas y su adaptación a estos cambios. Por ello, la relevancia de los factores regionales y locales de la zona de estudio deben ser suficientemente captados en estos escenarios. En conjunto con las instituciones involucradas, se plantearán diferentes escenarios con proyecciones sobre parámetros como clima, hidrología y socio-economía (principalmente relacionados con el crecimiento demográfico y la demanda de agua) acordes con estudios de los organismos encargados del tema para esta zona geográfica.

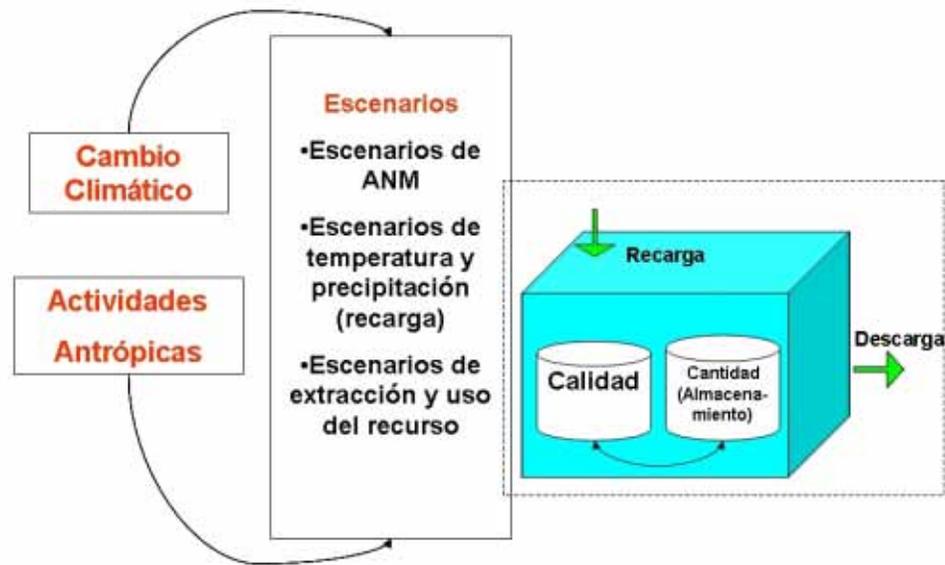


Figura 5.5: Factores involucrados a la hora de diseñar Escenarios en el acuífero costero que involucre el Cambio Climático

Etapa 2: Simulación de escenarios en el modelo calibrado

En este punto se generará el enlace entre el modelo calibrado y los posibles impactos generados por el crecimiento socioeconómico (futuras tasas de explotación y perforación de nuevos pozos) y el cambio climático. El producto principal que permite el desarrollo de los modelos hidrogeológicos en el contexto de la Gestión a futuro y el Cambio Climático, es la estimación de los parámetros de entrada a partir de la formulación de los escenarios, que generalmente plantean condiciones optimistas, como en el caso de los escenarios B1 y B2 del IPCC, y condiciones pesimistas, como en el caso de los escenarios A1 y A2 del mismo organismo. En la presente metodología propuesta se realiza una profundización en el problema de la intrusión salina dado que indirectamente los factores anteriormente mencionados están implicados y dado que

es una de las mayores amenazas para el recurso en estudio. Los tiempos de proyección y simulación del modelo están ligados al planteamiento de los diferentes escenarios. Se espera alimentar el modelo calibrado del acuífero y de la intrusión salina con las presiones estimadas a futuro representadas por los parámetros de entrada tales como extracción de pozos, recarga y aumento del nivel del mar. Este último podría simularse por medio de un potencial impuesto que aumenta con el tiempo a una determinada tasa acorde al escenario propuesto. Así se podrá obtener una cuantificación aproximada del movimiento de la interfase, volúmenes de agua potable disponibles, cambios en niveles piezométricos y niveles de cloruros. Los análisis y definiciones realizadas en esta fase serán consignados documentos suficientemente argumentados y en archivos formato SIG.

5.1.3. FASE FORMULACIÓN: [Estrategias para llevar a cabo lo formulado]

Se determinan las medidas y estrategias acordes con una explotación sustentable del recurso. Las decisiones tomadas en esta etapa deben involucrar el control de la explotación y la distribución racional, planteamientos sobre el uso y la protección de las fuente hídrica superficial. El soporte básico para la toma de decisiones son los resultados de las fases anteriores en donde el esquema de intrusión salina y sus principales consecuencias son suficientemente entendidos y además se cuenta con un panorama de las posibles consecuencias a futuro. Algunas de las estrategias que se podrían analizar en esta etapa son:

1. Reuso del agua no potable: reducir la demanda reemplazando agua potable con agua tratada proveniente de irrigación u otro uso.
2. Barreras de inyección: una barrera hidráulica creada inyectando agua para aumentar la pendiente del nivel freático respecto al nivel del mar. Esto previene la intrusión de agua marina en porciones del sistema acuífero. Ampliamente usada en Los Angeles, California importando y reciclando aguas para el abastecimiento de pozos de inyección (Jonson et al., 2004 en (Cheng y Ouazar 2004))
3. Barreras de extracción: Barrera hidráulica extrayendo agua salina cerca de la interfase para disminuir las cabezas y proteger pozos en tierra
4. Relocalización de pozos: Reubicar pozos a áreas con niveles freáticos más altos o áreas menos susceptibles a intrusión sin variar la extracción total. La relocalización puede usarse también para reducir la intensidad de bombeo en un área y desabatir el cono de depresión del bombeo, permitiendo el cierre del frente salino.

5. Sellando pozos abandonados: Los pozos antiguos abandonados localizados en el acuífero, podrían generar goteo de agua salobre de los acuíferos salinos en capas o acuíferos que contienen agua dulce.
6. Modificando tasas Bombeo: Cuando el pozo presenta aumentos periódicos de salinidad debido al cono ascendente, un plan modificado de bombeo (tasa constante más baja o una sucesión prendido-apagado que permita al pozo recuperar cabezas) puede aliviar el problema. Aplicado por ejemplo en el acuífero Marplatense en Argentina ([Mérida 2001](#)).
7. Barrera física: Las barreras físicas como paredes o cortinas estaca se han probado en situaciones de intrusión poco profunda para proteger un pozo.
8. Pozos Salinos: Se instalan pozos de bombeo en la parte salinizada del acuífero para reducir cabezas y disminuir el agua salina. Esto puede retardar o puede detener el movimiento de agua salada hacia pozos de abastecimiento.
9. Plantas desalinizadoras: Extraer agua con determinada salinidad para posteriormente desalinizarlas con tratamientos y plantas desalinizadoras
10. Uso conjunto: el uso coordinado de la variabilidad y almacenamiento del agua superficial y subterránea para compensar explotación excesiva en agua subterránea.

Los acuíferos costeros pueden ser explotados para producir agua dulce si los mecanismos de flujo son conocidos, los pozos son correctamente construidos y localizados, un correcto manejo por parte de las organizaciones existentes, leyes adecuadas, esto sería óptimo para la protección, conservación y restauración del acuífero.

5.1.4. FASE IMPLEMENTACIÓN: [Estrategias para llevar a cabo lo formulado]

En esta etapa se encuentran todas las herramientas legales que permiten regular la explotación del recurso. Todas las opciones técnicas, económicas y sociales (incluyendo la participación comunitaria), identificadas para combatir las amenazas de contaminación a los acuíferos, son traducidas al idioma del derecho con el fin de darle vida jurídica al Plan de Manejo, siendo los instrumentos de planificación los de mayor impacto.

Los instrumentos de planificación son las herramientas técnicas, legales, económicas y sociales, a través de las cuales se implementan las acciones a seguir para prevenir,

mitigar y corregir los impactos y efectos ambientales causados por actividades que supongan riesgo de contaminación y sobreexplotación del acuífero. Entre las herramientas utilizadas por las diferentes Corporaciones Autónomas Regionales para el manejo adecuado del recurso hídrico subterráneo, las de mayor importancia están constituidas por los permisos y concesiones, toda vez que permiten administrar el recurso de una manera planificada. En el Decreto 1541 de 1978, están todos los argumentos legales y técnicos para cumplir tal función, por parte de las CAR.

Otras herramientas son los Planes de Manejo para la operación de cementerios, estaciones de servicios (EDS) y otras actividades que lo requieran; Licencias Ambientales que de acuerdo a la norma, (Decreto 1220/2005), requieran esta autorización por el deterioro grave que pueda causar la ejecución del proyecto; Uso Eficiente y Ahorro de Agua (Ley 373 de 1997); la Tasa por Uso de aguas (Decreto 0155 de 2004); las Tasas Retributivas (Decretos 3100 de 2003 y 3440 de 2004), entre otros. Además los proyectos contemplados en los POT, relacionados con el Manejo Integral del Recurso Hídrico y los Planes de Manejo y Ordenamiento de las Cuencas Hidrográficas.

El Permiso (decreto 1541 de 1978) es la autorización ambiental para acceder a la exploración, perforación y construcción de un pozo de aguas subterráneas. Esta herramienta busca calificar los impactos generados por la construcción del pozo y evitar la ilegalidad en la exploración, perforación y construcción de pozos profundos en el acuífero así como la construcción de pozos nuevos sin planificación ni control. Dado este carácter los actores que involucra generalmente son el sector de servicios públicos, agropecuario, comercial, particulares y otros.

La Concesión (decreto 1541 de 1978) es la autorización que la autoridad ambiental otorga para que una persona natural o jurídica, pública o privada, realice el aprovechamiento del agua de dominio público, entre estas las aguas subterráneas. Este instrumento busca contrarrestar el problema de la Sobreexplotación del recurso hídrico y su vulnerabilidad a la contaminación. Además de la ilegalidad de los aprovechamientos. Los Actores que involucra son el sector servicios públicos, agropecuario, comercial y dueños de pozos particulares. La concesión puede variar dependiendo de los siguientes factores:

1. Demanda de agua presente y proyectada de la Región,
2. Oferta del recurso (disponibilidad),
3. zona sobreexplotada,
4. distancia entre pozos,

5. Área de influencia de los pozos,
6. Planes de Ordenamiento Territorial,
7. Preservación del ambiente y
8. La necesidad de proteger el recurso hídrico.

El Plan de manejo de zonas de recarga del acuífero, es el conjunto detallado de actividades y programas, que producto de una evaluación ambiental, están orientadas a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos y efectos ambientales que se causen por el desarrollo de un proyecto, obra o actividad en las áreas de recarga del Acuífero. Algunos de los problemas que estos instrumentos tratan de contrarrestar son la contaminación por vertimientos de residuos líquidos municipales y agroindustriales, la contaminación por lixiviados, la disposición inadecuada de hidrocarburos, la contaminación por disposición de residuos sólidos y/o similares, la disminución del área de recarga y la contaminación por uso inadecuado de agroquímicos.

Resulta necesario abordar la cuestión de política sobre 'qué servicios son los que más se necesitan del agua subterránea', con el fin de proporcionar metas para acciones de gestión local (Banco Mundial, 2006).

Para proteger los acuíferos contra la contaminación es esencial controlar las prácticas de uso del suelo, las descargas de efluentes y el depósito final de residuos; sin embargo, es necesario definir estrategias pragmáticas que permitan equilibrar diversos intereses que compiten entre sí. Así, en vez de aplicar controles universales sobre uso del suelo y descarga de efluentes, es más eficaz por el mismo costo ('cost-effective'), y menos perjudicial al desarrollo económico, utilizar la capacidad natural de atenuación de contaminantes de los estratos suprayacentes al acuífero, cuando la capacidad de control sea la que se necesita para proteger la calidad del agua subterránea.

Capítulo 6

Aplicación de modelos numéricos para analizar el fenómeno de la intrusión salina y Cambio Climático en acuíferos costeros

El propósito de este capítulo es señalar como un modelo numérico de un determinado acuífero costero facilita la cuantificación del impacto de diferentes estrategias de gestión, permitiendo evaluar condicionantes externos como el Cambio Climático (que implica un aumento del nivel del mar), variación en la recarga y explotación del acuífero. Es importante utilizar los modelos para el desarrollo de herramientas de gestión. Durante el diagnóstico y prospectiva del plan de manejo del acuífero es una herramienta que permite conocer y desarrollar escenarios sobre el medio físico y sus condiciones de frontera. Posteriormente, en la formulación e implementación de este plan, facilita la dirección correcta de los usos del recurso en el diseño de las estrategias de gestión. En el caso de acuíferos costeros a los actores involucrados les interesa conocer el impacto de diferentes estrategias de manejo que implican:

1. Conocer las relaciones entre la intrusión salina y bombeo para formular las estrategias de explotación del acuífero de tal manera que se reduzca la salinización a través del control del bombeo. Esto se logra conociendo como responde el movimiento de la interfase ante determinados caudales de bombeo junto a variaciones climáticas.
2. Conocer lo que sucede en el acuífero bajo períodos secos, la relación entre el bombeo, la recarga y la intrusión salina con presiones externas como la del turismo.

3. Conocer lo que sucede en el acuífero bajo un aumento del nivel del mar y explotación.
4. Conocer cual es la distancia óptima de los pozos a la línea de costa, caudal de bombeo y profundidad de la rejilla, para evitar la salinización.

Además, es importante destacar que a nivel global se distinguen dos clases de variables como parámetros de entrada a los modelos numéricos, en este caso a nivel costero:

1. Variables Físicas: Aquellos parámetros intrínsecos del acuífero como la conductividad, la dispersión, los espesores y dimensiones del acuífero. Son de gran importancia para lograr representar de una manera acertada el sistema acuífero y si no son correctamente estimados pueden generar errores en los resultados de la modelación.
2. Variables Externas: Son aquellas variables relacionadas con la intervención antrópica sobre el acuífero tales como disminuciones en la recarga por urbanización y cambios de uso en el suelo y aumento del bombeo. De otra parte, están las variables que se han generado por la acción indirecta del hombre tales como el Aumento del nivel del mar y la disminución en la recarga debido a variaciones climáticas. Una vez el sistema acuífero es diagnosticado en los aspectos físicos de una manera correcta, estas variables son involucradas en la definición de escenarios para correr en los modelos.

6.1. Descripción del modelo hipotético

6.2. Datos y Escenarios Trabajados en el modelo hipotético

Para ilustrar las posibles respuestas que presenta un acuífero costero bajo algunas de estas situaciones, específicamente lo que sucede en el acuífero bajo explotación y cambio climático, se implementa el caso hipotético de un acuífero rectangular en una llanura costera de 10km de largo y 1km de ancho. El acuífero se caracteriza por ser tipo superficial libre y poco profundo (20m de espesor), con una de sus fronteras representando la interface mar-acuífero. Se elaboraron un conjunto de simulaciones separadas para analizar diferentes escenarios posibles que se describen en la Figura 6.2 y con mayor detalle en la Tabla 6.2. Se busca comparar estos escenarios y analizar la sensibilidad a las presiones indicadas. Se utilizan rangos de variación acorde a las predicciones presentadas en el Capítulo 1. Se debe aclarar que los resultados presentados aquí no pretenden generalizar la respuesta de los modelos frente al cambio

climático, dadas las particularidades de cada acuífero de acuerdo a sus condiciones hidrogeológicas y socioeconómicas, sino mas bien presentar un esquema de la utilización de los modelos y los posibles tipos de análisis.

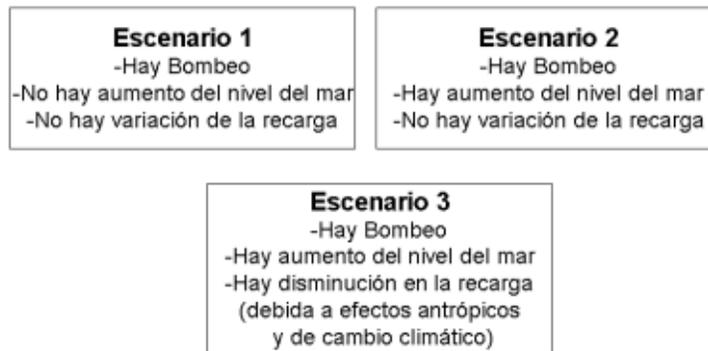


Figura 6.1: Escenarios evaluados con el modelo planteado

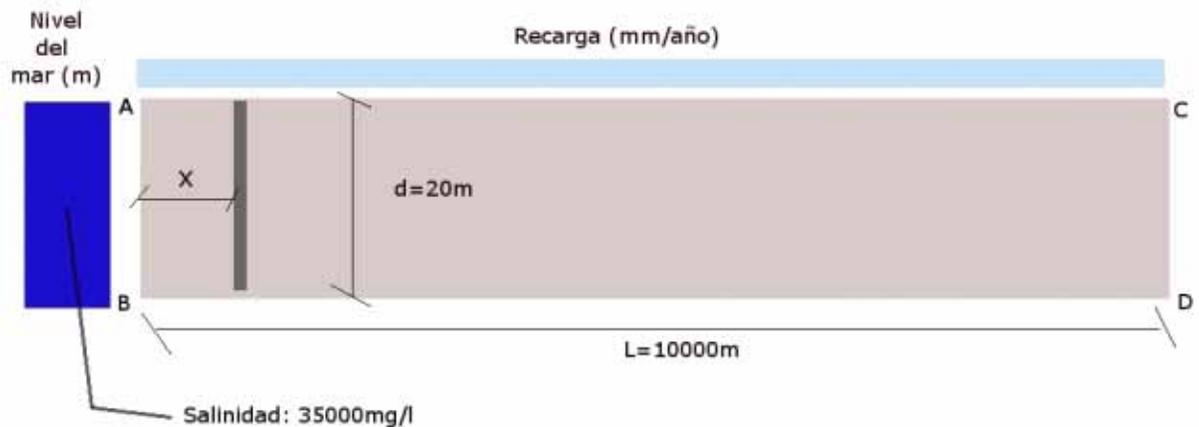


Figura 6.2: Esquema conceptual de modelo hipotético implementado. Se trata de un acuífero de 20m de espesor cuyas fronteras consisten en una recarga constante superficial en la frontera AC, el mar en la frontera AB y un pozo de extracción ubicado a una distancia x de la línea de costa (Exagerado verticalmente).

Dentro del modelo conceptual que se muestra en la figura 6.2, se implementaron las siguientes condiciones de frontera :

1. Recarga superficial sobre toda la frontera AC y no existe otro tipo de recarga proveniente de otras cuencas o de aguas superficiales. Se utilizó un valor

de 50mm/año (aprox. $1400m^3/d$ sobre el dominio del modelo), excepto en el escenario donde se analizó la disminución en la recarga.

2. La frontera AB es una frontera de cabeza constante que representa el mar, a la cual se asocia un flujo másico de sal de 35000mg/l, en todos los casos analizados
3. Los pozos de bombeo se ubican entre los 500 y 2500m de distancia a la línea de costa y se trabaja el criterio de evaluar las tasas de bombeo como porcentajes de la recarga total sobre el acuífero. Se coloca, para todos los casos, una rejilla del 30 % del espesor del acuífero (6.5m) desde el piso, .

Para esta modelación se utilizó el software Visual MODFLOW 4.2 (Waterloo Hydrogeologic), el cuál contiene el paquete SEAWAT-2000 en una interfaz que permite el pre y pos-procesamiento de la información.

6.3. Parámetros y sensibilidad analizada

Los parámetros de entrada al modelo en el paquete SEAWAT (Langevin et al., 2008) se presentan en la Tabla 6.1. Igualmente, se muestran los parámetros analizados en el modelo y se muestra el valor asignado a aquellos que permanecen constantes durante la modelación. Estos parámetros son de carácter físico y están ligados a las propiedades del acuífero. También se observan aquellos que se denominan *sensibles* y son los que se utilizaron en este modelo para simular las condiciones de cada escenario. La descripción y características de los parámetros más importantes se presentan a continuación:

1. **Malla:** Este parámetro se analiza en dos casos, uno con una Malla refinada ($\Delta X = 200m$, $\Delta Y = 160m$, y 10 capas) y otro con una Malla Gruesa ($\Delta X = 400m$, $\Delta Y = 300m$, y 5 capas).
2. **Conductividad:** Este es un parámetro clave muy sensible al movimiento de la interfase agua dulce-agua salada. Se sugiere por ello una evaluación de este parámetro en un rango desde 0.1 m/d hasta 200 m/d a nivel homogéneo. Este análisis de sensibilidad de la conductividad se realiza en el escenario 1, manteniendo los otros parámetros estables.

Tabla 6.1: Parámetros involucrados en la simulación de la cuña salina en modelo de acuífero costero implementado bajo el paquete SEAWAT en el software VISUAL MODFLOW 4.2

| <i>Parámetro</i> | <i>Símbolo</i> | <i>Valor</i> | <i>Unidades</i> |
|-------------------------------------|----------------|--------------|-----------------|
| <i>Geometría</i> | | | |
| Largo | L | 10000 | m |
| Ancho | B | 1000 | m |
| Espesor | d | 20 | m |
| <i>Propiedades de la malla</i> | | | |
| Tamaño Fila | δX | 200 | |
| Tamaño Columnas | δY | 160 | |
| Espesor Capas | δZ | 2 | m |
| <i>Geometría de capas</i> | | | |
| <i>Características del acuífero</i> | | | |
| Tipo capa(Libre-confinada) | | Libre | |
| Unidad de Tiempo | t | dia | d |
| Conductividad Horizontal | k_x | Sensible | m/d |
| Conductividad Transversal | k_y | Sensible | m/d |
| Conductividad Vertical | k_z | Sensible | m/d |
| Densidad agua dulce | ρ_d | 1000 | kg/m^3 |
| Densidad agua salada | ρ_s | 1025 | kg/m^3 |
| Almacenamiento específico | S_s | 1.00E-05 | 1/m |
| Rendimiento específico | S_y | 0.2 | |
| Porosidad Específica | n_t | 0.2 | (%) |
| Porosidad Total | n_e | 0,3 | (%) |
| Dispersión longitudinal | D | 10 | m |
| Relación Disp. Long./ Disp. Transv. | α_v | 0,1 | (%) |
| Relación Disp. Long./ Disp. Vert. | α_t | 0,001 | (%) |
| Coefficiente de difusión | D_m | 0 | m^2/d |
| <i>Condiciones de frontera</i> | | | |
| Cabezas Iniciales | h_0 | Sensibles | |
| Recarga | R | Sensible | m/d |
| Cabeza del Mar | h_{mar} | Sensible | m |
| Flujo másico de sal | C_{mar} | 35000 | mg/l |
| Tasa de Bombeo | B | Sensible | m^3/d |
| Distancia a la línea de costa | l | Sensible | m |

Posteriormente, en los demás escenarios este parámetro se mantiene constante con valores de $K_x = 50m/d$, $K_y = 50m/d$ y $K_z = 5m/d$. La alta sensibilidad del modelo respecto a los cambios en la conductividad hidráulica y la recarga han sido reportados por Ranjan et al. (2005).

3. **Dispersión:** Este parámetro está fuertemente relacionado con el comportamiento de la zona de mezcla agua dulce-agua salada e involucra la velocidad de las líneas de flujo subterráneo entre los poros. En los escenarios este parámetro se mantiene constante con valores de $D = 10m$, un valor que representa la situación en un acuífero poroso reportado en la literatura (Custodio y Llamas 1976)
4. **Cabezas Iniciales:** Cuando el modelo se ejecuta en estado transitorio muestra sensibilidad a este parámetro (Reilly y Harbaugh 2004). Aquí es posible estimar cabezas iniciales de acuerdo a pendientes y formulaciones de modelos analíticos. Posteriormente en modelos que incluyen cambio climático pueden usarse las cabezas finales de modelos sin cambio climático como cabezas iniciales de estas corridas.
5. **Concentraciones Iniciales:** Se deben determinar a partir del estado estacionario en modelos sin Cambio Climático, para introducirlas como concentraciones iniciales de los modelos con Cambio Climático.
6. **Recarga:** Parámetro sumamente importante que influye sobre el movimiento de la interfase ya que determina la cantidad de flujo de agua dulce reteniendo el avance de la cuña salina. En el presente ejemplo, se usó un valor constante de $50mm/año$, que representan la entrada aproximada de $1400m^3/s$ al dominio del modelo. En las corridas del escenario 1 y 2 se usó una recarga constante, luego se varió de acuerdo a los parámetros establecidos en el escenario 3.
7. **Cabeza del mar:** Determina los equilibrios que deben darse entre los flujos de agua dulce y agua marina. En este caso se varió el Aumento del Nivel del Mar en los escenarios 2 y 3 así: 30, 60 y 90 cm.
8. **Tasas de explotación de Pozos:** Las tasas de bombeo se determinaron como porcentaje de la recarga. Específicamente se evalúa lo que sucede al explotar el 10, 30, 50, 70, 90 y 100% de la Recarga.

Tabla 6.2: Parámetros de escenarios trabajados en el modelo implementado (ANM:Aumento del nivel del mar)

| | | Distancia pozos línea costa (m) | Variación Recarga (%) | Bombeo (%Recarga) | ANM (cm) |
|-------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------|
| Escenario 1 | Análisis | | | | |
| Bombeo | Análisis | 500 | 0 | 100 | 0 |
| No ANM | Distancia | 750 | 0 | 100 | 0 |
| No Dism. R | línea costa | 1000 | 0 | 100 | 0 |
| | | 1500 | 0 | 100 | 0 |
| | | 2000 | 0 | 100 | 0 |
| | | 2500 | 0 | 100 | 0 |
| | Análisis | 1000 | 0 | 10 | 0 |
| | Bombeo | 1000 | 0 | 30 | 0 |
| | | 1000 | 0 | 50 | 0 |
| | | 1000 | 0 | 70 | 0 |
| | | 1000 | 0 | 90 | 0 |
| | | 1000 | 0 | 100 | 0 |
| Escenario 2 | | | | | |
| Bombeo | Análisis | 500 | 0 | 100 | 90 |
| ANM | Distancia | 750 | 0 | 100 | 90 |
| No Dism. R | línea costa | 1000 | 0 | 100 | 90 |
| | | 1500 | 0 | 100 | 90 |
| | | 2000 | 0 | 100 | 90 |
| | | 2500 | 0 | 100 | 90 |
| | Análisis | 1000 | 0 | 10 | 90 |
| | Bombeo | 1000 | 0 | 30 | 90 |
| | | 1000 | 0 | 50 | 90 |
| | | 1000 | 0 | 70 | 90 |
| | | 1000 | 0 | 90 | 90 |
| | | 1000 | 0 | 100 | 90 |
| | Tasas ANM | 1000 | 0 | 100 | 30 |
| | | 1000 | 0 | 100 | 60 |
| | | 1000 | 0 | 100 | 90 |
| Escenario 3 | | | | | |
| Bombeo | Análisis | 500 | -40 | 100 | 90 |
| ANM | Distancia | 750 | -40 | 100 | 90 |
| Dism R | línea costa | 1000 | -40 | 100 | 90 |
| | | 1500 | -40 | 100 | 90 |
| | | 2000 | -40 | 100 | 90 |
| | | 2500 | -40 | 100 | 90 |
| | Análisis | 1000 | -40 | 10 | 90 |
| | Bombeo | 1000 | -40 | 30 | 90 |
| | | 1000 | -40 | 50 | 90 |
| | | 1000 | -40 | 70 | 90 |
| | | 1000 | -40 | 90 | 90 |
| | | 1000 | -40 | 100 | 90 |
| | Disminución Tasa Recarga+ANM | 1000 | -20 | 100 | 90 |
| | | 1000 | -40 | 100 | 90 |
| | | 1000 | -60 | 100 | 90 |
| | | 1000 | -20 | 100 | 30 |
| | | 1000 | -20 | 100 | 60 |
| | | 1000 | -20 | 100 | 90 |

9. **Distancia de pozos a la línea de costa:** Este parámetro está relacionado con la proximidad de los pozos de explotación a la línea de costa y es un factor fundamental en el balance bombeo y cuña salina. Se evaluará la sensibilidad del modelo con pozos a 500, 750, 1000, 1500, 2000 y 2500m a la línea de costa. El pozo siempre estará ubicado en el punto medio del ancho transversal, es decir en $Y=500m$.
10. **Escala temporal:** Las organizaciones encargadas del Cambio Climático como el IPCC (2007) y en el caso nacional, el INVEMAR e IDEAM (2003) han establecido horizontes de planificación que se usan al simular condiciones de Cambio Climático. Por ejemplo INVEMAR e IDEAM (2003) usaron lapsos de 30 y 100 años. Igualmente en la literatura se utiliza este rango de tiempo. Por ello, se usó como horizonte de planificación $t=100$ años. Además, se debe mencionar que se usaron períodos de estrés de 10 años, en la mayoría de los casos.

En la tabla 6.2, se presentan los datos específicos de los parámetros evaluados en cada uno de los tres escenarios: Distancia de pozos a la línea de costa, Tasas de Bombeo, Aumento del Nivel del Mar y Variación en la recarga.

6.3.1. Variables de interés

Se proponen los siguientes tipos de análisis para establecer las diferencias entre escenarios:

1. Establecer como medida de referencia la penetración de la cuña salina, medida como la distancia, entre la frontera marina y el punto donde la línea de isoconcentración del 0.7 %, 25 %, 50 %, y 75 % con respecto a la concentración del mar (35000mg/l) intersectan el acuífero. Es decir las líneas correspondientes a las concentraciones de 250, 10000, 17500 y 25000mg/l (Figura 6.3). La medida se toma en la sección perpendicular a la línea de costa correspondiente a la ubicación del pozo es decir en $y=500m$. Estas medidas describen el avance promedio de la cuña y de la zona de dispersión, en especial la línea de isoconcentración del 0.7 %, se interpretará como el límite de cloruros admisible en la legislación colombiana.
2. Construir secciones perpendiculares a la línea de costa, para observar los cambios en la salinidad con la profundidad, estas se muestran solo para el final del período de simulación.

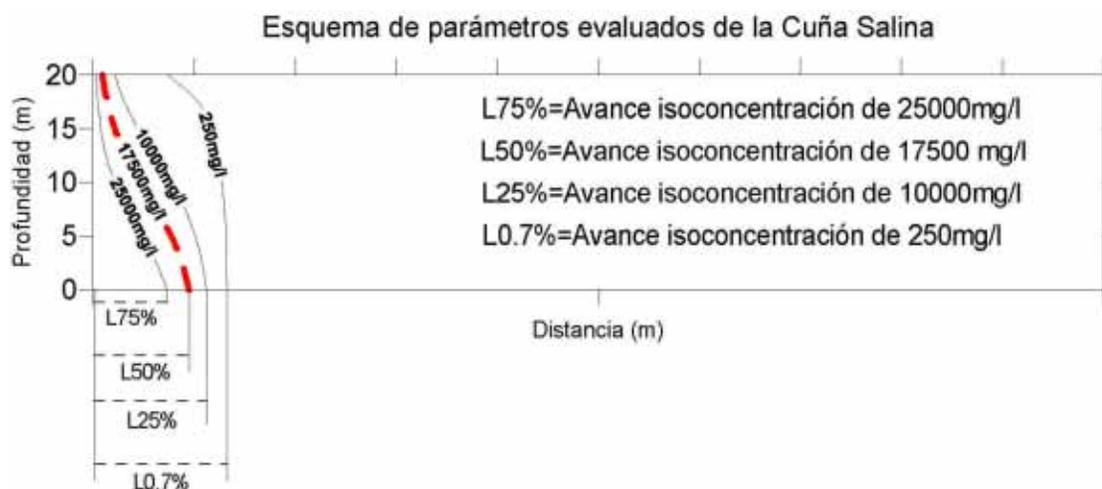


Figura 6.3: Parámetros medidos en el modelo hipotético de acuífero costero: L50 % (Avance de la línea de isoconcentración de 17500 mg/l), L75 % (Avance de la línea de isoconcentración de 25000 mg/l), L25 % (Avance de la línea de isoconcentración de 10000 mg/l), L0.7 % (Avance de la línea de isoconcentración de 250 mg/l)

6.4. Resultados y Análisis

6.4.1. Sensibilidad del modelo a la conductividad hidráulica y tamaño de celdas en la malla

En la figura 6.4, se muestra la penetración de la cuña salina con la variación de la conductividad bajo un bombeo de $1400\text{m}^3/\text{d}$ constante (situación crítica). Se presentan los resultados en una sección perpendicular a la línea de costa, al final del período de simulación, para los casos en los que la conductividad es igual a 1, 10 y $50\text{m}/\text{d}$. Se detecta una penetración de la cuña tan solo del 2 % de la longitud total del acuífero cuando se le asigna una conductividad de $1\text{m}/\text{d}$, y aproximadamente del 10 % para el caso en que es $50\text{m}/\text{d}$. Esto ilustra la sensibilidad del modelo a la conductividad hidráulica y la importancia de estimar correctamente este parámetro a partir de los ensayos de bombeo en pozos representativos de la zona de estudio.

Se observa que una malla gruesa implica soluciones con mayor rugosidad respecto al caso en una malla fina, debido a que las variables de estado de las ecuaciones están siendo evaluadas en celdas muy amplias, esto podría inducir errores al analizar un caso de intrusión muy localizado. Un mayor refinamiento espacial puede implicar mayor costo computacional y en algunos casos dispersión numérica (Reilly y Harbaugh 2004).

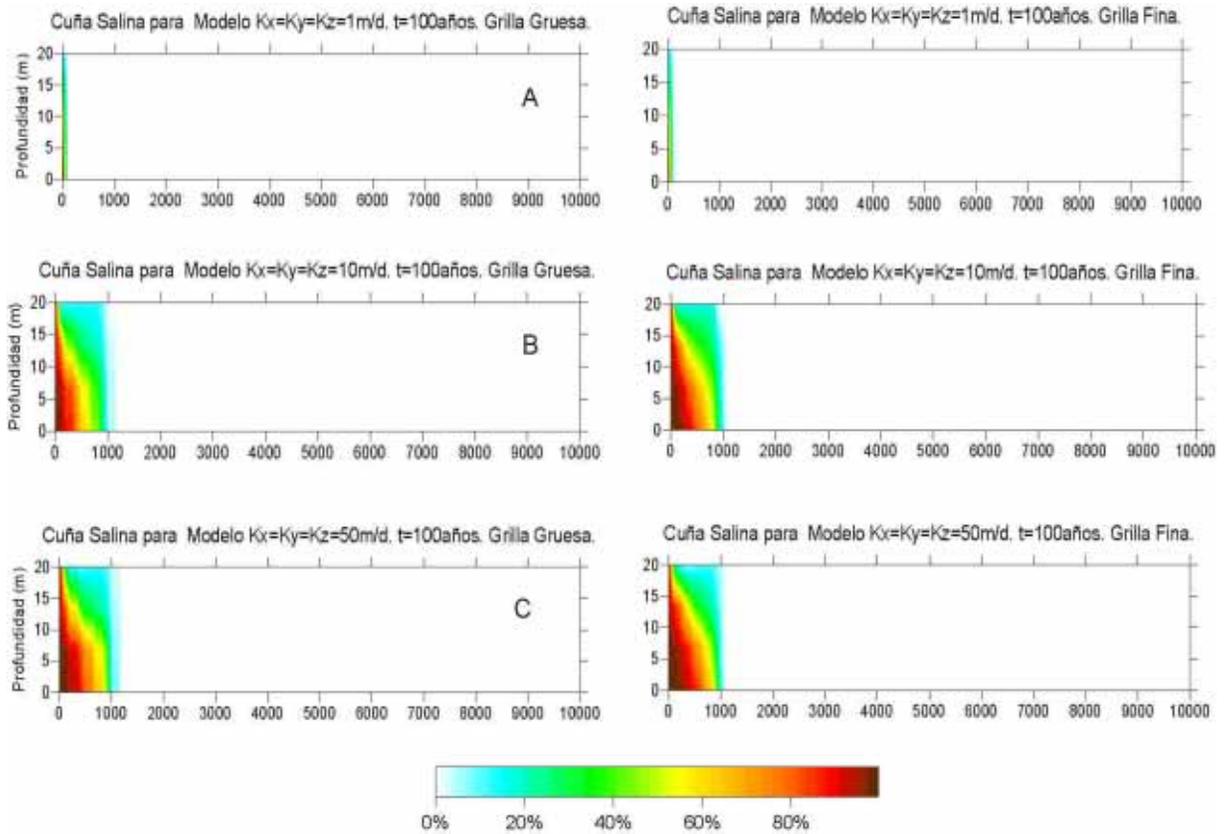


Figura 6.4: Isoconcentración de sal (porcentaje respecto a $C_{Mar}=35000\text{mg/l}$ en una sección perpendicular a la línea de costa en $Y=500\text{m}$, para casos representativos en análisis de sensibilidad del parámetro conductividad, siendo A el caso para una $K=1\text{m/d}$, B el caso para una $K=10\text{m/d}$ y el caso C una $K=50\text{m/d}$. El pozo de explotación está a 1000m de distancia de la línea de costa y la tasa de bombeo es de $1400\text{m}^3/\text{d}$ en todos los casos. Se presentan los resultados en una malla gruesa a la izquierda y en una malla mas refinada a la derecha para cada caso

6.4.2. Análisis de longitud de penetración de cuña salina bajo los diferentes escenarios: Tasas de Bombeo

En la Figura 6.5, se presentan los resultados de la penetración de las líneas de isoconcentración del 50, 25, 75 y 0.7 %, al final del tiempo de simulación, para los tres escenarios propuestos. En este caso, se analizó la influencia de las tasas de bombeo como porcentajes de la recarga, manteniendo la distancia del pozo fija a 1000m de la línea de costa.

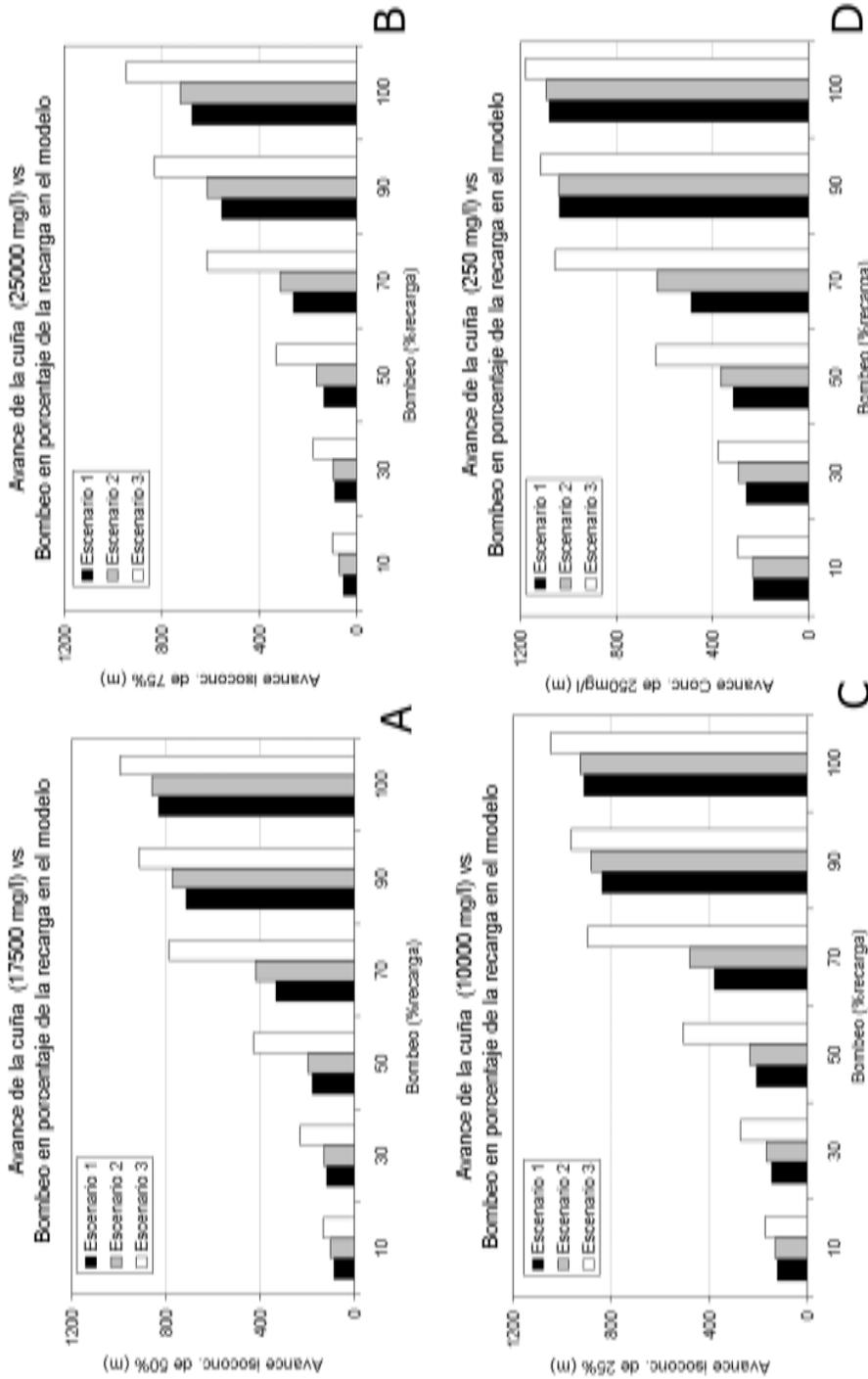


Figura 6.5: Avance de la cuña salina en el modelo: A) Isoconcentración de 50% (17500mg/l), B) Isoconcentración de 75% (25000mg/l), C) Isoconcentración de 25% (10000mg/l), y D) Isoconcentración de 0.7% (250mg/l), bajo diferentes tasas de bombeo (Eje de las abscisas), se analizan los tres escenarios planteados para el acuífero costero idealizado, el pozo se encuentra a 1000m de distancia de la línea de costa

Es evidente que, para todos los escenarios, a medida que las tasas de bombeo aumentan el avance de la cuña tierra adentro es mayor y mas cercano al pozo, siendo la situación más crítica extraer el 100 % de la recarga, caso en el cual se están afectando las reservas del acuífero. Se detecta que el rango de mayor sensibilidad al bombeo esta entre el 70 y 100 % de la recarga, respecto a cuando se extraen tasas menores del 50 %. Se reafirma así, la relación entre el bombeo y el avance de la cuña salina. Cuando se sobreexplota el acuífero costero con abatimiento excesivo de los niveles freáticos se está asegurando el avance salino del mar en el modelo.

Al comparar los escenarios, se encuentra que las menores penetraciones están asociadas al Escenario 1, mientras la situación más crítica se da en el Escenario 3 (para todos las tasas de bombeo analizada), concluyendose así, que la mayor sensibilidad a la penetración de la cuña del acuífero esta accionada por los los efectos conjuntos de extracción, aumento del nivel del mar y disminución de la recarga. La situación es más crítica desde que se extrae el 70 % de la recarga por medio del pozo (Figura 6.5), especialmente en el escenario 3. Al revisar las penetraciones de las líneas de isoconcentración del 75 % y 25 % de sal en los modelos (Figura 6.5B y 6.5C), se encuentran las tendencias anteriormente descritas, detectandose mayores diferencias entre escenarios para las líneas del 75 % (entre 25000 y 35000 mg/l) que representan la parte mas salinizada del acuífero. El avance de la concentración de 250mg/l (Figura 6.5D) esta muy cercana al pozo a partir de que se extrae un 50 % de la recarga, lo que implicaría que el grado de salinización en el pozo este muy cerca al límite legal establecido por la norma colombiana.

6.4.3. Análisis de longitud de penetración de cuña salina bajo los diferentes escenarios: Distancia de Pozos a la línea de costa

En la Figura 6.6, se presentan los resultados de la penetración de la línea de isoconcentración del 50, 75, 25 y 0.7 % en los modelos para los tres escenarios propuestos. Se evaluó la influencia de la distancia del pozo de la línea de costa manteniendo la tasa de bombeo en un 70 % de la recarga para todos los casos ($980m^3/d$).

La tendencia de los escenarios 1 y 2 describe un máximo de penetración de la cuña salina cuando el pozo está ubicado a 750m de la línea de costa. Los pozos a distancias mayores de 750m están asociados a menores avances (Figura 6.6). En síntesis, la vulnerabilidad del modelo al avance de la cuña para los escenarios 1 y 2 es mayor al ubicar el pozo a distancias de 500m y 750m. La tendencia del escenario 3 describe un máximo de penetración cuando el pozo está ubicado a 1500m de la línea de costa para el avance de las isoconcentraciones analizadas.

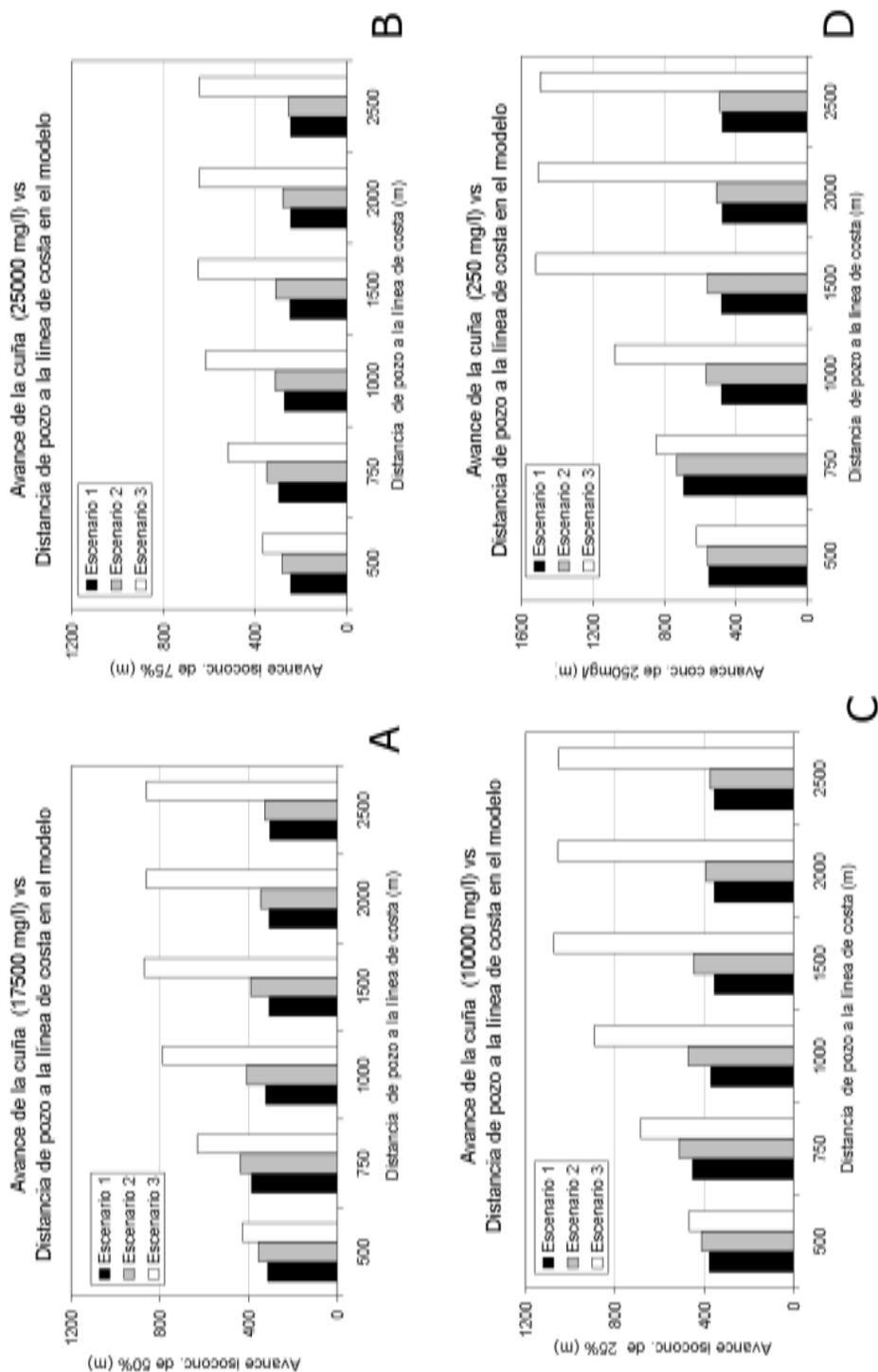


Figura 6.6: Avance de la cuña salina en el modelo: A) Isoconcentración de 50% (17500mg/l), B) Isoconcentración de 75% (25000mg/l), C) Isoconcentración de 25% (10000mg/l), y D) Isoconcentración de 0.7% (250mg/l), ubicando el pozo a diferentes distancias de la línea de costa (Eje de las abscisas) en los tres escenarios planteados para el acuífero costero idealizado, la tasa de bombeo es de $980m^3/d$ para todos los casos

Los resultados del escenario 3 son significativamente mayores que los obtenidos para los escenarios 1 y 2 para los avances de isoconcentración analizados. Lo que reafirma la sensibilidad del modelo a la acción conjunta del bombeo, aumento del nivel del mar y disminución en las tasas de recarga. La zona de mezcla (Longitud entre el avance de isoconcentración del 25 y 75 %) es mas ancha para aquellas situaciones donde los pozos estan mas alejados de la costa. Para los escenarios 1 y 2, la isoconcentración de 250mg/l en el modelo, toma valores mas bajos a medida que aumenta la distancia del pozo a la línea de costa. En el escenario 3, los avances son mayores, presentandose el caso más crítico cuando se ubica el pozo a 1500m de distancia de la línea de costa.

6.4.4. Análisis de secciones perpendiculares a la línea de costa

A continuación se presenta la variación de la salinidad en porcentaje respecto a la concentración del mar ($C_{Mar} = 35000mg/l$), en secciones perpendiculares a la línea de costa para el Escenario 1 (Figura 6.7), Escenario 2 (Figura 6.8), y Escenario 3 (Figura 6.9). Se presentan los casos para una tasa de bombeo de $980m^3/d$ (70 % de la recarga) y $1400m^3/d$ (100 % de la recarga), evaluando lo que sucede al ubicar el pozo a una distancia 1000 y 2500m de la línea de costa.

Estos casos corresponden a los límites del rango con mayor sensibilidad al bombeo (Entre el 70 y 100 % de la recarga), identificado en la sección 6.4.2. Se observa la formación de la cuña con zonas de mezcla mas anchas para el caso en el cuál el pozo está a 2500m. Cuando el bombeo equivale al 100 % de la recarga, la salinización es mucho mas significativa en los tres escenarios respecto a la que se observa cuando se extrae el 70 %. Específicamente cuando se extrae el 100 % de la recarga para el caso del pozo de bombeo a 2500m de la línea de costa, en el Escenario 1 se observan isoconcentraciones en la cercania al pozo aproximadas al 30 % ; en el escenario 2, son cercanas al 40 %, y las concentraciones de sal en el escenario 3 alcanzan el 60 % de isoconcentración. Cuando se extrae el 70 % de la recarga la máxima salinización se alcanza en el escenario 3 donde las concentraciones de sal en el pozo alcanzan un máximo de 5 % de isoconcentración. Al analizar las vistas en planta del avance horizontal de la cuña, se observa la influencia de la ubicación del pozo en la mitad del ancho de la sección por la formación de un frente salino en la zona de captura del pozo.

En síntesis, los resultados muestran que el bombeo intenso, sumado al ascenso del nivel del mar y disminución en las tasas de recarga, pueden estresar fuertemente al acuífero causando una intrusión salina más aguda . El análisis de este tipo de

situaciones es de gran utilidad para la administración del recurso hidrogeológico en zonas costeras.

Se debe aclarar que este es un caso simplificado e ilustrativo en donde solo se usa un pozo de explotación. En casos reales, como se ha mencionado a lo largo de la investigación, se presentan distribuciones de sal complejas, influenciadas por heterogeneidades geológicas, la ubicación de los pozos y las tasas de explotación.

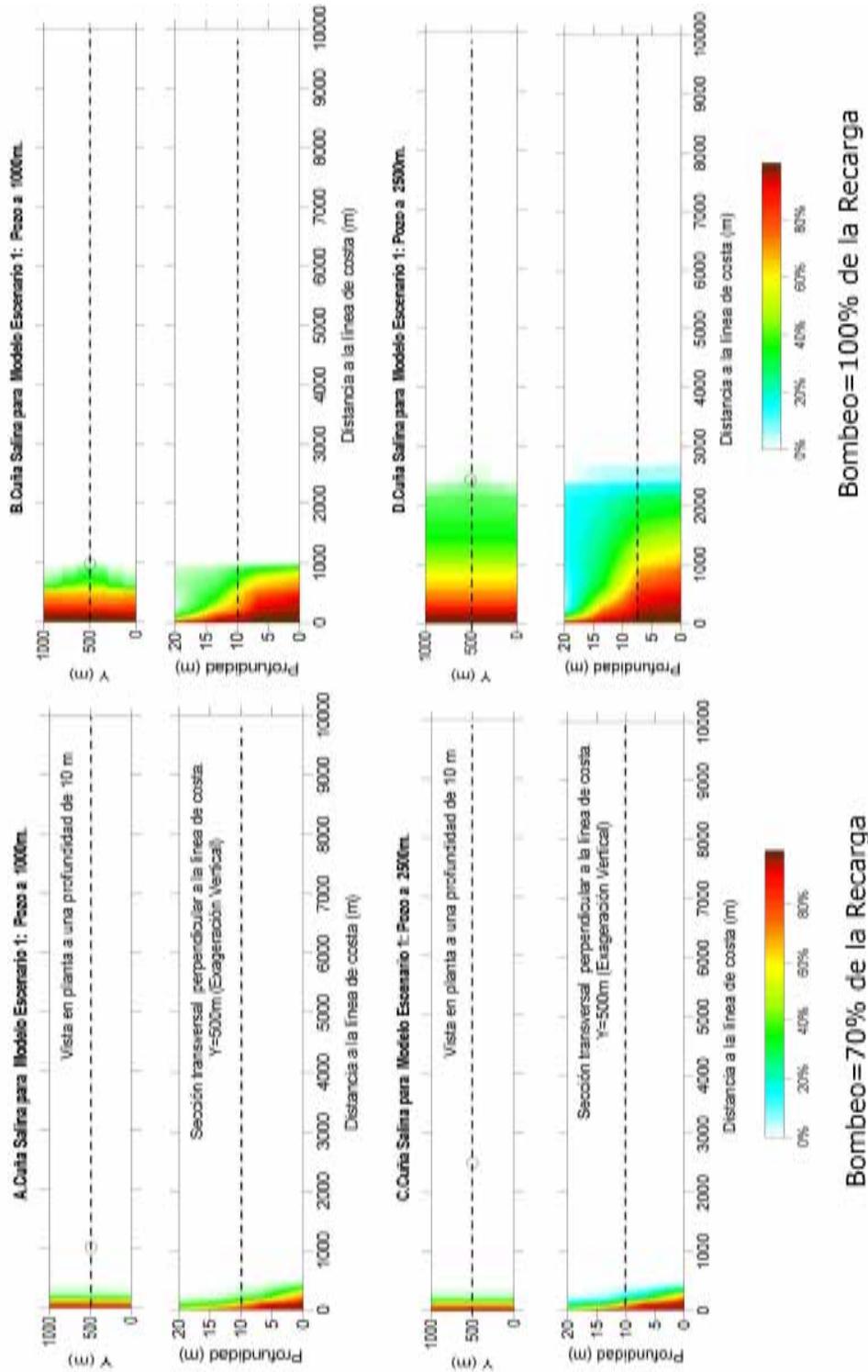


Figura 6.7: Isoconcentración de sal (porcentaje respecto a $C_{Mar}=35000\text{mg/l}$) para Escenario 1. A y B: Caso de pozo a 1000m de distancia de la línea de costa. C y D: Caso de pozo a 2500m de distancia. En cada uno se presenta la vista en planta a una profundidad de 10m y un corte transversal de una sección perpendicular a la línea de costa en $Y=500\text{m}$. La tasa de bombeo es de $980\text{m}^3/d$ para los casos A y C, y de $1400\text{m}^3/d$ para los casos B y D

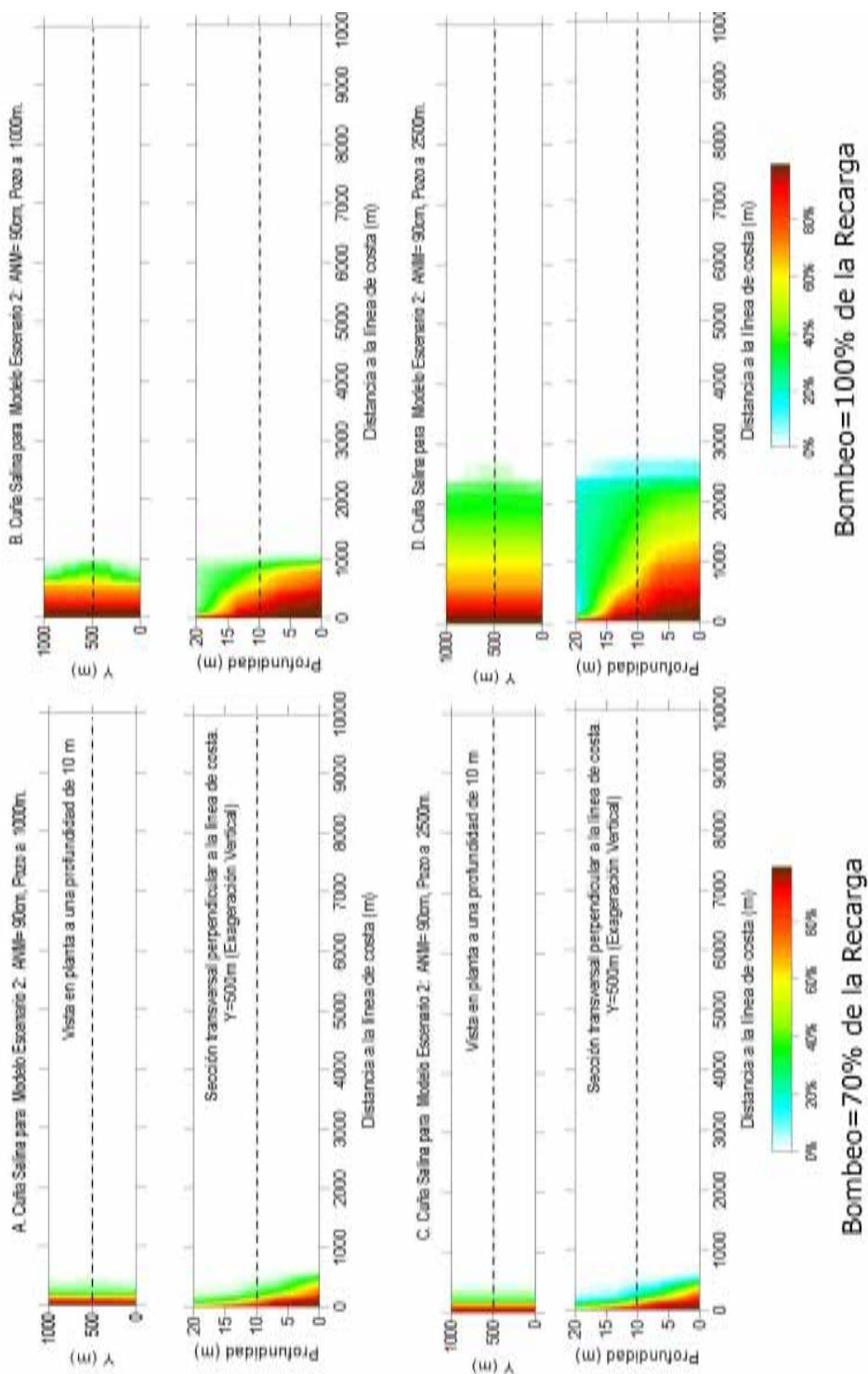


Figura 6.8: Isoconcentración de sal (porcentaje respecto a $C_{Mar}=35000\text{mg/l}$) para Escenario 2. A y B: Caso de pozo a 1000m de distancia de la línea de costa. C y D: Caso de pozo a 2500m de distancia. En cada uno se presenta la vista en planta a una profundidad de 10m y un corte transversal de una sección perpendicular a la línea de costa en $Y=500\text{m}$. La tasa de bombeo es de $980\text{m}^3/d$ para los casos A y C, y de $1400\text{m}^3/d$ para los casos B y D

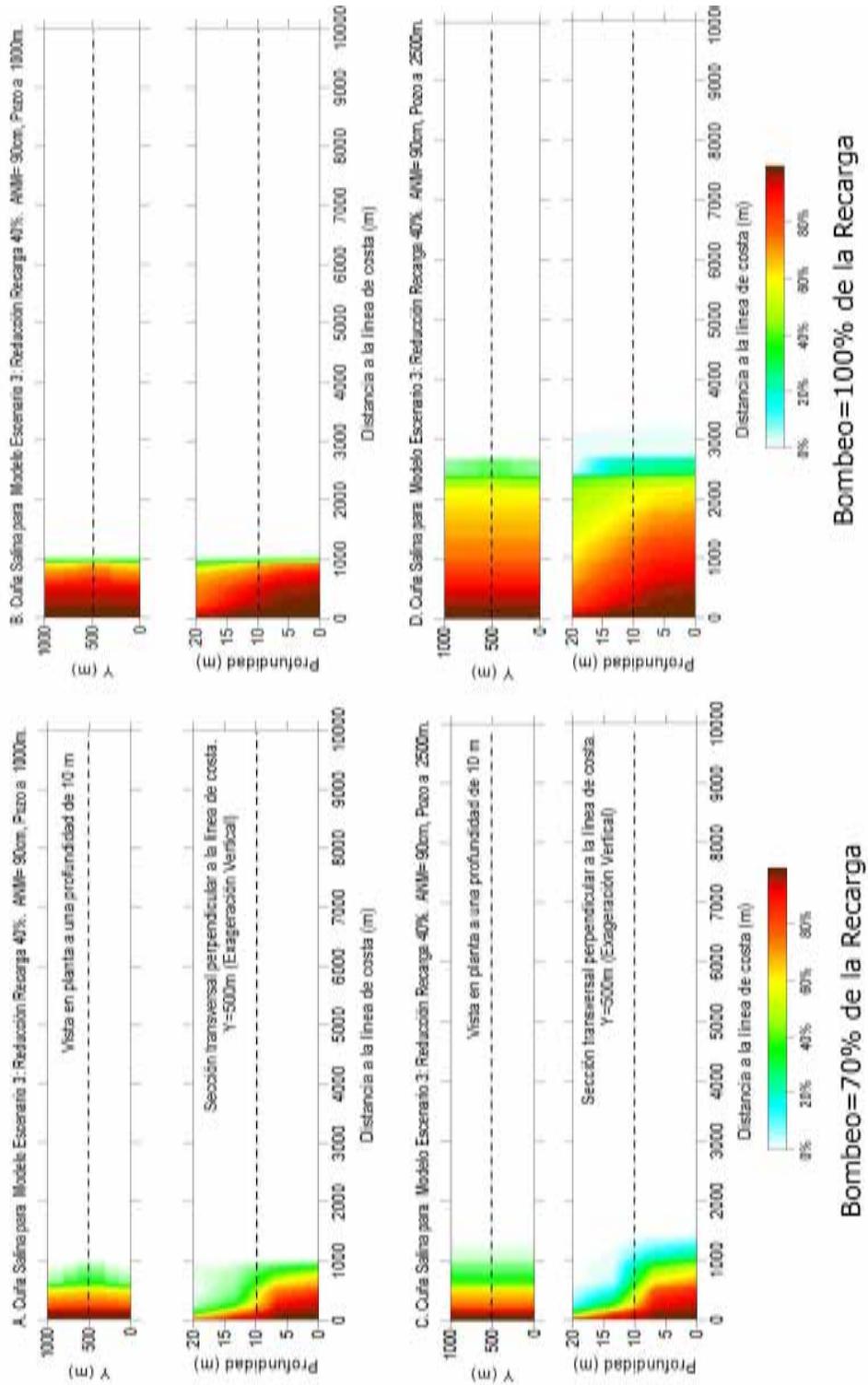


Figura 6.9: Isoconcentración de sal (porcentaje respecto a $C_{Mar}=35000\text{mg/l}$) para Escenario 3. A y B: Caso de pozo a 1000m de distancia de la línea de costa. C y D: Caso de pozo a 2500m de distancia. En cada uno se presenta la vista en planta a una profundidad de 10m y un corte transversal de una sección perpendicular a la línea de costa en $Y=500\text{m}$. La tasa de bombeo es de $980\text{m}^3/d$ para los casos A y C, y de $1400\text{m}^3/d$ para los casos B y D

Capítulo 7

Conclusiones

- Los acuíferos costeros son estructuras geológicas importantes para el abastecimiento hídrico en zonas litorales. La capacidad de almacenamiento y transporte de agua de estos cuerpos depende de las características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas (Recarga). Debido a la interacción del acuífero con el mar se presentan problemas de *Intrusión Salina*, fenómeno por el cual el agua marina penetra debajo del agua dulce en el acuífero, La intrusión salina es un fenómeno que depende de las propiedades hidráulicas del acuífero, el clima y la intervención humana. La intrusión Salina motivada por bombeo es uno de los problemas para la gestión del recurso más ampliamente reportados en la literatura mundial.
- La escasez y contaminación del agua superficial proyectan a los acuíferos costeros como una fuente importante para abastecimiento humano y actividades económicas. Sin embargo, la urbanización, los cambios de usos en el suelo, el vertimiento de efluentes, el Turismo y la falta de gobernabilidad, son problemas con impacto que pueden disminuir las reservas y recarga de los acuíferos costeros, por lo que se requieren políticas claras de manejo.
- La sobreexplotación de acuíferos costeros produce descenso de los niveles piezométricos y por lo tanto avance tierra adentro de la interfase agua dulce-agua salada en los acuíferos costeros. Una mezcla de agua dulce con 2% de agua salada la hace no apta para consumo humano. A medida de la proximidad de los pozos a la línea de costa hay mayor probabilidad de salinización por agua marina.
- La salinización del acuífero costero puede estar atribuida también a sedimentos marinos parcialmente lavados dentro o en zonas aledañas al acuífero, desplazamiento de agua salada atrapada en formaciones profundas, infiltración de aguas

salobres desde estuarios o fuentes superficiales, entre otros.

- Se resalta la importancia del *Cambio Climático* como un condicionante externo de gran importancia para la gestión del recurso subterráneo en zonas costeras dado que implica una influencia en la dinámica de este por el aumento del nivel del mar y variación en las tasas de recarga, por lo que se espera un aumento en las tasas de salinización del acuífero. Si a estas condiciones se le suma la explotación intensa, los escenarios de sostenibilidad del acuífero son críticos.
- Consecuencias adicionales del *Cambio Climático* sobre acuíferos costeros son: Variaciones en la fluctuación de las superficies piezométricas, Efectos sobre las presiones de poros del suelo y Cambios en los volúmenes y calidad del agua. Las investigaciones alrededor del mundo relacionadas con las consecuencias e impactos potenciales del cambio climático sobre sistemas hidrogeológicos están generalmente centradas en la salinización de acuíferos debido al aumento del nivel mar y a la alteración de las tasas de recarga.
- La dinámica de los ambientes geomorfológicos se relacionan con el flujo del agua subterránea en zonas litorales, influyendo espacial y temporalmente en aspectos como: La ubicación y/o extensión de las zonas de recarga y descarga del acuífero, la estimación del balance de entrada y de salida de agua de la cuenca y el direccionamiento de los caminos preferenciales de aguas superficiales y subsuperficiales, entre otros.
- Las características de los ambientes geológicos en los que se desarrollan los acuíferos costeros influyen en el tipo de porosidad de la estructura, distinguiéndose así acuíferos *porosos* en donde predomina la porosidad primaria y *cársticos*, donde predomina la porosidad secundaria causada por disolución de la roca y la presencia de discontinuidades tales como fisuras, fracturas, juntas abiertas y fisuras amplias.
- El sistema de flujo de los acuíferos costeros está determinado por las configuraciones derivadas de procesos geológicos, por la cabeza hidráulica que el nivel del mar les aplica y por la mayor densidad del agua salina respecto a la dulce. En la mayoría de estos sistemas, el flujo de agua subterránea fluye naturalmente hacia el mar debido al potencial producido por la recarga tierra adentro.
- La recarga juega un papel fundamental, pues establece los ritmos de almacenamiento y por lo tanto de potencial para contener el flujo marino hacia zonas de producción del acuífero.

- La descarga del acuífero costero se da principalmente sobre la línea de costa, sin embargo, puede estar relacionada con cuerpos de agua dulce como en el caso de humedales costeros alimentados por líneas de flujo de agua subterránea regionales. La descarga subterránea es una fuente de agua y compuestos disueltos, que transporta gran cantidad de nutrientes y contaminantes.
- La cuña de agua salada o cuña salina es la masa de agua salada de gran longitud con sección en forma de cuña, apoyada en la base del acuífero y con el vértice tierra adentro
- Las configuraciones de las líneas de flujo y desarrollo de cuñas salinas en acuíferos costeros varían de acuerdo a las características del acuífero (libre, confinado, semiconfinado, multicapa e insular). Se señala la importancia de la cabeza piezométrica del acuífero a la salida del mar, la importancia de flujos verticales y el aislamiento entre capas verticales por estratos pocos permeables.
- Existen formulaciones matemáticas y modelos que permiten abordar cuantitativamente las características de la cuña marina que penetra en el acuífero costero, estos utilizan diferentes hipótesis y marcos teóricos que desde esta tesis se abordaron como: *i. Modelos de interfase abrupta*: asumen que el agua salada y dulce son miscibles, y *ii. Modelos de zona de mezcla*: Asumen fluidos miscibles, es decir que la interfase es una zona de mezcla donde se encuentran interactuando aguas dulces, salobres y saladas.
- Desde la hidrostática, para estudiar la intrusión salina se asume que la conservación de la masa es equivalente a la conservación del volumen, y generalmente se utiliza la hipótesis de Dupuit (Despreciando velocidades verticales del flujo). La formulación de Ghyben-Herzberg (1899) es una de las más antiguas dentro de este campo y ampliamente usada, aunque en ocasiones ha demostrado no funcionar.
- Desde la hidrodinámica la intrusión salina en acuíferos costeros está descrita por la ley de Darcy y las ecuaciones de flujo y transporte en el agua subterránea, que implican la conservación del movimiento y la masa, por ello el carácter del flujo es de densidad variable. El problema de Henry (1964), es uno de los más representativos de esta formulación para estudiar la intrusión salina y ha sido utilizado para validar modelos numéricos de densidad variable ya que posee una solución semianalítica.
- La condición adecuada para simular el mar en problemas de intrusión salina, es la de flujo másico con concentración dependiente de la dirección de flujo, en

donde si se produce una entrada en la frontera, el fluido tendrá la concentración externa, y si se produce una salida, el fluido tendrá la concentración del acuífero.

- Existe una amplia variedad de modelos numéricos tanto a nivel comercial como de investigación. La ventaja de los paquetes comerciales es que integran el preprocesamiento de los datos, posprocesamiento de los resultados y procesamiento. Dentro de los modelos numéricos más importantes para simular la intrusión salina se encuentran el SEAWAT (disponible en Visual Modflow 4.2) y SUTRA del servicio geológico de Estados Unidos (USGS), el FEFLOW de la empresa alemana WASY, el MOCDENS3d diseñado en Holanda, y el MODHMS de la empresa HydroGeoLogic entre otros.
- El manejo de acuíferos costeros se acopla al esquema de ordenación y manejo de cuencas del Decreto 1729 del 2002 al identificar los pasos para la construcción de cada una de las etapas del proceso metodológico: Aprestamiento, Diagnóstico, Prospectiva, Formulación, Implementación y Seguimiento. Este es un esquema flexible y propone lineamientos generales que están ligados a planes de gestión ambiental de escala más gruesa como el MIZC. Los actores interesados en el proceso deben ser involucrados para que se realicen acuerdos y resoluciones que definan la estrategia de gestión sostenible del acuífero de acuerdo a las particularidades del medio físico y económico.
- El esquema de manejo de acuíferos propuesto permite articular, a través de la etapa de aprestamiento, a las diferentes instituciones y actores (CARs, Comunidades, Municipios, Gremios e instituciones como la DIMAR e INVEMAR) y planes de gestión involucradas (Manejo Integrado de Zonas Costeras MIZC, Planes de Gestión Ambiental PGAR, Planes de ordenación y Manejo de Cuencas POMCA, Planes de ordenamiento territorial POT) . En este se llegan a acuerdos institucionales y se resuelven conflictos de jurisdicción a través de una *Comisión Conjunta* que solo puede ser conformada por las CAR en la zona, y se definen los objetivos del plan de manejo de la cuenca teniendo claras las interacciones entre el paisaje superficial y subterráneo.
- Dentro de las etapas del plan de manejo, la Prospectiva es clave para articular la situación física, socioeconómica y problemática actual del acuífero costero con los escenarios deseados y factibles. El Cambio Climático se presenta como un condicionante externo muy importante para evaluar en esta etapa. Esto es posible mediante la utilización de modelos numéricos engranados con escenarios que implican aumento del nivel del mar y cambios en los usos del suelo.

Referencias

- Abarca, E. (2006, Marzo). *Seawater in complex geological environments*. Ph. D. thesis, Universidad politécnica de Cataluña, Cataluña.
- Abarca, E., J. Carrera, X. Sanchez-Vila, y M. Dentz (2007). Anisotropic dispersive Henry problem. *Advances in Water Resources* (30), 913–926.
- Appelo, C.A.J. Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution* (4 ed.). Rotterdam, The Netherlands: A.A. Balkema.
- Araguas, L. (2003). Mecanismos y origen de la salinización en acuíferos costeros. *Revista Industria y Minería, España* (352), 26–34.
- Arnell, N. (2004). Climate change and global water resources: Sres emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* (14), 31–52.
- Badon, G. W. (1889). Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam. *The Hague*, 21.
- Barros, O. y Llanusa, H. (2001). Impacto del cambio global en la dinámica de la intrusión marina. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental (Centro Nacional de Hidrología y Calidad de las Aguas, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba)*(4).
- Baxter, G y Wallace, C. (1916). Changes in volume upon solution in water of the halogen salts of the alkali metals 11. *Journal of the American Chemical Society*.
- Bobba, A. (2007). *Groundwater*, Chapter Groundwater Development and Management of Coastal Aquifers (including Island Aquifers) through Monitoring and Modeling Approaches, pp. 51. National Water Research Institute Burlington, ON, Canada, L7R 4A6: Springer.
- Bocanegra, E. (2005). La explotación de acuíferos costeros como base de su gestión. *Texto Inédito*, 8.
- Bokuniewicz, H. (2001). Toward a coastal ground-water typology. *Journal of Sea Research* (46), 99–108.

- Burak, S., E. Dogan, y C. Gazioglu (2004). Impact of urbanization and tourism on coastal environment. *Ocean Coastal Management* (47), 515–527.
- Cheng, A. y D. Ouazar (2004). *Coastal aquifer management: monitoring, modeling, and case studies.*, Volume 107. Lewis.
- Cooper, H. (1959). A hypothesis concerning the dynamic balance of freshwater and saltwater in a coastal aquifer. *J. Geophys. Res.*, (4), 461–467.
- CORALINA (1999). Plan de manejo de las aguas subterráneas de la isla de san andrés 2000-2009. Technical report, Corporación Autónoma Regional de San Andrés, San Andrés Islas.
- CORPOGUAJIRA (2007, Noviembre). Resultados de la gestión sostenible del agua subterránea con el proyecto rla/8/031 colombia. Pereira, Risaralda. Corporación Regional Autónoma de la Guajira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Custodio, E. (1988). *Groundwater problems in coastal areas* (1 ed.), Chapter Coastal Aquifers, pp. 6–10. Studies and reports in hydrology. UNESCO.
- Custodio, E. (2002). Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. *Groundwater and human development.*, 1905–1918.
- Custodio, E. y M. Llamas (1976). *Hidrología Subterránea Tomo II*, Volume 1. Ediciones OMEGA.
- Dausman, A. y C. Langevin (2005). Movement of the saltwater interface in the surficial aquifer system in response to hydrologic stresses and water-management practices, broward county, florida. Scientific Investigations Report 2004-5256, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Dentz, M., D. Tartakovsky, E. Abarca, A. Guadagnini, X. Sanchez-Vila, y J. Carrera (2005). Perturbation analysis of variable density flow in porous media. *J. Fluid Mech.*.
- Diersch, A. y B. Kolditz (2002). Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in Water Resources* (25), 899–944.
- Diersch, H. (2002). Feflow reference manual, finite element subsurface flow and transport simulation system. *WASY Institute for Water Resource Planning and Systems Research Ltd., Berlin*, 278 p.
- Domenico, P. y F. Schwartz (1997). *Physical and chemical hydrogeology* (2 ed.). John Wiley and sons.
- Elder, J. (1967). Transient convection in a porous medium. *J. Fluid Mech.* 27, 609–623.

- Feseker, T. (2007). *Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern germany*. Hydrogeology Journal 15, 267–279.
- Foster, S. (1992). *Unsustainable development and irrational exploitation of groundwater resources in developing nations. an overview. IAH Hydrogeology Selected Papers 3*.
- Foster, S. y B. Morris (2006a). *Evaluation of groundwater. how do i assess the extent of urban groundwater? Technical report, World Bank*.
- Foster, S., A. Tuinhof, K. Kemper, H. Garduño, y M. Nanni (2002-2006). *Caracterización de sistemas de agua subterránea conceptos clave e ideas erróneas frecuentes. La Serie de Notas Informativas del GW-MATE 2, GW-MATE Banco Mundial, Washington D.C., EEUU*.
- Garduño, H., S. Foster, M. Nanni, K. Kemper, A. Tuinhof, y P. Koundouri (2002-2006). *El agua subterránea en la planificación hídrica nacional y de cuencas. promover una estrategia integral. Gestion sustentable del agua subterránea. Conceptos y herramientas. (Serie de nota informativa 10.), 10p*.
- Giambastiani, M., M. Gualbert, O. Essink, y J. Stuurman ((2007)). *Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of ravenna (italy): A numerical model*. Journal of Hydrology (340), 91–104.
- Glover, R. (1959). *The pattern of freshwater flow in a coastal aquifer*. J. Geophys. Res.@(4), 457–459.
- Hansen, H. (1971). *Common stratigraphic boundaries associated with coastal plain aquifers*. Groundwater@(1), 5–12.
- Harbaugh, A., E. Banta, M. Hill, y M. McDonald (2000). *Modflow-2000, the u.s. geological survey modular ground-water model user guide to modularization concepts and the ground-water flow process*. U.S. Geological Survey Open-file report.
- Henry, H. R. (1964). *Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers*. Water-Supply Paper 1613-C.
- Hidalgo, J., L. Sloten, y J. Carrera (2007). *Simulación y calibración de problemas de intrusión marina: hipótesis básicas e implicaciones*. Boletín Geológico y minero@(Especial), 577–592.
- Hiscock, K. y Y. Tanaka (2006). *Potential impacts of climate change on groundwater resources: From the high plains of the u.s. to the flatlands of the u.k*. In National Hydrology Seminar, United Kingdom, pp. 19–26. School of Environmental Sciences, University of East Anglia.

- Holman, I. (2006). *Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward?* Hydrogeology Journal (14), 637–647.
- Hubbert, M. (1940,). *The theory of groundwater motion.* J.Geol.@(8), 785–944.
- IDEAM (2001). *Vulnerabilidad y adaptacion de la zona costera colombiana al ascenso acelerado del nivel del mar. documento técnico de soporte para primera comunicación nacional de colombia ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Technical report.*
- IDEAM (2004, Enero). *Guía técnico científica para el manejo de cuencas hidrográficas en colombia. Technical Report Versión 1, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá.*
- IDEAM (2007, Septiembre). *Guía técnico científica para el manejo de cuencas hidrográficas en colombia. Technical Report Versión 2, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá.*
- IGME (1988). *Modelación de la intrusión marina. revisión de métodos. pp. 63p. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros. TIAC'88.*
- Ingeominas (2004). *Programa de exploración de aguas subterráneas. Technical report, Instituto Colombiano de Geología y Minería, Bogotá.*
- INVEMAR (2003a). *Conceptos y guía metodologica para el manejo integrado de zonas costeras en colombia. Technical report, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.*
- INVEMAR, M. (2003b). *Programa holandés de asistencia para estudios en cambio climático: Colombia.definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (caribe, insular y pacífico) y medidas para su adaptación. resumen ejecutivo. Technical report, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés. Vinculado al Ministerio del Medio Ambiente, Santa Marta-Colombia.*
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*
- IPCC. Bindoff, N., J. Willebrand, V. Artale, J. Cazenave, K. H. C. Gregory, S.and Gulev, Y. Le Quere, S.and Levitus, C. Nojiri, L. Shum, L. Talley, y A. Unnikrishnan (2007b). *Observations: Oceanic climate change and sea level. in: Climate change 2007: The physical science basis. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Technical report, IPCC.*

- Kumar, C., A. Chachadi, B. Purandara, y N. Varadarajan (2007). *Modelling of a coastal aquifer using feflow. Technical Report NIH/GWD/04-07/1, National Institute of Hydrology of India, India.*
- Lambrakis, N. y G. Kallergis ((2001)). *Reaction of subsurface coastal aquifers to climate and land use changes in greece: modelling of groundwater refreshing patterns under natural recharge conditions. J Hydrol@((1-4)), 19-31.*
- Langevin, C., W. Shoemaker, y W. Guo (2003). *Modflow-2000, the u.s. geological survey modular ground-water model-documentation of the seawat-2000 version with the variable-density flow process (vdf) and the integrated mt3dms transport process (imt). Open-file report 03-426, U.S. Geological Survey Open-File Report 03-426.*
- Langevin, C., D. T. Thorne, M. Alyssa, A. Dausman, y M. Sukop (2008). *Seawat version 4: A computer program for simulation of multi-species solute and heat transport. Technical Report Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, U.S. Geological Survey.*
- Langevin, C. D. (2001). *Simulation of ground-water discharge to biscayne bay, southeastern florida. Technical Report Water-Resources Investigations Report 00-4251, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Tallahassee, Florida.*
- Langevin, C. D., E. D. Swain, y M. A. Wolfert (2002). *Numerical simulation of integrated surface water/groundwater flow and solute transport in the southern everglades, florida.*
- Larabi, A., M. Faouzi, y A. H. Cheng (2008, Junio). *Assessment of groundwater resources in rmel coastal aquifer (morocco) by seawat.*
- Lawrence, A., B. Morris, y S. Foster (1998). *Hazards induced by groundwater under rapid urbanisation, in maunds jg and eddleston m (eds) geohazards in engineering geology. geological. Geohazards in Engineering Geology. Engineering Geology Special Publications (15), 319-328.*
- Loáiciga, H. y T. Pingel (2002). *Assessment of seawater intrusion potential from sea level rise in coastal aquifers of california.*
- Lobo-Guerrero, U. A. (2005). *Políticas y gestión del agua subterránea en colombia. In II Congreso Colombiano de Hidrogeología.*
- Lozano, J. y D. Pabón (2003a). *El ascenso del nivel del mar: escenarios vs. realidad. GACETA Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales@((9)), 1-4.*
- Lozano, J. y J. Pabón (2003b). *El ascenso del nivel del mar: escenarios vs. realidad. GACETA Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales@((9)),*

4.

- Maimone, M. (2002, 6-10 May). *Developing an effective coastal aquifer management program*. Delft, The Netherlands, pp. 327–336. 17th Salt Water Intrusion Meeting.
- Manzano, M. (2002). *El papel de los acuíferos costeros en la gestión del medio natural*. GROUNDWATER AND HUMAN DEVELOPMENT, 2017–2024.
- Marín, R. (1992). Estadísticas del agua en Colombia. Bogotá.
- Masterson, J. P. y S. P. Garabedian (2007). *Effects of sea-level rise on ground water flow in a coastal aquifer system*. Ground Water@2, 209–217.
- Melloul, M. y M. Collin (2006). *Hydrogeological changes in coastal aquifers due to sea level rise*. Ocean Coastal Management 49, 281–297.
- Mérida, L. (2001). La evolución de la intrusión salina en el acuífero marplatense. Technical report, OSSE.
- Michael, H., A. Mulligan, y C. Harvey (2005, Agosto). Seasonal oscillations in water exchange between aquifers and the coastal ocean. *Nature*@(3935), 437–438.
- Milanovic, P. (1981). *Karst Hydrogeology*. USA: Water Resorces Publications.
- Ministerio del Medio Ambiente (2002). *Guía metodológica para formular proyectos de protección integrada de aguas subterráneas*. Ministerio del Medio Ambiente, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Mineroambiental y Nuclear Ingeominas, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina Coralina, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC.
- Molerio, L. *RECUPERACIÓN DE UN CAMPO DE POZOS PARA SUMINISTRO DE AGUA SALADA EN UN ACUÍFERO CÁRSICO LITORAL*.
- Mulligan, A., R. Evans, y D. Lizarralde (2007). The role of palochannels in groundwater/seawater exchange. *Journal of Hydrology*@(3-4), 313–329.
- Nanni, M., S. Foster, C. Dumars, H. Garduño, K. Kemper, y A. Tuinhof (2002-2006). Legislación y disposiciones reglamentarias sobre agua subterránea: Desde reglas consuetudinarias hasta la planificación integrada en cuencas. *Gestion sustentable del agua subterránea. Conceptos y herramientas*. (Serie de nota informativa 4.), 6p.
- Parra, E. (2009, Febrero). Ordenamiento territorial costero en el caribe colombiano. las directrices del estado en los casos de estudio de coveñas y san andrés (en revisión). Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

- Perez, C., G. Poveda, O. Mesa, L. Carvajal, y A. Ochoa (1998). Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. *Bull. Inst. fr. études andines* (3), 537-546.
- Pethick, J. (1984). *An introduction to Coastal Geomorphology* (Butler and Tanner ed.). Lecturer in Physical Geography. Edward Arnold.
- Post, V. E. A. (2005). Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead? *Hydrogeol J* 13, 120-123.
- Ranjan, P., S. Kazamaa, y M. Sawamoto (2006). Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources. *Global Environmental Change* 16, 388-399.
- Ranjan, S., K. Priyantha, y S. So (2006). Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental Management* (80), 25-35.
- Reilly, T. E. y A. Harbaugh (2004). Guidelines for evaluating ground-water flow models. Technical Report Scientific Investigations Report 2004-5038, U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey.
- Robinson, C., L. Li, y D. Barry (2007). Effect of tidal forcing on a subterranean estuary. *Advances in Water Resources* (30), 851-865.
- Rozell, D. J. (2007). Quantifying the impact of global warming on saltwater intrusion at Shelter Island, New York using a groundwater flow model. Master's thesis, Stony Brook University.
- Segol, G. (1994). *Classic groundwater simulations: proving and improving numerical models*. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Stieglitz, T., M. Taniguchi, y S. Neylon (2008). Spatial variability of submarine groundwater discharge Ubatuba-Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76, 493-500.
- Thoma, M. y G. Nelson (2008, Mayo). Manual for development of a transient modflow/mt3dms/seawat simulation for the 2001 tracer test at the Boise hydrogeophysical research site. Technical Report BSU CGISS 08-02, Center for Geophysical Investigation of the Shallow Subsurface and Department of Geosciences, Boise State University.
- Tiruneh, N. y L. Motz (2003). Three dimensional modeling of saltwater intrusion coupled with the impact of climate change and pumping. In *World Water Environ., Philadelphia, USA, pp. 1079-1087. ASCE.*

- Tulipano, L. (2006). *Overexploitation consequences and management criteria in coastal karstic aquifers*. Cagliari, pp. 113–126. *Salt Water Intrusion Conference (SWICA 19)*.
- USGS (2003). *Ground water in fresh water-salt water environments of the atlantic (circular 1262)*. Technical report, United States Geological Survey.
- Van Meir, N. y L. Lebbe (2002, Mayo). *3d density-depend modelling of sea level rise scenarios around de haan (belgium)*. In 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, Holanda, pp. 9.
- Vélez, M. (2004). *Hidráulica de aguas subterráneas (3 ed.)*. Serie de Publicaciones del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Villholth, K. (2006). *Groundwater assessment and management: implications and opportunities of globalization*. Hydrogeology Journal 14, 330–339.
- Voss, C. I. y A. Provost (2002). Sutra, a model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport. *Water-Resources Investigations* (02-4231).
- Werner, A. D. y M. R. Gallagher (2006). Characterisation of sea-water intrusion in the pioneer valley, australia using hydrochemistry and three-dimensional numerical modelling. *Hydrogeology Journal* (14), 1452–1469.
- WMO (2005). *Saving paradise, ensuring sustainable development, small island developing states*. Technical Report 973, World Meteorological Organization.
- Zheng, P., C. Chunmiao, y P. Wang (1999). Mt3dms a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground-water systems; documentation and user's guide:. Technical Report Contract Report SERDP-99-1., U.S. Army Corps of Engineers, Jacksonville, Fla.