

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA ZONA DE RECARGA DEL ACUÍFERO MORROA, COLOMBIA

EVALUATION OF THE GROUNDWATER USE CONDITIONS IN THE RECHARGE AREA OF MORROA AQUIFER, COLOMBIA

Leonardo David DONADO GARZÓN¹
Julio César BUITRAGO CARRILLO²
María Consuelo VARGAS QUINTERO³
Jorge Armando GRANADOS ROBAYO⁴

RESUMEN

Ante la ausencia de corrientes superficiales permanentes, el Acuífero Morroa es la principal fuente de agua para la región. Constituye un sistema hidrogeológico complejo de origen aluvial. Abastece una población estimada de 500 mil habitantes de poblaciones en los departamentos de Sucre y Córdoba, con una dotación de 217 L/hab/día. Se presume que debido a la explotación intensiva y descontrolada del acuífero y la intensa deforestación en el área de recarga, el acuífero ha presentado descensos en sus niveles registrados en los pozos de explotación. Visual MODFLOW fue utilizado para simular de manera interpretativa el flujo en el *Acuífero Morroa*, para mostrar y evaluar el modelo hidrogeológico conceptual planteado. La zona de recarga del *Acuífero Morroa* fue modelada como un acuífero isotrópico permeable con el potencial de flujo horizontal ya sea libre o confinado. La extensión de la región estudiada cubre las áreas con mayor extracción. La conductividad hidráulica es la variable con mayor grado de conocimiento en el acuífero. El modelo se calibró en estado estable, usando los niveles de 1993 como condición inicial. La principal conclusión de esta investigación fue que el Campo de Pozos de Corozal debe ser rediseñado para un uso sostenible del recurso hidráulico.

ABSTRACT

Because of the absence of permanent superficial streams, the Morroa Aquifer is the main source of water for the region. It constitutes a hydrogeological complex system of alluvial origin. It supplies a estimated population of 500 thousand habitants in towns of the departments of Sucre and Córdoba, with an endowment of 217 L/hab/día. One shows off that due to the intensive and uncontrolled exploitation of the aquifer and the intense deforestation in the recharge area, the aquifer has presented descents in its registered levels in the exploitation wells. Visual MODFLOW was used to simulate in an interpretive way the flow in the Morroa Aquifer, to show and to evaluate the outlined hydrogeological conceptual model. The recharge area of the Morroa Aquifer was either modeled as an isotropic permeable aquifer with a horizontal flow potential, unconfined or confined. The extension of the studied region covers the areas with more extraction. The hydraulic conductivity is the variable with more degree of knowledge in the aquifer. The model was gauged in stable state, using the levels of 1993 as initial condition. The main conclusion of this research was that the Wells Field of Corozal should be redrawn for a sustainable use of the water resource.

PALABRAS CLAVE: Modelo Hidrogeológico Conceptual - Flujo – Agua Subterránea – Morroa – WHS Solver

KEYS: Hydrogeological Conceptual Model - Flow – Groundwater – Morroa – WHS Solver

1. INTRODUCCIÓN

El Grupo Funcional de Hidrogeología de la Subdirección de Recursos del Subsuelo del Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear, INGEOMINAS, propuso realizar un modelo numérico del Acuífero Morroa y así brindar una herramienta a las autoridades que manejan el recurso hidráulico en esta zona, que les permita tomar las medidas pertinentes de prevención y control, definidas como aquellas que permitan una adecuada explotación del agua, ya que los modelos de simulación y optimización facilitan el análisis y el diseño de los planes y proyectos de recursos hidráulico, puesto que son simplificaciones físicas o matemáticas de los sistemas naturales.

El abastecimiento de agua potable en la zona es crítico debido a la ausencia de agua superficial tanto en calidad como en cantidad; El departamento de Sucre el 91.7%, como el 12% de los municipios del Departamento de Córdoba se abastecen del agua subterránea; de allí la importancia regional del Acuífero Morroa, captadas a través de pozos profundos. En promedio se extraen 217.7 L/hab/día y las pérdidas de agua en la región son del orden del 60%. La extracción de agua se hace siguiendo el criterio de demanda, sin tener en cuenta las características de la fuente y tampoco se cuenta con micromedición en las cabeceras municipales, ni macromedición en los sistemas de abastecimiento del Departamento [8].

¹ Ingeniero Civil, Candidato a Magíster en Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. p295251@ing.unal.edu.co

² Ingeniero Civil, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Candidato a Doctor Ingeniero en Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. jcbuitrago@alumnos.upm.es

³ Ingeniera Química de Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Especialista en Hidrología Subterránea de la Universidad Politécnica de Cataluña. Técnico – Científico, INGEOMINAS. mvargas@ingecom.gov.co

⁴ Ingeniero Civil, Magíster en Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. rortizm@ing.unal.edu.co

Como primera etapa del proyecto, se realizó un modelo hidrogeológico conceptual a escala 1:100,000. Posteriormente se desarrollo el modelo numérico del área de recarga, ya que en la actualidad es la zona de mayor explotación y por consiguiente de mayor información disponible. Este modelo es interpretativo y pretendió estudiar, organizar y actualizar datos existentes e involucrarlos en el mismo, con el fin de presentar un sistema de flujo regional. Estos modelos son usados para ayudar a establecer características de las fronteras del acuífero y poder cuantificar la cantidad de agua dentro del sistema y la recarga potencial del acuífero [1]. Adicionalmente, la realización de este modelo es indispensable para la ejecución de posteriores modelos predictivos o genéricos. El principal objetivo perseguido es realizar el modelo numérico interpretativo de flujo del área de recarga del Acuífero Morroa, precedido del análisis e interpretación de la información hidrogeológica existente planteada en el modelo hidrogeológico conceptual.

En la región se encuentran tres acuíferos principales: Morroa, Costero (Golfo de Morrosquillo) y Betulia. El **Acuífero Morroa** abastece una población actual de 500.000 habitantes a través de los acueductos municipales de Sincelejo, Corozal, Sampués, Ovejas, Los Palmitos, Morroa y San Juan de Betulia, además de otros municipios de los departamentos de Bolívar y Córdoba [8]. El **Acuífero Costero o del Golfo de Morrosquillo** abastece los municipios de Santiago de Tolú, San Onofre, Toluvié y Palmito, y los acueductos regionales de Puerto Viejo, Varsovia, Palmito y la Arena además de pozos privados en varias fincas, y el **Acuífero de Betulia** abastece los municipios de San Pedro, Buenavista, Sincé y Galeras, de ahí la importancia de estudiar con cuidado el principal acuífero de la región, el Morroa. El Acuífero Morroa, es multicapa y conformado por intercalaciones de capas de areniscas, conglomerados y arcillolitas no continuas en el plano horizontal y con frecuentes cambios de facies. Estas características litológicas hacen que el acuífero presente un carácter heterogéneo y anisotrópico. El acuífero tiene un espesor variable alcanzando profundidades desde 130 hasta 1000 m. La utilización de métodos analíticos no sería aplicable ya que las suposiciones de estos métodos se basan en condiciones ideales. En el Acuífero Morroa la profundidad de los pozos de explotación varía entre 140 m (los más antiguos) hasta 390 m (los más recientes), con caudales de explotación entre 10 y 60 L/s. La mayor explotación del acuífero es el campo de pozos de Corozal, donde se bombea continuamente durante las 24 horas del día, y decrece en los campos de pozos de Palmito, Ovejas, Chinú y Sahagún. A manera de estimativo se cree en la zona de recarga del Acuífero Morroa, existen recursos se estiman en 12.3 m³/s, según datos del Atlas hidrogeológico de Colombia [8].

En el campo de pozos de Corozal (principal zona de explotación), los niveles estáticos en la mayoría de los pozos han presentado descensos a razón de 4 m/año y en algunos pozos de 10 m/año. El agua es apta para consumo humano y solamente se hace tratamiento de cloración antes de su distribución.

El acuífero Morroa está ubicado entre los Departamentos de Sucre y Córdoba, como se muestra en la figura 1, y posee una extensión de unos 9000 km², aflora en una extensión de 600 km² desde Ovejas (Sucre) hasta Sahagún (Córdoba), formando una serie de colinas abruptas a la altura de Ovejas tornándose más suaves y onduladas al sur hasta casi desaparecer en el municipio de Sampués.

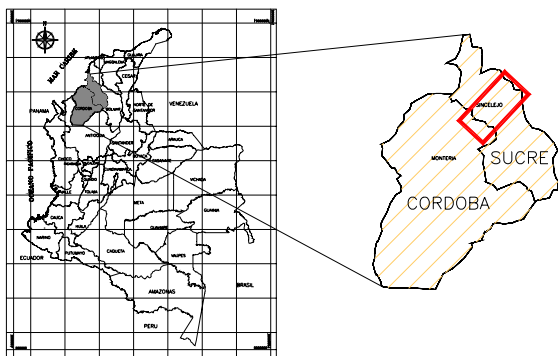


Figura 1. Localización general del Acuífero Morroa



Figura 2. Forma típica del Acuífero Morroa

2. ACTORES CLAVES EN LA GESTION DEL AGUA SUBTERRANEA

En el departamento de Sucre funciona la Unidad de Aguas adscrita a la Secretaria de Obras de la Gobernación, es la encargada de la planificación de los proyectos de acueductos para los municipios del departamento. Esta Unidad en un pasado se encargaba de construir algunos pozos, pero en la actualidad su equipo de perforación está averiado, y las construcciones de pozos las realizan en su totalidad firmas privadas. Cada municipio gestiona la obtención de recursos para su acueducto, mediante diferentes fuentes de financiación tales como FINDETER (Financiera Oficial), Financieras Privadas, mecanismos de cofinanciación, recursos propios, y recursos asignados por la Ley 60. La gestión en el sector ha evolucionado hacia una descentralización completa, ya que como se ha mencionado es el municipio el responsable de garantizar la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo.

El acuífero se encuentra ubicado en la jurisdicción de **CARSUCRE** (Corporación Autónoma Regional de Sucre), la cual es responsable de administrar y proteger el recurso hidráulico. En el departamento de Córdoba, el manejo del recurso se ha delegado en las empresas de Acueducto y Alcantarillado de los municipios, debido a la desaparición de tanto la Unidad de Aguas del Departamento, como la de la **CVS** (Corporación Autónoma Regional del Valle del Río Sinú). La mayoría de los pozos construidos no cuentan con los permisos de concesión (Decreto 1541 de 1978) y por lo tanto está pendiente su legalización. Tampoco se está cobrando la tasa por el uso del agua, como lo establece la Ley 99 de 1993, artículo 43.

3. CONDICIONES SANITARIAS DE LAS CAPTACIONES



Fotografía 1 Estado actual del pozo 24 de Corozal

Una de las fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea es la carencia de zonas de protección ambiental para los pozos y aljibes que se explotan en la región, como el caso del pozo No. 24 de Corozal, exhibido en la fotografía 1. Adicionalmente, se presentan en sus inmediaciones asentamientos humanos y por consiguiente letrinas. Las tuberías y sellos de los pozos se encuentran en regular estado, presentando en algunos casos óxido en las tuberías y ruptura o carencia de sello sanitario.

La proliferación de botaderos de basura sin control alguno, como se ve en la fotografía 2 y la incineración a cielo abierto constituyen una grave componente de afectación ambiental y social. Estos hechos adquieren especial importancia si se considera que la zona de recarga del acuífero de Morroa posee una porosidad promedio del 20% y puede llegar a verse afectada por la contaminación de los lixiviados provenientes de la degradación de las basuras.

3.1 Fuentes potenciales de contaminación

Disposición de aguas residuales. Este es uno de los principales problemas de la región, por el bajo nivel de cobertura del sistema de alcantarillado, a excepción de los municipios de Los Palmitos con una cobertura del 88% y de Ovejas con un 75%. El resultado de la falta de alcantarillado es el saneamiento in situ a través de pozos sépticos (se estima 2 ó 3 pozos por vivienda) o su vertimiento directamente en el suelo de los patios de las viviendas.

En la zona del acuífero ningún municipio han construido su sistema de tratamiento para sus aguas residuales. En estos municipios el alcantarillado vierte sus aguas sin ningún tipo de tratamiento a los arroyos urbanos.



Fotografía 2 Botadero de basuras del municipio de Corozal, ubicado en la vía a San José de Piletas.

Disposición de residuos sólidos: La mayoría de los municipios disponen sus basuras a cielo abierto, donde la generación de vectores incide en la proliferación de enfermedades, además se modifica la unidad paisajística dando un aspecto desagradable. Otra forma de disponerlos es en los arroyos urbanos. El municipio de Corozal cuenta con un relleno sanitario, que no cumple con las especificaciones técnicas de diseño, porque utiliza material de revestimiento y compactación permeable, como se observa en la fotografía 2.

Deforestación. La tala de especies de alto valor (Fotografía 3) de la cual ha sido objeto la única reserva forestal de la Serranía de Coraza y Montes de María (población vegetal aproximada de 6.730 ha), ha ocasionado un impacto en las fuentes de aguas abastecedoras de acueductos.



Fotografía 3 Deforestación presente en la zona de recarga

La deforestación producida por la tala y quema severa de rastrojos y pastizales ha incrementado los procesos de deterioro del suelo, cuerpos de agua y fauna, por la sedimentación y taponamiento de algunos caños [8].

3.2 Fuentes superficiales contaminadas

Una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales son las aguas residuales de los municipios, siendo el Arroyo Grande uno de los cuerpos de agua más afectados, porque es el receptor de las aguas residuales de los municipios de Sincelejo, Corozal, Morroa, Galeras y Sincé entre otros, que posteriormente entrega sus aguas al complejo de ciénagas de Santiago Apóstol. Esta situación se acentúa más por la deficiente infraestructura de servicios públicos, como es el caso del aseo en los municipios de esta jurisdicción que no cuentan con sistemas de recolección adecuados, ni sitios especiales para su disposición final.

Otra fuente de contaminación de las aguas superficiales es la cascarilla de arroz generada por los molinos arroceros que se constituye en la mayor causal de disminución del recurso hidrobiológico, por el consumo directo de oxígeno disuelto en el proceso de biodegradación y proceso de sedimentación.

4. ENCUADRE HIDROGEOLÓGICO

El principal acuífero y fuente de agua de la región está representado por el Miembro Morroa, que está formada por capas de areniscas, conglomerados y arcillolitas. La sedimentación detrítica es el reflejo de un modelo de abanico aluvial y cauces aluviales (Figura 2), de tal forma que los niveles de grava y arena proceden de los canales de mayor importancia. Tiene un carácter heterogéneo y anisótropo con recarga a partir de las aguas lluvias [4].

Por su origen, el acuífero es variable en su espesor aparente superficial y en su composición litológica. La presencia de capas de arcillolitas se hace más notoria hacia el sur, donde también disminuye el espesor. La conexión hidráulica entre las capas de areniscas y arcillolitas, está condicionada por la interdigitación que presentan y puede variar de un nivel a otro.

El Miembro Morroa se depositó en un ambiente fluvial y hace parte del Anticlinal de Pozo del Chorro que le sirvió como barrera a la depositación proveniente del oriente, por ésta razón al occidente del anticlinal, el Miembro Morroa tiene limitaciones como acuífero potente por su espesor y contenido de finos. Al Oriente del eje del anticlinal el Miembro Morroa se comporta como un gran monoclinal con hundimiento hacia el oriente. La tabla 1 resume el encuadre hidrogeológico del acuífero.

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

La simulación numérica supone dar una representación matemática del modelo conceptual. Para tal fin se solucionarán las ecuaciones fundamentales de flujo de aguas subterráneas en forma de diferencias finitas de modo que las ecuaciones diferenciales parciales puedan resolverse. La cual en estado estable es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W(x,y,z) = 0 \quad [1]$$

La zona de recarga del Acuífero Morroa fue modelada como un acuífero isotrópico permeable con el potencial de flujo horizontal ya sea libre o confinado, dependiendo de las partes donde aflora y donde no, respectivamente. La extensión de la región estudiada se escogió con miras a cubrir las áreas con mayor extracción, dada que es el área con mayor y mejor información.

5.1 Descripción general

El modelo numérico se elaboró usando el programa modular tridimensional de diferencias finitas para la solución de problemas de flujo de Aguas Subterráneas desarrollado por el USGS (U.S. Geological Service), MODFLOW, compilado en la adaptación comercial de Waterloo Hydrogeologic Inc., llamada Visual MODFLOW, versión 2.7.1. El Visual MODFLOW (VM) permite un ingreso interactivo de datos (pre-procesamiento) y una salida interactiva de resultados (pos-procesamiento) de los datos de MODFLOW. Según WMC [9] las principales virtudes de VM radican en que proporciona pantallas de ingreso amigables, en las cuales se indexan números como datos de entrada para el modelo, crea o lee mapas de curvas de nivel de las propiedades del modelo, edita las propiedades de cada celda de la cuadrícula o grupos de ellas y crea un conjunto de datos basado en archivos de texto estándar para MODFLOW. Además ejecuta el modelo y proporciona una visión general del comportamiento de la interpolación numérica mientras se está emprendiendo y presenta los resultados de salida: balance hídrico, mapas de isopiezas, mapas de descenso dinámico y estadísticas de calibración.

6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Para la elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual se siguió la metodología empleada por el Grupo de Hidrogeología del INGEOMINAS [3], la cual consta de siete actividades de la exploración hidrogeológica regional: geología, hidrogeología, geofísica, hidrogeoquímica, hidráulica, inventario de pozos e hidrología; el procedimiento siguiente en cada uno de ellas es el de recopilación de la información existente, seguido de un procesamiento, interpretación y análisis de dicha información, para luego integrarla en un mapa, modelo o balance que puede incluir a uno o varios de los frentes iniciales. El compendio de los productos de cada uno de las actividades constituirá el modelo hidrogeológico conceptual del Acuífero Morroa. Estos aspectos son fundamentales para determinar las condiciones de frontera a aplicar en el modelo, y poder analizar si los resultados entregados por el modelo concuerdan con la realidad del terreno.

6.1 Hidráulica

La información hidráulica se refiere principalmente a los espesores saturados y parámetros hidráulicos del acuífero. Estos datos son obtenidos de registros históricos de toma de niveles, registros de diseño y construcción de pozos y pruebas de bombeo. Desafortunadamente, los datos piezométricos no tienen un programa de medición sistemático, sino que son tomados cuantitativa y aleatoriamente, como cuando existen daños en los equipos de bombeo, y además las instalaciones de los pozos, no están dotadas de piezómetros de medición de niveles. El radio de Influencia del campo de pozos de Corozal se estimó en 80 km, para un periodo de 45 años de explotación. Las figuras 3 y 4 muestran el descenso en el nivel del agua en acuífero a través del tiempo.

Tabla 1 – Encuadre hidrogeológico del Acuífero Morroa

SÉCTOR	UNIDAD	Espesor [m]	Transmisividad [m ² /día]	Precipitación Media Multianual [mm/año]	Recarga Potencial [mm/año]	Área Total [km ²]	Área Permeable [km ²]
Sector 1 Ovejías	<u>Unidad I:</u> zona localizada al noreste del área de estudio, correspondiente a una facie muy arcillosa de la formación Morroa, caracterizada por interestratificación de areniscas de grano fino a medio, arcillosas, con capas de arcillolitas y conglomerados.	500	70	1400	199	99	99
Sector 2 Ovejías - Los Palmitos	<u>Unidad II:</u> Es una franja bastante homogénea con sedimentación clástica predominante, la topografía es abrupta. Está compuesta por areniscas de grano grueso a conglomerático con abundantes nódulos calcáreos del mismo material. Por su posición estratigráfica esta unidad infrayase a la unidad I. Representa la principal área de recarga hacia el acuífero.	400	70			130	130
	<u>Unidad III:</u> Es un cuerpo lenticular que infrayase la unidad II y subrayase la Formación Sincelajo. En esta zona se producen cambios de rumbos en las capas, lo cual evidencia la presencia de un sistema de fallas de dirección NW – SE, relacionadas con la falla de la Loba. Corresponde a un borde lateral del abanico aluvial con presencia de capas de arcillolitas y areniscas de grano medio a conglomerático. Existe una recarga inducida desde la Unidad II, más permeable que la subrayase.	350	25	1306	131	22	20
	<u>Unidad IV:</u> es un cuerpo lenticular situado al occidente de Palmitos. Su topografía contrasta con la Unidad II infrayasente. Está constituida por arenisca de grano medio, con fracturas rellenas de carbonato de calcio, ocasionalmente conglomerados lenticulares y capas de arcillolita vercosa	300	270			16	16
	<u>Unidad V:</u> franja muy angosta que subrayase a la Unidad IV. La litología corresponde a una arenisca arcillosa con niveles intercalados de arcillolitas.	130	200			15	15
Sector 3 Corozal	<u>Unidad VI:</u> esta unidad subrayase en su borde noroccidental a la unidad II y en su extremo occidental a la Formación Sincelajo. En el Sur, a la altura de Sampués, la depositación fue controlada por una falla de dirección NW – SE. La sedimentación clástica se vuelve más fina hasta casi desaparecer en cercanías de Sampués. Hidrogeológicamente tiene un comportamiento heterogéneo, debido a su ambiente de sedimentación. Al Occidente muestra condiciones de acumulación de sedimentos arcillosos y en general presenta cambios faciales muy notorios de norte a sur. Hacia el norte de Corozal, la sedimentación es predominantemente gruesa con ocasionales lentes arcillosos. Desde el sur hasta Sampués, aparecen dos paquetes alargados diferenciables por el tipo de sedimentación, separados por una capa arcillosa que aparece continua desde Morroa, prolongándose al sur de Sampués.	1000	260	1176	46	149	111
	El paquete Basal, subrayase la formación Sincelajo, es predominantemente arcilloso y tiene un espesor aproximado de 500 metros y además presenta una capa de arcillolita hacia la base en contacto con la Formación Sincelajo. Consta en total de cinco capas de arcillolitas y cuatro de areniscas de grano fino arcillosas. Suprayasendo este paquete predominantemente arcilloso se encuentra un paquete predominantemente clástico, compuesto por arenisca de grano grueso a conglomerático y con abundantes nódulos calcáreos. Al oriente de Chochó se presenta un nivel arcilloso que se prolonga hasta Sampués. Hacia el sur, las areniscas se vuelven más finas y tienen matriz arcillosa.						
Sector 4 Sampués-Chinú-Sahagún	Unidad VII: Desde el sur de Sampués hacia Chinú, el espesor aparente de la formación disminuye y las intercalaciones arcillosas se hacen más frecuentes. Las capas de arenisca más importantes se encuentran al oriente de Sampués, y son la continuación del conjunto arenoso sobre el cual está la población de Chochó. Al occidente del Chinú se presentan dos conjuntos; uno arenoso y uno arcilloso; el arenoso corresponde a la Formación Sincelajo y el arcilloso de 130 metros de espesor aflora hasta un kilómetro al occidente de Chinú. Suprayasendo los anteriores hay un paquete lenticular, el consta de dos niveles arenosos y dos arcillosos. El nivel arcilloso central, tiene pequeñas intercalaciones de arenas. Desde el Carranzo hasta Sahagún es predominantemente arcillosa, con algunos niveles no continuos de arenisca arcillosa.	350	19	1306	167	106	50

6.2 Geología - Geofísica

El Miembro Sincelajo Superior o Miembro Morroa es una secuencia continental predominantemente arenosa con intercalaciones de areniscas medias a gruesas, conglomerados y arcillolitas. Se extiende como una franja continua de más de 5 km de ancho y 60 km de largo con dirección N10E, que atraviesa prácticamente todo el departamento de Sucre, desde Ovejías en el norte hasta Sampués en el sur, prolongándose aún más en el Departamento de Córdoba, hasta cercanías del municipio de Sahagún [2]. Los valores de resistividad encontrados en el área son bajos a pesar de la existencia del acuífero de Morroa, el cual posee un agua de magnífica calidad, con valores entre 12 y 30 Ω - m. Esto se debe al feldespato meteorizado que se transforma en minerales de arcilla, disminuyendo así el valor de resistividad de la roca.

6.2.1 Inventario de pozos

Con base en la información recopilada y clasificada por el INGEOMINAS en el BNDH (Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos) y en el proyecto “Evaluación Hidrogeológica en los Departamentos de Córdoba y Sucre”, se procedió a hacer una agrupación de los puntos de agua existentes en el área de recarga del Acuífero de Morroa.

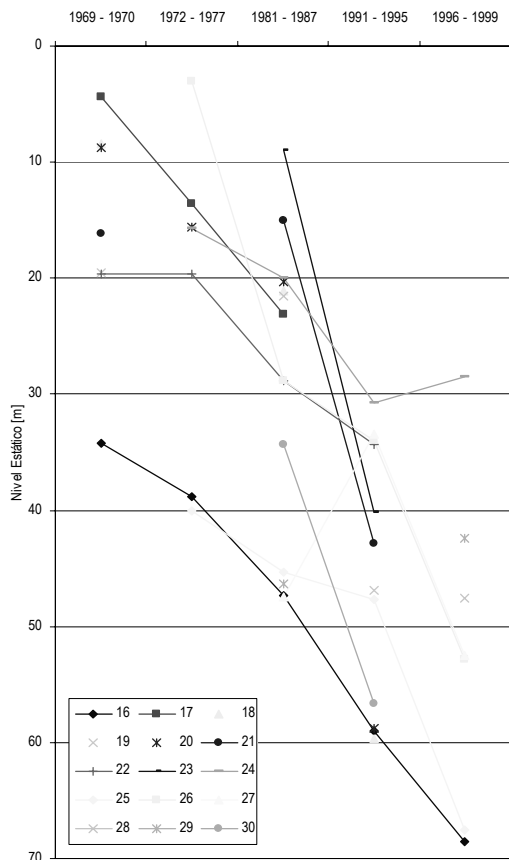


Figura 3. Evolución histórica de los niveles de los pozos 16 a 30 de Corozal

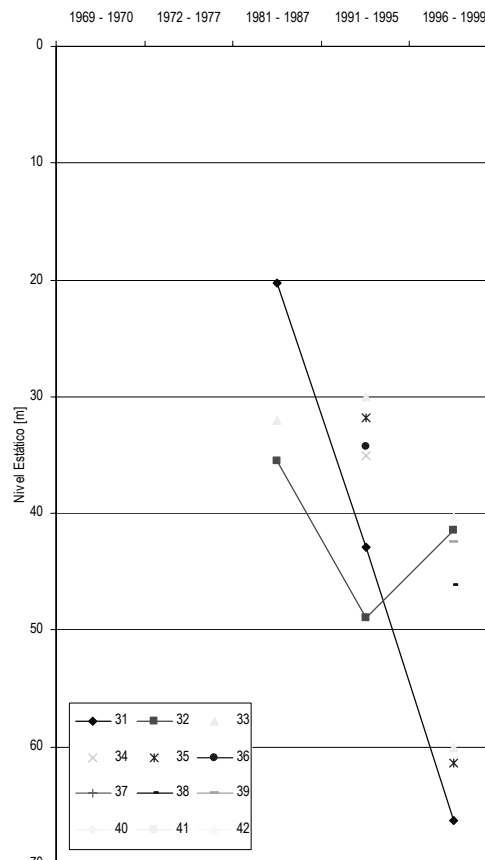


Figura 4. Evolución histórica de los niveles de los pozos 31 a 42 de Corozal

Los puntos relacionados corresponden a registros históricos y por lo tanto el número relacionado no corresponde a la cantidad de puntos que sirven para labores de extracción de agua en la actualidad. Cabe aclarar que se presume que debido al abatimiento registrado en los últimos años de los niveles estáticos, se ha presentado la desaparición de casi la totalidad de los aljibes y manantiales [1]. De los 93 pozos elegibles 47 se encuentran ubicados en el municipio de Corozal, 5 en los Palmitos, 6 en Ovejas, 8 en Sampués, 11 en Chinú y 16 en Sahagún. Así, se cuenta con información de los principales campos de extracción de agua a lo largo de la zona de estudio. El campo de pozos de Ovejas tiene una operación de 12 horas al día al igual que el de Sahagún, Chinú y Sampués. En pozos ubicados en el municipio de Palmitos también se bombea con la misma intensidad. El campo de pozos de Corozal es el único que funciona la 24 horas del día, debido a que es la fuente de la capital, Sincelejo. Los pozos son multifiltro en su gran mayoría, con diámetros internos que oscilan entre 14 y 6 pulgadas. En cuanto a la profundidad de los pozos, en la figura 5 se puede apreciar que existe una población alta de los pozos menores de 200 metros, si se compara con aquellos cuya profundidad sobrepasa esa cifra. En cuanto a su caudal de explotación, se puede decir a pesar de que se cuenta con una gran cantidad

de pozos sin información, gran parte de los pozos extraen menos de 10 L/s. La condición general de explotación se puede observar en la Fig. 6.

Tabla 2 Caudales actuales de explotación de EMPAS (EMPAS, 1999)

Fecha	17/11/99
POZO	Q [L/s]
16	16
23	13
24	32
25	21
29/30	45
31	15
32	51
33	37
34	22
35	52
36	45
37	50
38	16
39	32
40	41
41	0
42	0
Q total	488

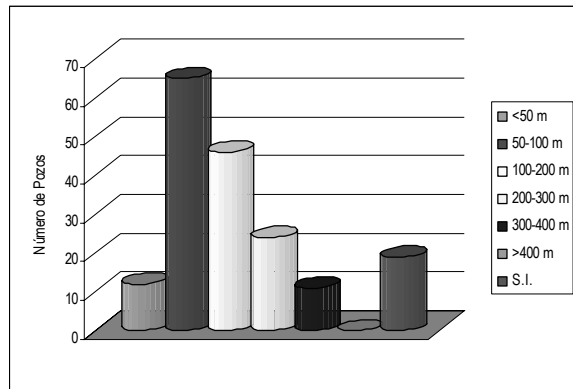


Figura 5. Clasificación de los pozos según su profundidad

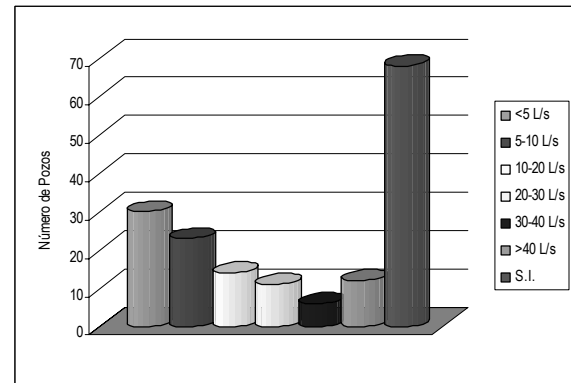


Figura 6. Clasificación de los pozos según su caudal de explotación.

6.3 Hidrología

La información se procesó a nivel mensual, seleccionando un período común de registro 1974-1989. Se correlacionaron las diferentes estaciones a nivel mensual, generando datos faltantes por medio del método de las proporciones [7]. A partir del mapa de isoyetas se concluyó que existe una región húmeda en la zona cenagosa en las orillas del río Magdalena (San Marcos) y la más seca hacia los límites con el departamento de Bolívar. Hacia Chalán se presenta un incremento en los valores de precipitación debidos al aumento de elevación. En la zona de afloramiento del acuífero de Morroa, se tiene que al sur, entre Sahagún y Chinú se presenta una precipitación medio de 1300 mm. El área entre Chinú y Corozal está delimitada entre 1200 y 1300 mm de precipitación y de Corozal hacia el Norte hay aumento en los valores hasta llegar a más de 1400 mm al occidente de Ovejas. En la zona se presenta una distribución estacional unimodal durante el año. Se caracteriza por tener un período muy seco de Diciembre a Marzo y una distribución uniforme en los otros meses. Según promedios se estima que el 75.8% de la precipitación se presenta en los meses de Mayo a Octubre y que en los cuatro meses más secos se registra el 8.2%. La capacidad de campo estimada para esta zona fue del 5% de humedad, es decir que para cubrir la capacidad de campo se necesita una lámina de 105 mm/año. Estudios realizados por Rodríguez (1977) [6], indican que en el norte del acuífero la infiltración es más rápida, mientras que en la zona centro y la zona sur la recarga es más lenta debido a la menor pendiente de la zona de recarga y por la vegetación disminuida que cubre este sector. Del balance hídrico se puede concluir que la recarga potencial del acuífero de Morroa, varía por zonas de la siguiente manera: En el norte, en Ovejas, presenta 199 mm/año; siguiendo al sur hasta Corozal, 131 mm/año; en la zona de principal explotación (Campo de Pozos de Corozal) de 46 mm/año; en la zona entre Sincelejo y Sampués presenta 97 mm/año de recarga y en su zona sur presentan 167 mm/año.

7. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Se diseñó un modelo tridimensional donde se emuló el buzamiento de las capas otorgando las propiedades del acuífero en forma escalonada. Anderson, M. y Woessner, W. [1] recomiendan en estos casos hacer diseños de perfil, donde en una capa horizontal se modela el buzamiento. Para efectos de este modelo se integraron varios modelos de perfil, para darle una visión tridimensional al acuífero. El área del modelo es de 1471.07 km². El VM trabaja con interpolación centrada en el bloque (BCF), por lo tanto, en cada celda sólo puede existir un pozo, y esto hizo necesario refinar la grilla en los campos de pozos, llevando el modelo al límite de filas permitido por la versión (500 filas x 500 columnas). También se incluyó la forma de la topografía de la zona mediante la inserción de una superficie de Surfer (Archivo grd), el cual obtuvo como datos base la topografía digitalizada obtenida del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

7.1 Parámetros hidráulicos

Conductividad hidráulica: en este modelo se usará un enfoque determinístico, es decir que la conductividad es una variable fija pero desconocida. Por lo tanto se zonificará la conductividad hidráulica basado en razonamientos geológicos descritos en el modelo hidrogeológico conceptual. Estos valores son obtenidos de dividir la transmisividad entre el espesor saturado de cada unidad acuífera.

7.2 Condiciones de frontera

Condiciones de Flujo: Dado que no se disponen de datos de caudales de infiltración pero sí de niveles, se decidió, por simplicidad, tratar los límites con un nivel fijo, obtenido mediante la técnica de interpolación, kriging, sistematizada por Surfer, para obtener valores de niveles en donde no se conocen. El año base fue 1993, y el resultado es mostrado en la figura 7. Los valores de las cargas están expresados en metros con el nivel del mar como datum. Además se han supuesto dos alternativas para determinar las fronteras hacia el oriente del modelo. La primera consistió en otorgar una carga hidráulica constante a todas las celdas con flujo de la columna 97 (extremo oriental), determinada por el Pozo Betulia No. 2, el está ubicado en este punto del modelo. La primera consistió en otorgar una carga hidráulica constante a todas las celdas con flujo de la columna 97, determinada por el Pozo Betulia No. 2, el está ubicado en este punto del modelo. El pozo tiene un nivel estático de 27.8 m, con lo cual se interpoló entre las filas 1 y 471. En la fila 1, al sur del modelo, la orografía es más baja, obteniéndose una carga de 49.4 m y al norte, donde es más alta, una cota de 219.1 m.

7.3 Ejecución del modelo

Para la ejecución del modelo son necesarias las condiciones iniciales, que en este caso son los niveles estáticos del acuífero en 1993. Estos datos fueron interpolados por Visual MODFLOW de datos suministrados en un archivo de texto. Estos datos preconditionan el método de solución para obtener una convergencia mucho más eficiente. El método WHS se basa en la bi-conjugada estabilizada del gradiente (Bi-CGSTAB, Bi-Conjugate Gradient Stabilized), la cual es una rutina de aceleración de las condiciones límites en las ecuaciones de flujo del agua subterránea. Este método de solución es iterativo, y aproxima el gran arreglo de ecuaciones diferenciales parciales a través de una solución aproximada. El método además preconditiona la ecuación matricial para dar una solución más eficiente [5]. Este método contempla 2 niveles de factorización. Los diferentes niveles de factorización permiten a las matrices ser inicializadas diferentemente para incrementar la eficiencia y estabilidad de la solución del modelo. Un nivel 1, donde se requieren menos iteraciones, pero mayor memoria del ordenador y otro 0, donde es necesaria menos memoria, pero se realiza mayor número de iteraciones. Este procedimiento trabaja con una aproximación de dos filas, para dar la solución en un menor tiempo. Esta aproximación se realiza mediante iteraciones externas e internas. En las primeras, los parámetros hidrogeológicos del sistema son actualizados (transmisividad, espesor saturado, almacenamientos) en un arreglo factorizado de matrices. Las iteraciones internas dan solución iterativa a las matrices creadas en las iteraciones externas. El modelo se calculó en estados estable, usando los mismos niveles estáticos como condición inicial y teniendo en cuenta el modelo hidrogeológico conceptual, cada capa representa una parte de un acuífero confinado/libre con transmisividad y coeficiente de almacenamiento variables. Además la recarga sólo será aplicada en las celdas superiores de la malla.

7.4 Resultados del modelo

Luego de realizar las iteraciones necesarias, y cuando se concuerda con los criterios de convergencia del error residual (5%) y de cambio de carga (5%), se encuentran los valores de las cargas hidráulicas en cada celda. VM se encarga de mostrar de una manera gráfica estos resultados por medio de líneas de contornos de igual carga hidráulica y calcula las velocidades de flujo de agua subterránea. Los primeros muestran la información relacionada con las líneas piezométricas, es decir niveles y abatimientos. En cuanto a las velocidades muestran la dirección de flujo. Los resultados obtenidos en la simulación son mostrados y analizados a continuación. Los valores iniciales producto del análisis conceptual fueron introducidos en el modelo, arrojando para la primera corrida valores de carga muy altos con respecto a las mediciones realizadas en campo para las zonas de Ovejas, Palmitos, Sampués y Chinú, mientras que en el caso de Corozal los valores fueron bajos. Por tanto, se decidió variar los parámetros hasta obtener resultados con mayor grado de correlación con los medidos; se consideró que los datos con mayor incertidumbre eran los correspondientes a la recarga, debido a la falta de mediciones directas de la escorrentía en campo, seguidos por los datos correspondientes a la conductividad, ya que existe incertidumbre en las profundidades reales del acuífero y algunas de las pruebas de bombeo recolectadas fueron desarrolladas en tiempos muy cortos. A continuación se muestran en detalle las variaciones realizadas.

7.5 Balance

Los resultados de la simulación fueron usados para revisar el modelo hidrogeológico conceptual del sistema. Para hacerlo, VM entrega un balance de entradas y salidas de agua al acuífero. Este balance se realizó para las mismas zonas en las que se dividió el acuífero para la asignación de la recarga potencial. Se puede observar que las zonas con mayor movimiento de agua son las de Corozal con cerca de 60.000 m³/día y la de Palmitos alrededor de 40.000 m³/día, mientras que en las zonas de Ovejas, Chinú y Sahagún se produce un movimiento de menos de 20.000 m³/día. Con respecto a las entradas de agua, se observa que en las zonas de Ovejas, Palmitos, Chinú y Sahagún la componente más importante es la proveniente de la recarga, mientras que en Corozal pasa a segundo lugar detrás de la cabeza constante. Las zonas que reciben mayor aporte de agua por parte de las otras son en orden Corozal, Chinú, Palmitos y Sahagún. No existen aportes por pozos en inyección en ninguna de las zonas. La componente más importante de salidas de agua para las zonas de Ovejas, Palmitos, Chinú y Sahagún es la producida por la cabeza constante, mientras que en la zona de Corozal es la originada por la explotación de pozos. Existe un importante aporte de agua hacia zonas externas por parte de las zonas de Palmitos, Corozal y Ovejas.

7.6 Recarga

Los valores iniciales utilizados para la recarga en el modelo fueron los recalculados en el presente proyecto, superiores a los calculados por Rodríguez, G. en 1993 [7] para las zonas de Ovejas, Palmitos, Sampués y Chinú, mientras que en el caso de la zona correspondiente a Corozal, el valor utilizado fue menor, como lo muestra la tabla 3. La diferencia de cálculo radicó esencialmente en la forma de estimar la escorrentía; mientras que Rodríguez utilizó el 15% de la precipitación como escorrentía, en este proyecto se estimó que la escorrentía sólo ocurría en los meses de invierno y se estableció como un 10% del potencial infiltrable. Adicionalmente se realizó un balance de agua en el suelo. Luego del proceso de calibración se obtuvieron los valores mostrados en la columna 4, que para las zonas de Ovejas, Palmitos, Sampués y Chinú fueron menores que los recalculados, sin embargo para la zona de Corozal el valor aumentó.

Tabla 3 - Valores de la recarga del acuífero en mm/año.

Zona	Rodríguez G. 1993	Valores recalculados	Valores Calibrados
Ovejas	179	199	100
El Bongo – Los Palmitos – Corozal	117	131	120
Corozal – Morroa – Chochó	59	46	100
Sincelejo – Sampués – Chinú	93	97	70
Chinú – Sahagún	154	167	120
Promedio	120	154	102

7.7 Conductividad hidráulica

Los valores iniciales para la conductividad muestran un buen grado de correlación con los calibrados para las zonas del sur, mientras que para las zonas del norte y centro los valores cambiaron de forma significativa. Como se planteó anteriormente las diferencias entre los valores de conductividad pueden ser producto del desconocimiento de las profundidades reales del acuífero y de la mala calidad de las pruebas de bombeo

La densidad de las pruebas de bombeo es otro de los factores que influyen negativamente en los valores estimados inicialmente, ya que sólo se tiene información en los campos de pozos y de éstos sólo el de Corozal tiene un buen número de pruebas

Tabla 4 - Valores de conductividad hidráulica en m/día

Zona	Iniciales	Calibrados
1	0.125	0.4
2	0.125	0.75
3	0.07	0.75
4	0.82	0.82
5	1.53	1.53
6	0.54	0.8
7	0.054	0.5

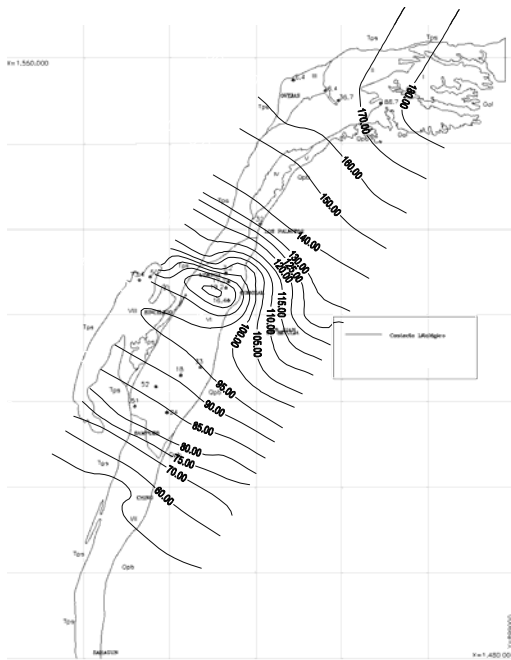


Figura 7 Líneas equipotenciales del Acuífero Morroa

7.8 Líneas equipotenciales y direcciones de flujo

A escala regional, se aprecia el aumento de las líneas equipotenciales hacia el Norte, alcanzando un valor máximo de 205 m y un valor mínimo al sur de 40 m. Las direcciones de flujo tienen orientación Sureste en casi toda el área, menos en la zona de Corozal en donde no es posible establecer una dirección preferencial.

Campo de pozos de Ovejas: Al realizar un análisis más detallado de esta zona, se aprecia una deformación leve de las líneas equipotenciales alrededor del campo de pozos. La dirección de flujo es preferencial hacia el este como se muestra en la gráfica superior de la figura 7.

Campo de pozos de Corozal: En esta zona se observa la presencia de flujos de agua provenientes de las zonas adyacentes, así como una mayor densidad de líneas equipotenciales en las inmediaciones de los pozos, claro indicativo de la explotación a la que está sometida.

Campo de pozos de Sampués: Para esta zona se tienen líneas equipotenciales mucho más distanciadas, que sólo aumentan en número en las inmediaciones de los pozos. La dirección preferencial de flujo es hacia el sureste y el agua se dirige hacia la cabeza constante a menos que se encuentre cercana a los pozos.

Campo de pozos de Chinú: Las líneas equipotenciales presentan formas arqueadas, cóncavas hacia los pozos y por tanto la dirección de flujo es preferencial hacia los pozos y a medida que cesa el efecto de éstos, se dirige hacia la cabeza constante.

8. CONCLUSIONES

No existe en el momento ningún tipo de planeación ni control a la explotación del recurso de aguas subterráneas para el abastecimiento público a nivel gubernamental.

La recarga potencial promedio en el Acuífero Morroa es de 137 mm/año, valor similar al utilizado en el cálculo de las Reservas en el Atlas Hidrogeológico Digital de Colombia [8].

Se obtuvieron resultados piezométrico comparables con los presentes en la zona, no obstante que el acuífero se simplificó en una sola capa, sectorizada diferencialmente según las propiedades hidráulicas de cada zona. Cabe anotar que el acuífero posee estratos no continuos arcillosos que pueden tener incidencia en el comportamiento de el mismo.

Es necesario establecer un programa anual de medición de niveles en los pozos que están en funcionamiento. Esta campaña debe realizarse en una misma temporada durante los años que se efectúe. A la vez las entidades como CARSUCRE y la Unidad de Agua Potable de la Gobernación de Sucre deben implementar la instalación de una red de piezómetros, que permita comprobar el funcionamiento hidráulico del acuífero, para así realizar buenas pruebas de bombeo y determinar con un mejor grado de precisión los parámetros hidráulicos. Estas medidas ayudarán a alimentar de una forma más verídica los datos básicos del modelo numérico y servirán de herramientas en la toma de decisiones sobre el manejo de la explotación del acuífero.

Es conveniente llevar a cabo una evaluación del riesgo de contaminación del acuífero, dado que los municipios no presentan un plan maestro de alcantarillado ni de saneamiento básico. En la Universidad de Sucre se realizó el mapa de vulnerabilidad del acuífero, en la zona de mayor explotación. Este mapa debe ser extendido en toda la extensión del acuífero, para que se pueda conjugar con el modelo numérico realizado y así poder definir zonas de protección ambiental.

Un estudio más profundo deberá incluir un estudio para determinar la sensibilidad del modelo a los cambios en los parámetros del acuífero, así como la influencia del almacenamiento en los estratos de arcilla cuando se supone goteo entre capas y un estudio de la influencia del patrón de búsqueda cuando se supone la influencia estadística en la variación de la carga en función de la dirección. El déficit de agua en el área de Sincelejo, la capital es de 110 L/s. Tal como

los manifestó Rodríguez G. [7], CARSUCRE debe implementarse con urgencia la reforestación del área de recarga del acuífero, para mantener la estabilidad hídrica del acuífero.

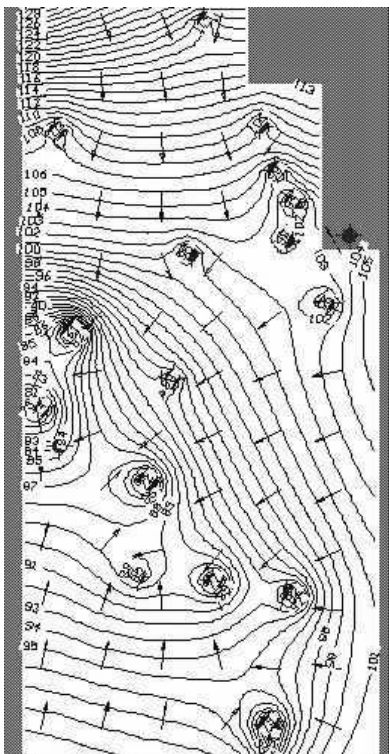


Figura 8 Líneas equipotenciales y de dirección de flujo en el campo de pozos de Corozal.

El Plan de Ordenamiento Territorial de Sincelejo contempla la oportunidad de abastecerse de agua desde los ríos Magdalena o Sinú, incurriendo en altos costos, los cuales no posee el municipio. Este estudio concluye que lo mejor sería realizar un rediseño del campo de pozos de Corozal administrado por EMPAS-ESP. En este nuevo diseño se deberían contemplar parámetros geométricos y de explotación controlada, para permitir un bombeo alterno y evitar el deterioro del acuífero. La región de Los Palmitos presenta un gran potencial hidrogeológico, y el Municipio de Sincelejo podría invertir en la construcción de un buen campo de pozos en esta zona, para así poder atender su déficit en el suministro de agua potable.

Se deberían realizar estudios de campo para establecer con un mayor grado de precisión el valor de la escorrentía, y tener mayor certidumbre de estas variables y hacer estudios de prospección geofísica para la determinación de los límites reales del acuífero, ya que hasta el momento sólo se ha estudiado la zona de recarga.

La simulación de flujo demuestra tener éxito en aquellas áreas en las que se disponía de datos (Fig. 8). En el modelo se utilizó la teoría de variable regional para estimar las condiciones iniciales en las ubicaciones en las que no se contaba con datos.

Debido a la falta de registros mensuales de los niveles registrados en los pozos de la región, el modelo se ejecutó con niveles correspondientes a periodos anuales, lo cual introduce un error al no considerar las variaciones que se producen en los mismos por efectos de los cambios en la

precipitación a través del año. Por tanto se debería complementar el modelo con la inclusión de los datos productos de una campaña de medición de niveles en la zona de estudio.

9. REFERENCIAS

- [1] Anderson, M. y Woessner, W. (1992). Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and Advective Transport. Academic Press, Inc.. San Diego, California. USA.
- [2] Barrera, R. (1994) Mapa geológico del departamento de Sucre a escala 1:250.000. INGEOMINAS, Cartagena.
- [3] Buitrago, J., Donado L. (2000) Evaluación de las condiciones del explotación de la zona de recarga del Acuífero Morroa. Departamentos de Sucre y Córdoba, Colombia. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- [4] Díaz-Granados, A. (1988). Resumen del estudio hidrogeológico del flanco nororiental de la serranía de San Jacinto y de la zona litoral del golfo de Morrosquillo. Boletín Geológico. INGEOMINAS. Vol. 29, No. 1. Bogotá, Colombia.
- [5] Guiguer, N. y Franz, T. (1996). User's Manual for Visual MODFLOW. Waterloo Hydrogeologic Inc. Waterloo, Ontario, Canadá.
- [6] Rodríguez, C.; Sánchez, L.; Zapata, G. Trimbora, P. (1977). Investigación del Comportamiento General de un Acuífero con Radiotrazadores en Corozal, Colombia. Instituto de Asuntos Nucleares e Institute for Radiohydrometrie G.S.F. Bogotá, Colombia.
- [7] Rodríguez, G. (1993). Estudio hidrogeológico del acuífero Morroa. INGEOMINAS. Bogotá.
- [8] Vargas, M., Donado L., Buitrago J., (2000) Informe de Recopilación de Información. Evaluación hidrogeológica regional de los departamentos de Sucre y Córdoba. INGEOMINAS. Documento Interno de Hidrogeología. Bogotá.
- [9] Water Management Consultants Ltd. (1998). Introducción a la práctica a los modelos de aguas subterráneas utilizando MODFLOW. Department of international development. República de Colombia. INGEOMINAS-CVC-CORALINA. Proyecto de Contaminación de Aguas Subterráneas. CNTR 97 2537. Curso de Capacitación. Shropshire, Reino Unido.