

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**MODELO NUMERICO DEL ACUIFERO DE LA ISLA DE SAN ANDRÉS,
COLOMBIA**

*Mauricio Bedoya, Jaime Ignacio Vélez, María Victoria Vélez, Germán Poveda, Jaime Carmona,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia
jmbedoya@unal.edu.co, jacarmo2@unal.edu.co, gpoveda@unal.edu.co, mvvelez@unal.edu.co*

RESUMEN:

La isla de San Andrés, ubicada en el Caribe Colombiano, depende en la actualidad en más de un 80% del agua subterránea para su abastecimiento, sin embargo, se presentan problemas de gestión del recurso y se tiene poco conocimiento del sistema acuífero de características cársticas. Se utilizó el modulo SEAWAT 4.0 (Langevin et al., 2003) para construir un modelo numérico del acuífero de la Isla que involucrara la interfase agua dulce agua salada. Para la calibración en estado transitorio del modelo numérico se utilizó la información de niveles en los pozos de la cuenca del Cove, la zona más productiva ubicada en el centro de la Isla, en el período 2007-2008, y se determinaron 2 periodos de estrés por año: uno correspondiente al modo frío y otro al modo cálido. Con el modelo se busca proyectar diferentes escenarios de recarga, aumento del nivel del mar y extracción, que permita simular el flujo de aguas subterráneas y estimar la respuesta total del acuífero en cada caso, buscando garantizar una sostenibilidad a largo plazo del recurso hídrico. Las estimaciones de valores en la recarga debido a un efecto de Cambio Climático se evaluaron con la variación de los parámetros precipitación (porcentajes entre -35% y +35% respecto al promedio) y temperatura (con aumentos entre 1 y 5° C respecto a la situación promedio actual), dentro de un modelo previamente verificado. Con este análisis se determinaron que los escenarios de recarga mas acertados son de -2% y +2%, -5% y +5%, y -10% y +10% respecto al valor normal estimado (498 mm/año).

ABSTRACT:

The island of San Andrés, located in the Colombian Caribbean, now depends on more than 80% of groundwater for its supply, however, there are resource management problems and there few knowledge about aquifer dynamic. We used SEAWAT 4.0 module (Langevin et al., 2008) to build a numerical model of the aquifer of the island, involving the saltwater freshwater interface. For numerical model calibration in transient state, we used information from levels in wells in the basin of Cove in 2007-2008 and identified two stress periods per year: one for the cool mode and another for the warm mode. The model was used to project different scenarios of recharge, rising sea levels and extraction, to simulate groundwater flow and estimate the total response of the aquifer in each case, seeking to ensure a long-term sustainability of water resources. Estimates of future values in the recharge due to an effect of climate change were evaluated with the variation of precipitation parameters (with rates between -35% and +35% over the current average) and temperature (increasing from 1 to 5 ° C regard to the situation current average), within a model previously tested. This analysis determined that the most successful recharge scenarios are -2% and +2%, -5% and +5% and -10% and +10% compared to the estimated normal value (498 mm / year).

PALABRAS CLAVES:

Acuífero Isla San Andrés, Modelo Numérico, Intrusión salina

INTRODUCCIÓN

Se espera que el crecimiento económico y poblacional en zonas costeras y el cambio global, aumenten la presión sobre el recurso hídrico principalmente por el tipo de actividades confrontadas en estas zonas (Cheng y Ouazar 2004; Holman 2006). 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 está siendo severamente contaminada y disminuida, las comunidades costeras proyectan y ejecutan la explotación del agua subterránea. Los manejos inapropiados de los Acuíferos Costeros pueden tener efectos irreversibles, a tal punto de causar el deterioro total del recurso. Por ello, surge la necesidad de los diferentes actores involucrados (Usuarios, Autoridades, Gremios Económicos y Técnicos) de metodologías y estrategias para el manejo del agua subterránea de una manera coherente con el ambiente físico y socioeconómico particular. Las herramientas de modelación para abordar cuantitativamente las cantidades de agua disponibles facilitarán a los grupos interesados proyectar los planes de ordenamiento y manejo correctos que permitan equilibrar desarrollos económicos y poblacionales a la par con la sostenibilidad y disponibilidad del recurso.

El manejo óptimo de este recurso requerirá, 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 Hiscock y Tanaka (2006)). Las investigaciones que han sido reportadas alrededor del mundo relacionadas con el 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).

UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA

La isla está situada en el Mar Caribe entre latitud $81^{\circ}43'$ y longitud $12^{\circ}32'$ (Figura 1).

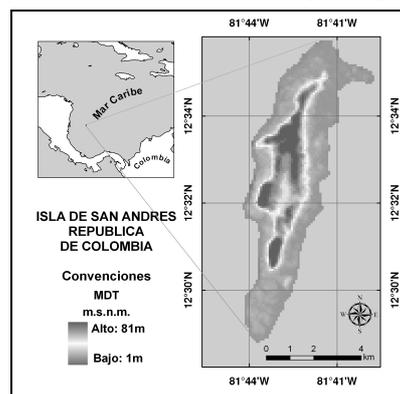


Figura 1 Localización de la zona de estudio, punto de lanzamiento de radiosonda y estaciones de medición

San Andrés es una isla formada por el crecimiento de los corales alrededor de un cono volcánico que posteriormente se hundió, dejando un anillo coralino, que creció verticalmente. Geológicamente, esta compuesta en su mayoría por formaciones coralinas de edad terciaria y otras menos representativas del cuaternario. La isla tiene una extensión de aproximadamente 26 Km^2 y una población actual de 65.000 habitantes. Sus principales actividades económicas son el turismo, el comercio y los servicios derivados de éstos. Su temperatura promedio es 26°C y su precipitación promedio anual es 1900 mm. Presenta una zona orográfica importante sobre el centro con alturas hasta de 85 m SNM (Figura 2) lo que favorece el almacenamiento de aguas subterráneas en el sistema cárstico.

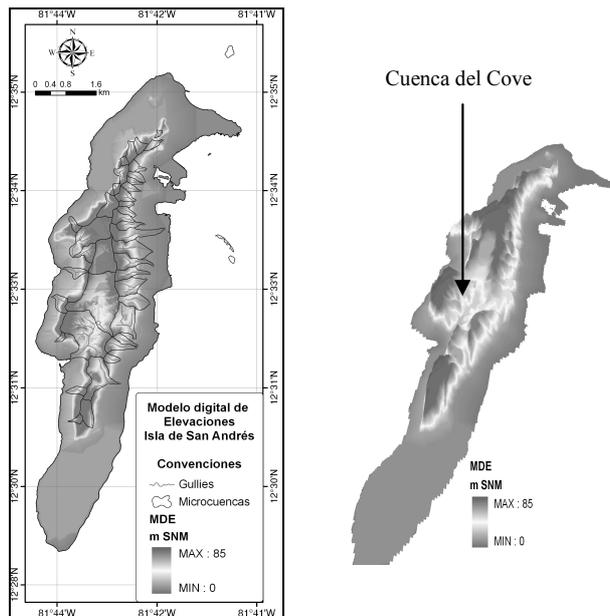


Figura 2.- Modelo de elevaciones de la isla de San Andres

MODELO CONCEPTUAL DEL ACUIFERO DE LA ISLA DE SAN ANDRES

GEOMETRIA Y TIPO DE ACUIFERO

El acuífero de la isla consiste en dos unidades hidroestratigráficas con características geológicas cársticas (Figura 3) ambas clasificadas como acuíferos libres, denominadas Acuífero San Andrés (Tsa) y Acuífero San Luis (Tsl).

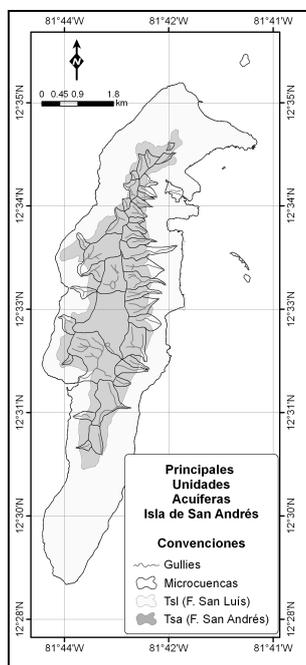


Figura 3.- Principales unidades acuíferas de la Isla

El acuífero San Andrés comprende un área superficial de 17.13km² del territorio Insular, con alturas entre los 4 y 85 msnm y el San Luis presenta un área superficial 9.89km², con alturas entre los 0 y 44 msnm, presentándose las máximas en el Nororiente y Occidente de la isla (0).

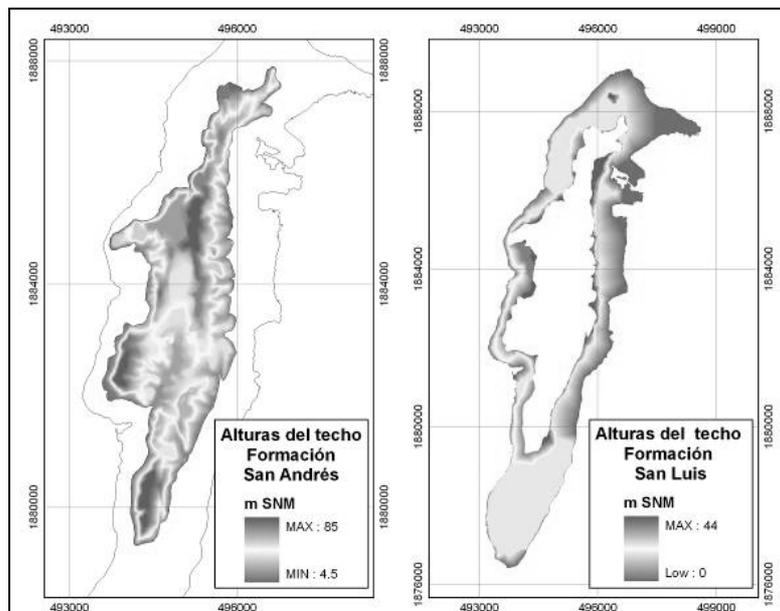


Figura 4. Alturas de los techos de las formaciones acuíferas en la isla de San Andrés, Colombia

Se infirió el tope del basamento ígneo a 200 m bajo el nivel del mar, con base a los rangos que se han estimado en los diferentes estudios sobre el tema, primordialmente el trabajo de INGEOMINAS (1997). Dado que el basamento se encuentra a esta profundidad los espesores del acuífero San Andrés alcanzan valores considerables, respecto a los de la formación San Luis que presenta espesores hasta de 20 m. Por ello, se plantea que el modelo conceptual de la Isla podría consistir en una sola capa, pero la separación se hace debido a las características en aspectos de recarga y calidad del agua en ambas formaciones (**Error! Reference source not found.**).

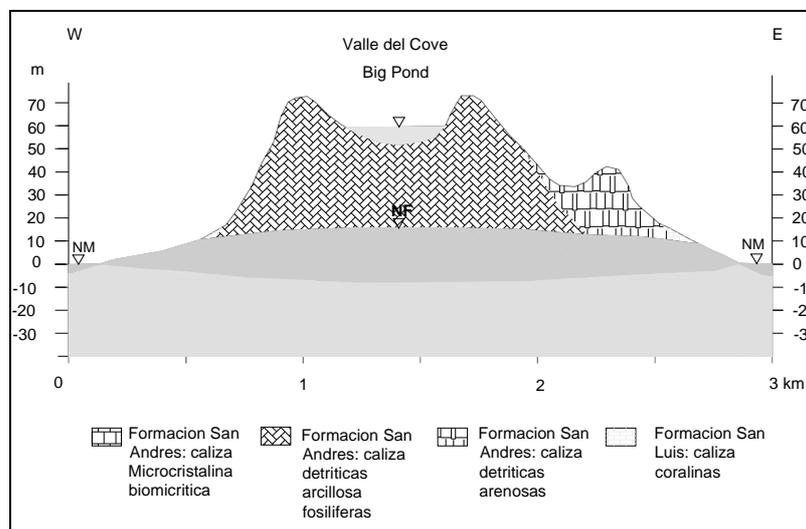


Figura 5. Alturas de los techos de las formaciones acuíferas en la isla de San Andrés, Colombia

PIEZOMETRIA

En la Figura 6A se presentan los principales pozos de explotación en la cuenca del Cove donde los niveles estáticos pueden alcanzar valores hasta de 10 msnm en las zonas altas, y donde se presenta una fuerte correspondencia entre el ciclo anual de la precipitación y los niveles piezométricos (Figura 7). Se han registrado valores por debajo del nivel del mar cuando coinciden la explotación y las épocas de verano, principalmente, en la zona de fallas de la cuenca del Cove donde se encuentran la mayoría de los pozos profundos.

En la formación San Luís, los niveles oscilan entre pocos cm hasta 4m de profundidad y se ha reportado con el análisis de las diferentes pruebas de bombeo y variación de los niveles piezométricos que estos responden con la marea dada la cercanía del mar.

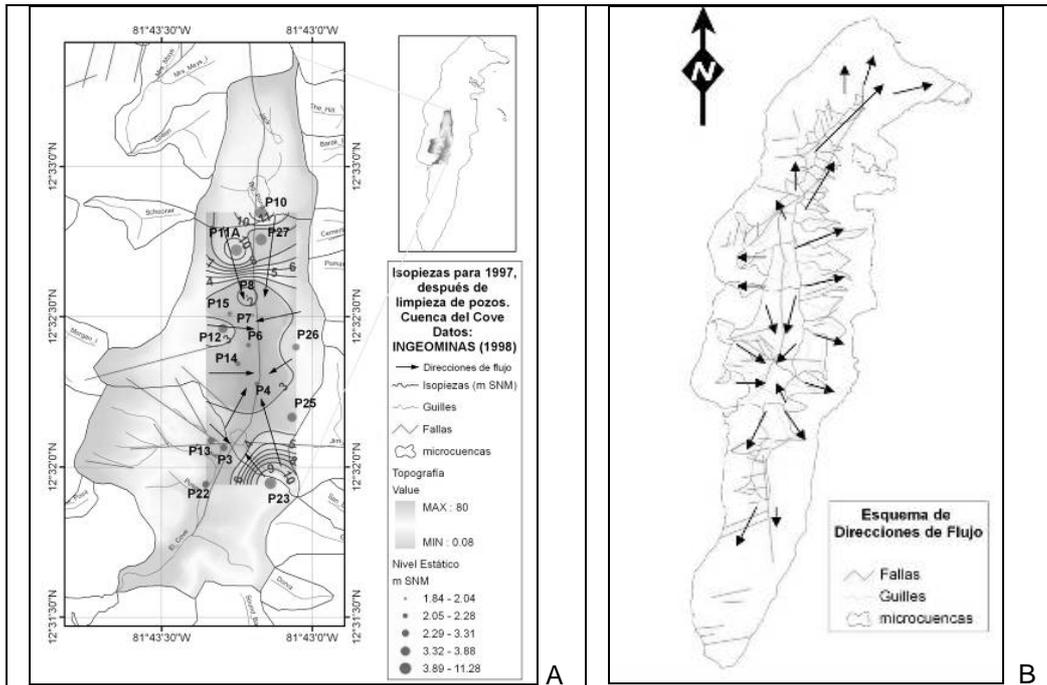


Figura 6. Esquema de direcciones de flujo del agua subterránea en la isla (izq), isopiezías, líneas de flujo en la Cuenca del Cove y principales pozos de explotación (der).

PERMEABILIDADES

La zona de mayor interés en el presente estudio es la Cuenca del Cove, ubicada en el centro de la formación San Andrés cuya área es de 3 km². Allí, se presenta la disolución cárstica más intensa debido a la densidad del diaclasamiento (entre 15 y 70%) que influye fuertemente en el parámetro de permeabilidad del acuífero. De acuerdo al análisis de las pruebas de bombeo se presentan zonas de mayores permeabilidades asociadas a la zonas aledañas a la Falla del Cove con valores de 30 m/d, mientras en zonas más alejadas, se presentan valores con un orden de magnitud menor. Además, se presentan mayores transmisividades al Suroeste de esta falla respecto a los valores encontrados en el Nororiente

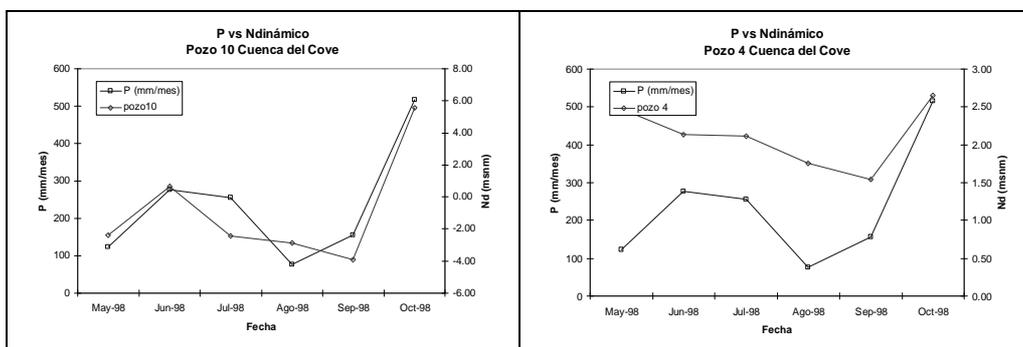


Figura 7. Niveles dinámicos (cuadros) y precipitación (líneas) para los meses Mayo a Octubre de 1998, en los pozos del campo del Cove

DIRECCIONES DE FLUJO

Las direcciones de flujo en la isla presentan dos líneas predominantes: Un flujo radial divergente desde la divisoria de la cuenca del Cove hacia el resto de la isla evidenciándose zonas de descarga en la línea de costa, y una zona convergente desde los límites de la cuenca del Cove hacia la zona de

de la Falla del Cove (longitud de aproximada de 4 km e incidencia de fracturamiento de 40%), que funciona como zona de receptora del flujo (Figura 6B).

RECARGA

Los procesos más importantes de recarga se presentan sobre la formación San Andrés especialmente en la Cuenca del Cove donde la rápida respuesta de los niveles a las intensidades de la lluvia (Figura 7), muestran el alto dinamismo del acuífero (confirmado en estudios como el CORALINA (1999)), este tipo de coherencia entre lluvias y niveles no se verificó en otras zonas de la isla (Redes de monitoreo en otras zonas de la isla), por lo que se infiere que sobre la zona del Cove se presentan las calizas mas intensamente fracturadas y diaclasadas que favorecen considerablemente los procesos de infiltración. Se ha comprobado la influencia de eventos macroclimáticos como el ENSO sobre la hidrología de la Isla, que en sus diferentes fases puede alterar las tasas de recarga considerablemente debido a la disminución o aumento de la precipitación observándose diferencias hasta de 60mm a escala mensual entre años La Niña y años Promedio (Figura 8).

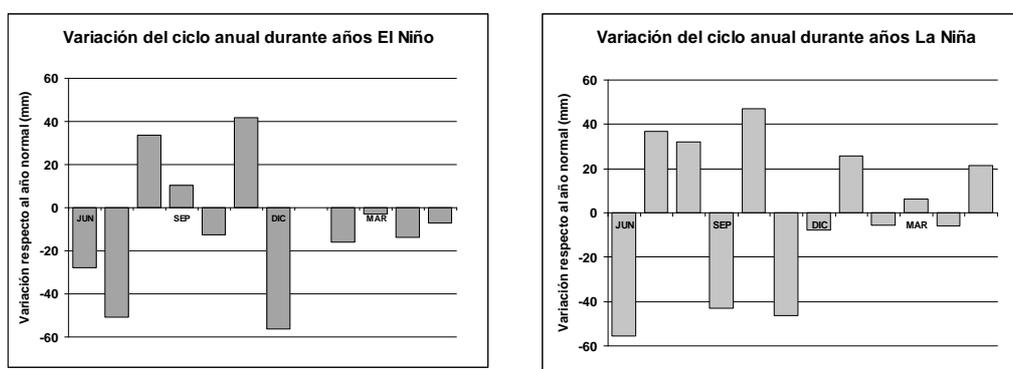


Figura 8. Variación del ciclo anual de precipitación con la ocurrencia del fenómeno ENSO

Se debe estimar la recarga en concordancia con estas fases para generar esquemas de operación del campo de pozos coherentes con esta dinámica. En el presente estudio se han estimado valores de 810 mm/año para fase fría, 480 mm/año para un año Normal y para una fase cálida de 255 mm/año bajo la metodología de Bradbury (2000) modificada por la Universidad Nacional, utilizando como datos de entrada los tipos, características y usos del suelo en la isla. Estos valores están acorde al rango de los estimados anteriormente por INGEOMINAS (1997) y CORALINA (1999).

CALIDAD DEL AGUA

Dado que sobre la formación San Andrés se encuentra la principal zona de recarga en la isla (Huggeth (1989), INGEOMINAS (1997), CORALINA (1999)) los procesos de lixiviación de sales han sido favorecidos, por lo que el agua presenta conductividades menores a 1250 mS/cm y en general se clasifica en su mayoría como bicarbonatada cálcica. En la formación San Luís, las conductividades eléctricas alcanzan los 55000 mS/cm en algunos sectores y generalmente el agua se clasifica como Clorurada-Sulfatada, excepto en la zona nororiental y parte de la oriental, donde se infiere que existe un lente de agua con menor salobridad (de acuerdo a las características geoquímicas del agua en esta parte de la isla), esto se atribuye a la existencia de una zona de descarga preferencial desde el acuífero San Andrés.

CAUDALES Y TIPOS DE EXPLOTACION

La cuenca del Cove es la zona de mayor importancia dadas las características anteriormente mencionadas y es la fuente hídrica para surtir parte importante de la demanda hídrica en la isla. La explotación se lleva a cabo principalmente a partir de pozos profundos perforados en la zona de la falla del Cove (Figura 6A). El campo de pozos se empezó a explotar desde 1966 con caudales iniciales de 25 l/s, alcanzando valores de 50 l/s para el año 1985 en donde se presentaron síntomas

de sobreexplotación en el acuífero y se tomaron medidas de gestión para lograr un caudal concesionado actual de 30 l/s.

En la formación San Luís la explotación consiste principalmente en extracción del agua subterránea por medio de aljibes y barrenos, con caudales bajos de explotación y en muchos casos extrayendo agua salada para procesos de desalinización.

INTRUSION SALINA

La interfaz agua dulce agua salada se profundiza de los bordes costeros hacia el centro de la isla con valores típicos de 5 m de profundidad en las áreas de playa y encontrándose el lente de agua dulce que flota sobre el agua salada bajo la formación San Andrés, a profundidades promedio de 150 m bajo el nivel del mar, calculados con la relación de Ghyben Herzberg y confirmados por los estudios geoelectricos realizados en la isla. El lente es más espeso bajo las zonas de mayores alturas, un poco menos en la zona del Valle del Cove influenciado tanto por las menores cotas del terreno y del nivel freático, así como por la operación del campo de pozos que favorece la formación de conos ascendentes salobres. El problema de salinización está fuertemente relacionado con la profundidad de perforación de los pozos cuando se sobrepasa la zona de mezcla, como en el caso de los pozos al oriente del campo de pozos del Cove.

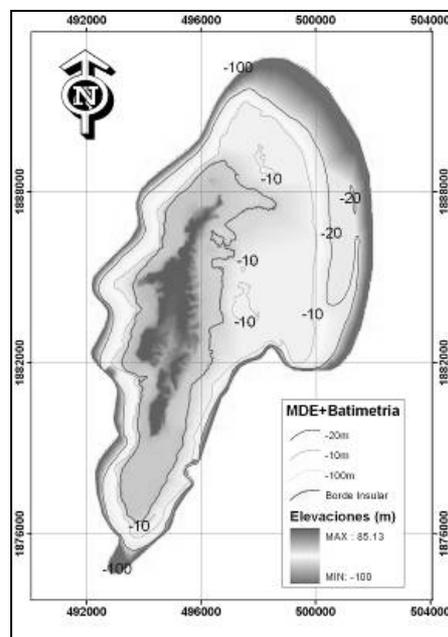


Figura 9. Batimetría de la Isla hasta los -100m bajo el nivel del mar.

La batimetría costa afuera ha influido en los procesos de carstificación y formación de cavernas y por lo tanto en la salinidad y dinámica de las aguas subterráneas en los acuíferos de la Isla. En la parte Oriental y Nororiental, se presentan pendientes suaves (0), el mar es poco profundo, se favorecen los procesos de sedimentación, y, por ello, la formación de cuerpos lénticos (manglares). El arrecife ofrece protección contra la fuerza de impulsión de las olas en esta parte de la Isla (que corresponde a la formación San Luis) restringiendo la abrasión y penetración del mar en el acuífero, este es el motivo por el cual se presentan aguas mas dulces respecto a la parte occidental de la Isla donde la batimetría presenta pendientes fuertes (mar abierto y profundo) y no existe amortiguamiento al efecto de las olas, por ello los sistemas de karst generados por el agua dulce se unen con los producidos por el agua de mar aumentando la salinidad considerablemente a nivel superficial (Diezzman, 1957). Esto se verifica contrastando las conductividades en ambas zonas de la Isla.

MODELO NUMERICO DE LA ISLA DE SAN ANDRES

En el presente estudio se implementó la interfaz brindada por el Programa VISUAL MODFLOW 2009.1 PREMIUM, el cual trae incorporado el modulo SEAWAT 4.0 y permite el pre-procesamiento de datos y post-procesamiento de los resultados. El módulo 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).

GEOMETRÍA

Se utilizó el modelo digital de elevaciones de la isla obtenida a partir de las curvas de nivel cada 5m para la definición de la superficie topográfica y la batimetría hasta la cota -100mbnm para definir la superficie por debajo del nivel del mar en la zona no emergida. Para el montaje del modelo fueron consideradas dos unidades hidroestratigraficas:

Capa 1: Formación San Luis (acuífero terciario) localizado encima de la formación San Andrés de acuerdo al límite establecido por el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas 1999-2009 con un espesor máximo de 20m sobre la línea de costa y manteniendo este espesor costa afuera.

Capa 2: Formación San Andrés (acuífero terciario) que alcanza profundidades hasta de 200m bajo el nivel del mar, el límite es el basamento ubicado a 200m bnm.

En la Figura 10 se muestra una vista tridimensional del modelo, se diferencian las formaciones a nivel superficial, la línea de costa esta representada por la línea en color blanco. Se puede observar que la batimetría presenta mayores pendientes en la zona occidental y suroriental respecto a las zonas Norte y Nororiental. En la Figura 11 se presentan cortes transversales para detallar la geometría empleada.

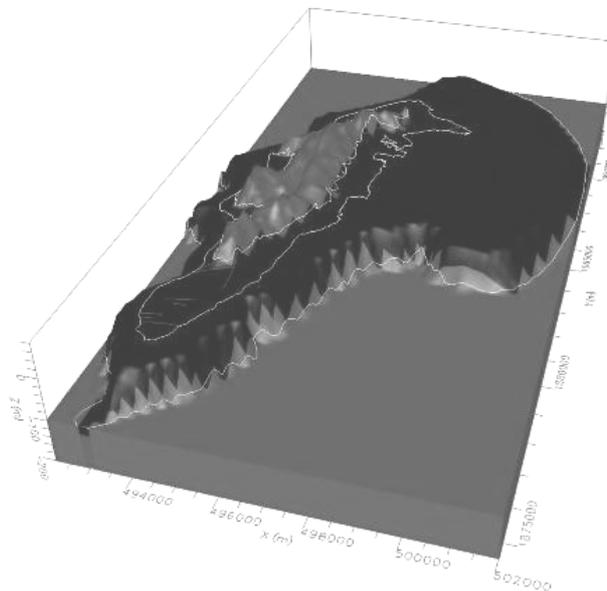


Figura 10. Vista tridimensional del Modelo. incluyendo profundidades batimétricas en verde la zonas correspondientes a la formación San Andrés de mayor elevación en la isla

CONDUCTIVIDAD

Los resultados del modelo numérico son muy sensibles a los valores de este parámetro. Con base en las pruebas de bombeo realizadas en el acuífero y a datos sobre grados de disolución y fracturamiento de la roca se diseñaron varios zonificaciones para esta variable, llegando a la conclusión de usar las zonas presentadas en la Figura 12.

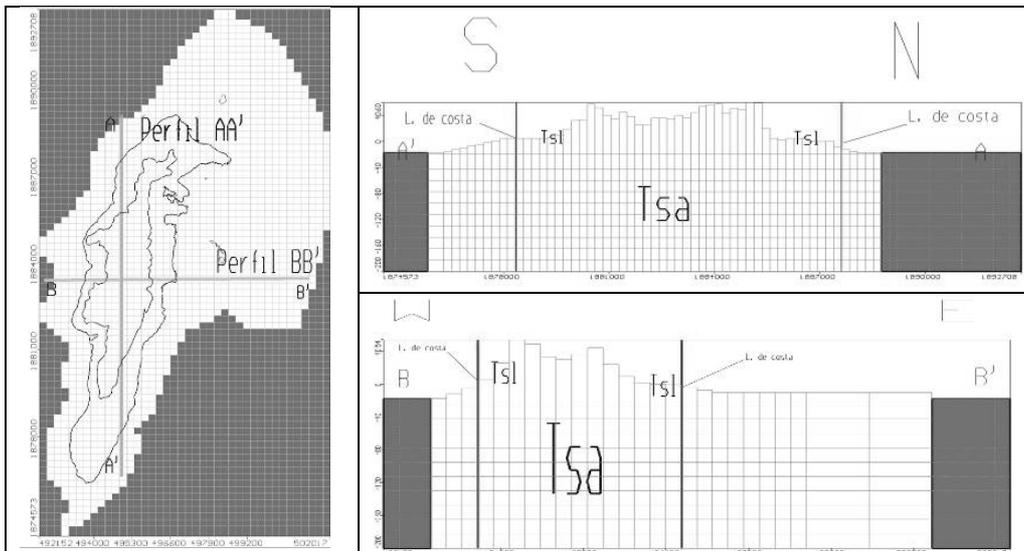


Figura 11.- Cortes en sentido Norte-Sur y Occidente-Oriente dentro del modelo numérico planteado (Sin variación vertical de la formación san luis), se muestran las formaciones San Luís (Tsl) y formación San Andrés (Tsa). Escala vertical exagerada 1:15 veces

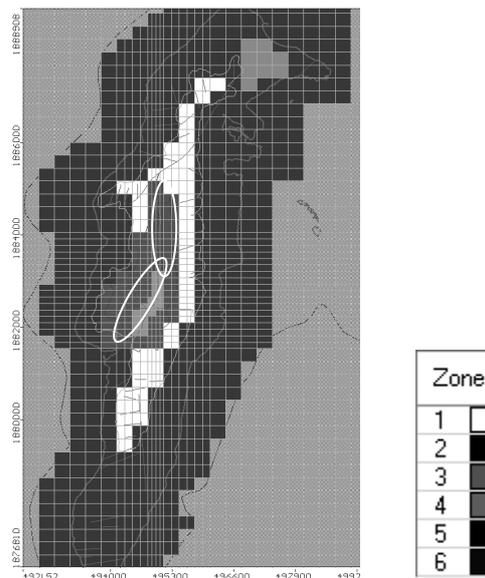


Figura 12.- Zonas de conductividad. La zona de influencia de la falla son la 4 y la 5 (señaladas en blanco)

CONDICIONES DE FRONTERA

Se asignó una condición de frontera de cabeza constante perimetralmente a la isla. Esta es la condición hidráulica de frontera más importante en cualquier modelo de acuífero costero o insular, ya que controla el nivel base del acuífero y el equilibrio que deben darse entre los flujos de agua dulce y agua marina. Se dio un atributo de cabeza igual a 0 (nivel del mar a nivel local), a las celdas comprendidas entre la línea de costa y el límite batimétrico de -100m bajo el nivel del mar. Igualmente, se asignó la condición de flujo másico para simular la salinidad del mar con un valor de 35000mg/l.

La **Error! Reference source not found.** presenta un resumen de los parámetros iniciales implementados en el modelo.

Tabla 1.- Parámetros del modelo numérico implementado en la isla de san Andrés

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Geometría			
Largo Máximo	L	12000	m
Ancho Máximo	B	3000	m
Elevación del Basamento	d	-200	msnm
Propiedades de la malla			
Tamaño Fila	Δx	100	
Tamaño Columnas	Δy	100	
Espesor Capas	Δz	20	m
Características del acuífero			
Tipo capa (Libre-confinada)		Libre	
Unidad de Tiempo	t	Día	d
Conductividad Horizontal	Kx	zonificada	m/d
Conductividad Transversal	Ky	zonificada	m/d
Conductividad Vertical	Kz	zonificada	m/d
Densidad agua dulce	ρ_d	1000	kg/m ³
Densidad agua salada	ρ_s	1025	kg/m ³
Almacenamiento específico	Ss	1.00E-05	1/m
Rendimiento específico	Sy	0.05	
Porosidad Específica	ne	0.3	
Porosidad Total	nt	0.4	
Dispersión longitudinal	D	20	
Relación Dispersión. Long./ Disp. Transv.	α_v	0.1	
Relación Dispersión. Long./ Disp. Vert.	α_t	0.001	
Coeficiente de difusión	Dm	0	m ² /d
Condiciones de frontera			
Cabezas Iniciales	h0	10% de la cota	
Recarga	R	zonificada	m/d
Cabeza del Mar	Hmar	0	m
Flujo másico de sal	Cmar	35000	mg/l
Concentraciones iniciales		zonificada	mg/l

CALIBRACION EN ESTADO TRANSITORIO

Se utilizaron las cabezas y concentraciones de salinidad obtenidas de la calibración en estado permanente, como las condiciones iniciales de la corrida en estado transitorio (Figura 13).

Con la información hidrometeorológica disponible se identificaron cuatro períodos de estrés, relacionados con periodos secos y húmedos que definen las épocas de recarga (0). Para el año 2007, catalogado como normal, con una precipitación promedio de 1842mm/año, se determinó que la recarga representaba un 26% de este valor, distribuida en los dos periodos de estrés establecidos, y para el año 2008 catalogado como Húmedo, con una precipitación promedio de 2755.8mm/año, se asignó un 33% de este valor, distribuidos también en los periodos de estrés. Igualmente, la recarga se distribuyó espacialmente asignando un porcentaje del 70 % del total para el periodo, en la zona de la Cuenca del Cove, un 30% para la zona restante de la Formación San Andrés (Zona Tsa), y una recarga mínima en la formación San Luís (Zona Tsl).

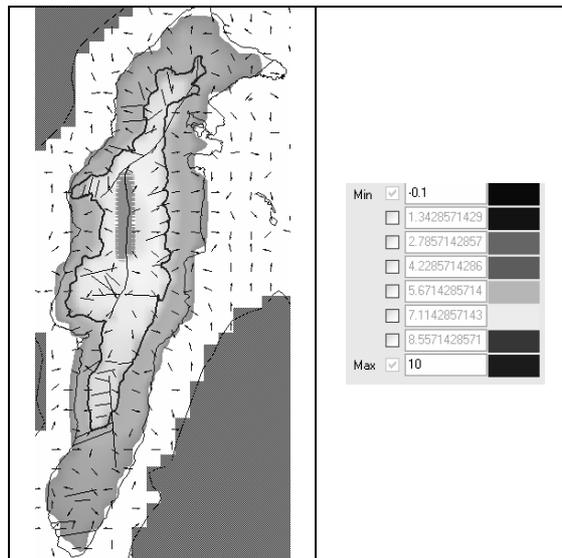


Figura 13. Cabezas iniciales para el modelo transitorio

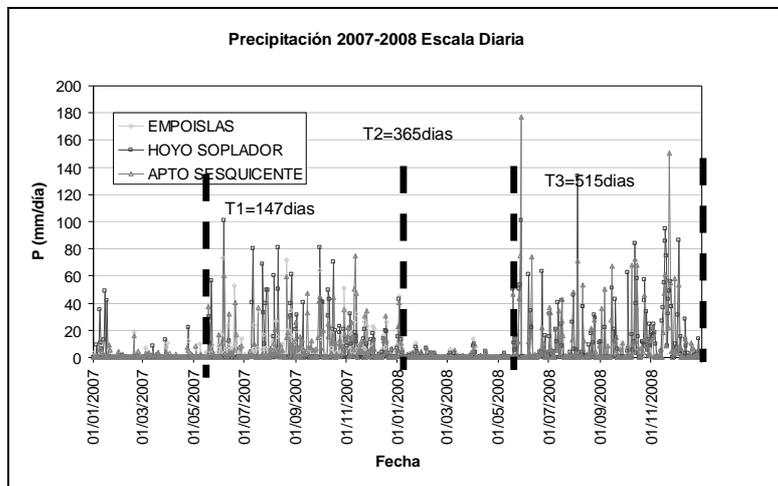


Figura 14. Análisis de series diaria de precipitación para el período 2007-2008 en las estaciones pluviométricas en la isla de san Andrés

Los niveles observados versus los calculados se muestran en la 0. Se encuentra un coeficiente de correlación de 0.921 y un residual máximo de -4.17m en el pozo 27 para el segundo periodo de estrés. En general, el modelo sobreestima los niveles en la zona del norte (puntos en parte inferior de la línea), y subestima en algunos pozos en la cuenca del Cove.

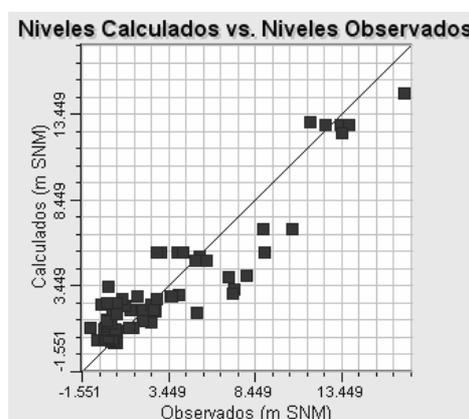


Figura 15. Niveles Observados vs. Calculados para los diferentes periodos de estrés

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL MODELO NUMÉRICO

Una vez calibrado el modelo en estado transitorio se establecen escenarios de explotación y variación de condiciones de frontera de acuerdo a planteamientos de las posibles consecuencias del Cambio Climático. Para ello, se partió de una evaluación de la información de los modelos a escala global sobre variables como precipitación y temperatura: Con estos modelos se tienen resultados muy aproximados para la Isla, ya que el tamaño del píxel empleado es de 278km x 278km, y San Andrés tiene un área aproximada de solo 26Km². Por lo anterior fenómenos a escala local, no pueden ser reflejados a la escala de los modelos de Circulación Global.

Para la definición de los escenarios de cambio climático se utilizó la información local de datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura). Se analizó la sensibilidad a las condiciones de frontera, explotación y recarga (el nivel del mar, los pozos de bombeo): se utilizó un tiempo de simulación de 12 años partiendo de una condición promedio de recarga de 498mm/año y con los caudales actuales de la Cuenca del Cove. La elección del umbral de simulación de 12 años corresponde principalmente a la longitud de los datos para realizar la calibración (2 años) y al tiempo de planificación del próximo plan de manejo de aguas (PMAS) que es de 10 años (2010-2020).

Para analizar los posibles impactos sobre la recarga en la Isla de San Andrés, se corrió el modelo implementado, variando la precipitación entre -35% y +35% respecto a un año normal (se evalúa en ambos extremos pues se debe ofrecer un abanico de posibles escenarios a pesar de que el más probable sea el de aumento de la recarga), y la temperatura entre 0 °C y 5 °C con respecto a para la condición normal, esta última variable influye en el cálculo de la Evapotranspiración Potencial.

La 02 muestra los resultados para un lapso de 12 años (La recarga para un año normal es R=498 mm/año):

Tabla 2. Análisis de escenarios de recarga

Tasas de precipitación (% respecto a condición normal)	Aumento de temperatura (°C)	Recarga estimada (mm/año)	Tasa de cambio respecto a recarga normal a 12 años (%)
-35	1	147	-2
-35	5	130	-2
-25	1	245	-4
-25	5	186	-3
-15	1	320	-6
-15	5	312	-6
+35	1	821	+14
+35	5	750	+13
+25	1	650	+11
+25	5	420	-7
+15	1	560	+10
+15	5	540	+8

En el modelo calibrado se simuló el efecto de variación de la recarga en el acuífero de San Andrés manteniendo la longitud de los periodos de estrés definidos (dos por año: modo cálido y modo frío). Asimismo, se utilizó un periodo de simulación de 12 años (5000 días aproximadamente), partiendo de una condición de un año promedio para las diferentes simulaciones realizadas.

La Figura 15^a muestra la configuración de la superficie piezométrica obtenida al final de los 12 años para un aumento de la recarga del 2%, respecto a una condición promedio. Bajo este escenario, los niveles mantienen una distribución semejante a la actual, es decir mayores alturas piezométricas al norte de la falla del Cove y menores al sur de la misma presentando un gradiente considerable. Este es un escenario favorable (y probable según datos históricos), dado que se presenta un equilibrio estable entre el bombeo actual y la recarga, con posibilidades de mayor explotación. En la Figura 15B, se presenta un perfil representativo de salinidad para este escenario (en el pozo 10 de la zona del Cove), la zona en color representa la salinidad menor a 500mg/l mientras el color blanco implica concentraciones mayores a este valor, en este se observa que el efecto de aumento de la recarga contiene el ascenso cónico de sal en este pozo hasta una profundidad de 100 m bajo el nivel del mar. Un comportamiento similar se presenta en los demás pozos del campo de explotación para este escenario.

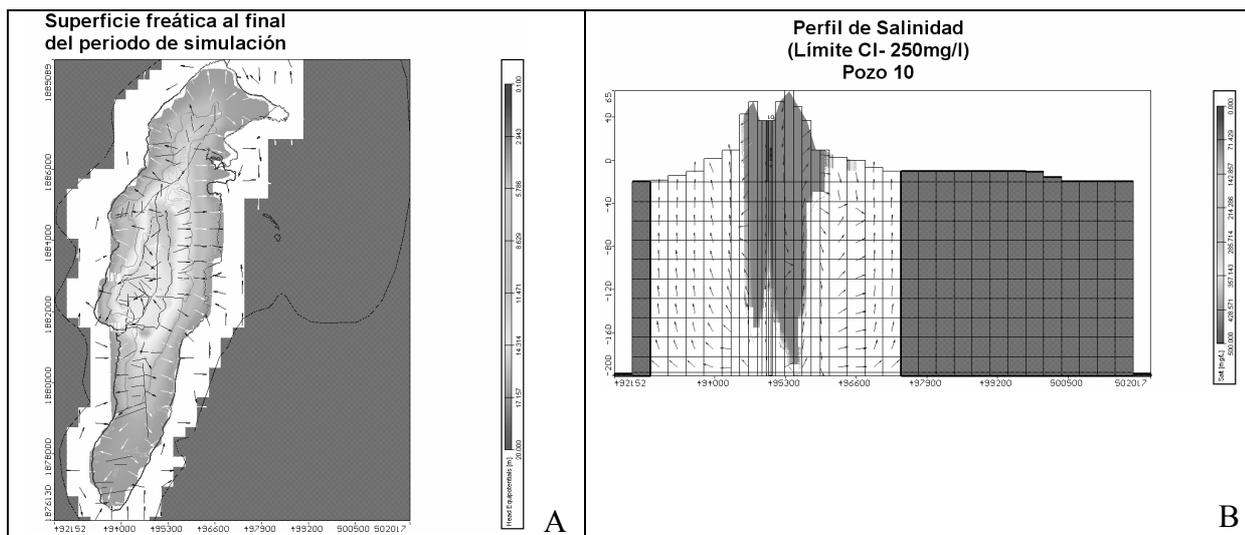


Figura 16. Niveles Observados vs. Calculados para los diferentes periodos de estrés (Izquierda) y perfil de salinidad en el pozo 10 del campo de operaciones de la Cuenca del Cove para escenario de aumento al +2% de la recarga anual respecto al promedio (límite de Cl- 250 mg/l) (Derecha).

Se simuló también, lo que sucedería en el acuífero bajo un escenario de aumento de las tasas de bombeo en el campo de pozos de explotación de la Cuenca del Cove. Se utilizó como criterio el obtener el caudal necesario para cumplir la demanda residencial esperada a 10 años, la cual se estima en 80 l/s, sin tener en cuenta las pérdidas y asumiendo una dotación de 100l/hab*día (solo demanda residencial), este caudal se alcanzaría aumentando linealmente 2% la tasa de bombeo anual respecto a las actualmente concesionadas, asumiendo que todos los pozos en concesión se encontraran en operación. Los escenarios simulados se muestran en la 0.

Tabla 3. Escenarios propuestos con tasas de bombeo variables

Escenario	Tasa de aumento Bombeo anual (respecto a concesionado)	Recarga
1	+2%	Manteniendo Recarga Promedio
2	+2%	Aumentos anuales del +2%
3	+2%	Aumentos anuales del -2%

Un resumen de los resultados obtenidos se presenta al observar el comportamiento en el pozo 10 (representativo de la zona del Cove) en la 0. Si la recarga aumentará en un 2% anual y al mismo tiempo aumentarían las tasas de bombeo en un 2%, se establecería un equilibrio en los abatimientos

y niveles del acuífero. El escenario más catastrófico se presentaría al aumentar estas tasas de bombeo simultáneamente con una disminución en la recarga del 2% anual.

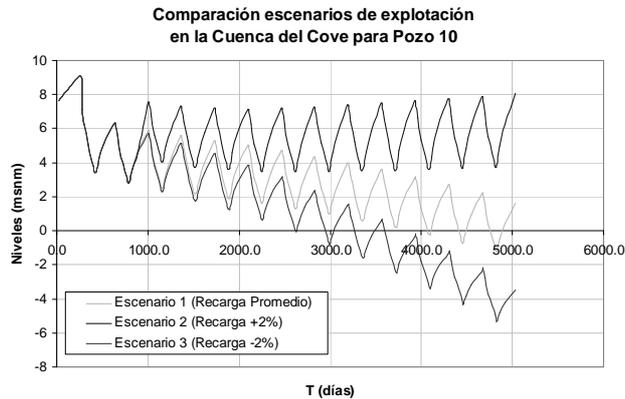


Figura 17. Comparación de escenarios planteados (niveles piezométricos) para el análisis de aumento de tasas de bombeo y variación tasas de recarga en el acuífero de San Andrés en pozo 10 de la cuenca del Cove.

CONCLUSIONES

Se ha realizado la construcción y corrida del modelo numérico de la Isla de San Andrés para la simulación de posibles escenarios futuros en los que se evalúa la afectación del recurso tanto en calidad como en cantidad por fenómenos como el cambio climático.

Se encontró que los parámetros de mayor sensibilidad dentro del modelo numérico son las conductividades hidráulicas y la recarga, especialmente en la zona de la cuenca del Cove y que las simulaciones en general representan el ciclo anual promedio de niveles: el acuífero comienza a recargarse en el mes de Junio alcanzando los máximos niveles en Diciembre, posteriormente comienzan a disminuir a partir de Enero hasta Mayo.

Se plantearon escenarios de cambio climático para ser simulados en el modelo numérico calibrado. Para ello, se realizó un análisis de los parámetros Recarga, Tasas de Explotación y Nivel del mar en el modelo de acuerdo a variaciones esperadas de cambio en estos parámetros. El parámetro recarga presenta alta sensibilidad en las simulaciones realizadas con el modelo calibrado de la isla de San Andrés y con los porcentajes de aumento y disminución empleados. De los escenarios simulados los mas probables parecen ser aquellos que implican un aumento o disminución de la recarga a una tasa de 2% anual respecto al valor promedio. Manteniendo un bombeo igual al actual concesionado y con una tasa de recarga del +2% se alcanzan valores de niveles piezométricos hasta de 14msnm al final del periodo de simulación. Cuando se disminuye gradualmente la tasa de recarga anual en -2% se alcanzan niveles hasta de -0.1msnm al final del periodo de simulación.

La tendencia aparente en la Isla es el aumento de la recarga, por el aumento de las precipitaciones según los registros históricos. Esto podría permitir el aumento de los caudales de explotación. Sin embargo, para poder tener certeza sobre la sostenibilidad del recurso hídrico es indispensable mejorar la información existente. Por ello, se recomienda continuar con las tasas de explotación actuales hasta que se tenga mayor y más confiable información.

Es absolutamente necesario que la autoridad ambiental (CORALINA) y la empresa prestadora de servicios diseñen una política para el manejo de la información geológica, hidrológica e hidrogeológica simultáneamente con campañas de monitoreo sistemáticas y continuas. Solo de esta manera se logrará un buen manejo del recurso hídrico en la Isla.

Referencias Bibliográficas

- Cheng, A. y D. Ouazar** (2004). *Coastal aquifer management: monitoring, modeling, and case studies*. Volume 107. Lewis.
- CORALINA** (1999). *Plan de Manejo de las Aguas Subterráneas de la Isla de San Andrés, 2000 – 2009*. Documento técnico.
- Diezemann W; Delgado C.** (1957) “Aprovechamiento del deposito de agua subterranea dulce en la isla de san andres”. *Boletín Geológico*, vol V. num 187-109. Bogota. Diciembre del 1957
- 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.
- 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”. *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.
- Hugget, A.** 1989.”Compilación hidrogeológica de las islas de san andrés providencia y santa catalina colombia”. Reporte Técnico Ingeominas.
- INGEOMINAS**, 1997. “Caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés”. Reporte Técnico.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.