

está relacionada con la baja capacidad de respuesta del acuífero a una pronta recarga, que no puede igualar o ser superior a la cantidad del recurso que está siendo extraído, y al disminuir los niveles del acuífero, el agua de mar comienza a dominar zonas donde había agua dulce, lo que lleva a un proceso de contaminación gradual de las aguas llamado salinización (Lundgren, 1999).

Es por este, y otros motivos de sustentabilidad de los recursos, lo que ha llevado a Colombia a implementar una acción legal conocida como Agenda Pacífico XXI, en la cual se propone una guía estratégica para el desarrollo sostenible de la costa pacífica hacia el próximo milenio (Maldonado, 2000), y se incluye la realización de estudios de las aguas subterráneas en las costas colombianas con la ayuda del Gobierno Nacional y de las Corporaciones Autónomas Regionales de cada departamento. Igualmente para el año 2010, se propuso a partir del decreto 1.729 del 2002 la implementación de planes de manejo ambiental de acuíferos (PMAA) que ayuden a la protección de los acuíferos en el territorio colombiano (Vélez, 2010).

En esta investigación, se propuso realizar un estudio hidrogeológico detallado de las condiciones actuales del acuífero del golfo de Morrosquillo en el Departamento Sucre- Colombia, con la ayuda de CARSUCRE; y de acuerdo a los resultados obtenidos, se propuso generar parte de la formulación inicial del PMAA, específicamente en la parte de planeación del recurso de manera que a partir de este, se pueda garantizar su óptimo aprovechamiento mediante la validación del modelo conceptual del mismo, así como la aplicación del modelo matemático realizado en Feflow, el cual que podría ser la principal herramienta de planificación y gestión del recurso en el futuro.

Capítulo I: **Fundamentos del Trabajo**

1.1) FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El agua es un recurso natural, único, frágil y limitado que exige un manejo adecuado para asegurar su conservación y desarrollo sostenible; y aunque es accesible en casi todas las regiones del mundo, en las últimas décadas, en Colombia, las zonas costeras han sido sometidas a una gran presión poblacional, y demandan estrategias integradas de planificación y manejo de dicho recurso, para enfrentar los urgentes problemas que son cada vez más complejos e interrelacionados. (Maldonado, 2000).

El problema principal de las zonas costeras se presenta en las limitaciones que tienen para la obtención del recurso hídrico, debido a que los ríos que desembocan en la costa han sido totalmente alterados o contaminados en sus cuencas altas, y por tanto su uso ya sea a nivel agrícola o de consumo, implicaría una serie de tratamientos sumamente costosos, que en la mayoría de los casos no son realizados. Por tanto, el agua disponible proviene exclusivamente del aprovechamiento del agua subterránea.

Lo que no muchos conocen, es que estos acuíferos costeros son muy vulnerables a los cambios naturales y antrópicos presentes en las costas, y cualquier alteración en las condiciones de equilibrio de los mismos, puede producir la salinización de estas fuentes de agua, debido a la intrusión del agua de mar, y se pudiera poner en riesgo la calidad de las aguas.

En el caso del golfo de Morrosquillo, este ha sido el problema principal que se presenta en el acuífero de la zona, donde se está produciendo un problema de contaminación gradual producto posiblemente a la intrusión de agua salina, y se hizo necesaria la realización de estudios especializados que mostraran cuales eran las condiciones actuales del acuífero, de manera

de plantear estrategias de sustentabilidad del recurso, que estén relacionadas con las nuevas políticas ambientales en el país, y que trata sobre los procesos de ordenación de cuencas y acuíferos, y que plantean la introducción de PMAA (Vélez, 2010). Por tanto, siguiendo las etapas iniciales de los PMAA (Formulación inicial del mismo), se planteó para esta investigación la siguiente interrogante:

¿Cuáles son las mejores estrategias a seguir para garantizar la sustentabilidad del agua subterránea en el acuífero costero del Golfo de Morrosquillo, Sucre-Colombia?

1.2) IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La zona costera Colombiana es un espacio del territorio nacional definido con características naturales, demográficas, sociales, económicas y culturales propias y específicas, en donde se presentan procesos de interacción entre el mar y la tierra; contiene ecosistemas muy ricos, diversos y productivos dotados de gran capacidad para proveer bienes y servicios que sostienen actividades como la pesca, el turismo, la navegación, el desarrollo portuario, la explotación minera y donde se dan asentamientos urbanos e industriales (Maldonado, 2000).

Debido a la riqueza presente en estos ambientes, a partir de la Reunión Cumbre de Río en 1992, se creó la Agenda Pacífico XXI, la cual permitió asignar los usos sostenibles al territorio marítimo y costero a nivel de todas las naciones ribereñas, de manera que se articule la planificación del desarrollo costero sectorial, a la conservación y restauración de los bienes y servicios que proveen sus ecosistemas, a la generación de conocimiento que permita la toma de decisiones de manejo integrado de estas áreas y a impulsar procesos de autogestión comunitaria y de aprendizaje que integren

a los múltiples usuarios de la zona costera en la gestión de su manejo sostenible (op.cit).

A partir de esta agenda, una de las estrategias del Gobierno Colombiano se dio a partir de 1999, dentro de la política de gestión ambiental de CARSUCRE, donde se definió una zonificación ambiental realizada en toda el área de su competencia, haciendo estudios de las zonas de recarga de acuíferos en su jurisdicción. Estas zonas son nombradas como “Áreas de Especial Significancia Ambiental”, es decir, áreas que ameritan ser protegidas y conservadas, y cumpliendo con los lineamientos de la nueva Política Nacional Ambiental del Decreto 1.729 acerca de los PMAA, se determinó como base de su política de gestión, la protección del recurso hídrico subterráneo existente, entre las cuales se encuentra el acuífero del Golfo de Morrosquillo (CARSUCRE, 2005).

Para la conservación y protección de las aguas subterráneas de esta zona, este estudio fue apoyado en las normativas legales del Gobierno Nacional, y para que fuera efectivo, se hizo necesario contar con una estructura institucional como CARSUCRE, de manera de validar el modelo conceptual del mismo, así como la modelación matemática, que en conjunto, se convirtieron en las herramientas técnicas, legales, económicas y sociales que harán parte integral de la Formulación del PMAA del acuífero, y que a través de las cuales, permitirán implementar acciones a seguir para prevenir, mitigar y corregir los impactos y efectos ambientales causados por la extracción y salinización de las aguas que pone en riesgo la calidad de las mismas (op.cit).

1.3) OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1) Objetivo General

Determinar principios de sustentabilidad a partir de una simulación matemática, que garantice el manejo del acuífero costero del Golfo de Morrosquillo, Sucre-Colombia.

1.3.2) Objetivos Específicos

- Estimar el balance hidrogeológico de la región de estudio para determinar la recarga anual del acuífero.
- Hacer un revisión de todos los estudios previos que sirvan de apoyo para complementar el modelo conceptual y validar esta información para proponer el diseño del modelo matemático
- Realizar una campaña de campo en los piezómetros de monitoreo del acuífero para determinar la piezometría y las líneas de flujo a usar en el modelo matemático.
- Realizar un modelo matemático del acuífero usando FEFLOW, que sirva como determinante para proponer la formulación inicial del plan de manejo del mismo, garantizando su aplicación para escenarios futuros.

Capítulo II:

Desarrollo del Trabajo

2.1) MARCO TEÓRICO

2.1.1) MANEJO SUSTENTABLE DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS

Los acuíferos costeros presentan algunas peculiaridades que tienen notable incidencia en su régimen hidrodinámico, en su modo de explotación, en los riesgos potenciales de contaminación y en las precauciones que deben tomarse para su preservación (anónimo, s.f). Se definen como una especie especial de acuíferos, debido a su interacción con el mar, el cual representa un límite potencial constante, y uno de los procesos de contaminación más frecuentes es por la salinización de sus aguas, debido al avance del agua de mar tierra adentro, fenómeno que se conoce con el nombre de intrusión marina. En estos acuíferos costeros que vierten sus aguas directamente al mar, se crea un estado de equilibrio entre el flujo de agua dulce y el flujo de agua salada, que sólo sufre modificaciones naturales a muy largo plazo debidas a cambios climáticos o movimientos relativos de la tierra y el mar.

En Latinoamérica, numerosos estudios han sido realizados para comprobar el grado de contaminación presente en los acuíferos costeros, como es el caso del acuífero del Eje Bananero de Urabá, departamento de Antioquia, Colombia, donde Paredes, V et. al (2010), comprobaron que la salinización del mismo estaba relacionada con la interacción agua-roca y asociaron que esta se debía a antiguos procesos de trasgresión y regresión del nivel del mar en la zona. No obstante, el estudio solo recopila información hidrogeoquímica de los pozos de agua, y se recomienda la utilización de otras técnicas hidrogeológicas para complementar el estudio del mismo.

Uno de los principales factores que intervienen en la salinización de estos acuíferos, está relacionado con la sobre valoración del mismo, como se presenta en el caso del acuífero de Mar de plata en Argentina, donde se determinó que la explotación intensiva del agua subterránea produjo un

importante descenso del nivel piezométrico en el mismo y se produjo la intrusión de agua de mar en el acuífero. (Mérida, L. 2002).

Como algunos autores indican, la gestión sustentable de los acuíferos costeros requieren que la explotación del recurso sea hecho de manera racional y debe estar acorde con las variables hidrológicas de cada región, estableciendo la forma más eficaz de extraer los caudales óptimos mientras se satisfaga los diferentes usos que se le dan a este recurso para mantener diferentes actividades, como lo son el uso doméstico, agricultura, turismo e industria (op. cit).

El estudio de las relaciones agua dulce-agua salada es complejo, pues a las dificultades habituales en el estudio del movimiento del agua subterránea se suma la existencia de un agua de densidad diferente y miscible, presentándose además pequeñas diferencias de viscosidad y a veces de temperatura. En 1889, Badon Ghyben (en estudio de Custodio y Llamas, 1996, citado en estudio de Martínez, 2009), estableció la primera forma cuantitativa de estudio, pero hasta después de 1955, no se habían elaborado teorías en cuanto al movimiento de agua dulce y del agua salada así como la existencia de una zona de mezcla entre ambas y que permitan seguir el movimiento de esa interfaz en diversas condiciones de recarga, bombeo y variación del nivel del mar. Es por eso la importancia de conocer a detalle las condiciones reinantes del acuífero mediante un modelo conceptual muy elaborado.

2.1.2) MARCO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO DE MORROSQUILLO

A continuación se muestra el marco teórico relacionado a la información del modelo conceptual del acuífero de Morrosquillo, así como la explicación teórica de cómo se obtuvieron en esta investigación algunos datos

adicionales para este modelo, los cuales fueron usados finalmente para la modelación matemática.

Para ello, se usaron tres investigaciones recientes, que en conjunto se consideraron abarcan todas las características más relevantes del modelo conceptual actual. Entre estas investigaciones está el diagnóstico ambiental del acuífero de Morrosquillo, realizado por Gutiérrez en el 2005, cuyo estudio va desde la determinación de las condiciones de recarga del acuífero por medio de la elaboración de balances hídricos, estudios hidrogeoquímicos a algunos pozos del área, así como la aplicación de técnicas de vulnerabilidad como los son DRASTIC y GOD ante el problema de contaminación de intrusión salina.

Martínez en el 2009, presentó el modelo hidrogeoquímico de las aguas de la zona de estudio, y también se incluye en este resumen del modelo conceptual, el estudio isotópico elaborado por Herrera y Gutiérrez (2011), que tuvo como finalidad, obtener un conocimiento integral de los procesos que actúan en cada uno de los componentes del ciclo hidrológico de esta región, mediante el uso conjuntamente de información hidrogeológica, junto con la técnica de los isótopos estables ^{18}O y ^2H .

2.1.2.1) Clima

El clima en el golfo de Morrosquillo es típicamente tropical con influencia de los vientos alisios del Noreste, que predominan durante algunos meses del año determinando variaciones de humedad relativa y precipitaciones. Este clima es resultado de la ubicación sobre la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT). Las precipitaciones se presentan de Abril a Diciembre y el período seco es desde Diciembre hasta los comienzos de Abril. La temperatura promedio de la zona es de 28°C . Existe una estación pluviométrica, ubicada en el área urbana de Santiago de Tolú desde 1959, la

precipitación anual promedio es de 1.407 mm, siendo el mes más seco Febrero y el mes más lluvioso Octubre, con una precipitación del 20% del total anual, aproximadamente (Gutiérrez, 2005). En cuanto a la evaporación promedio, el valor más alto, 171 mm., corresponde obviamente al mes de Febrero. El clima es cálido, con un área de piso térmico de 35.750 ha, por tener temperatura mayor a 24° C, y localización de 0 a 1000 m.s.n.m.

2.1.2.2) Balance Hídrico

Una de los datos de mayor importancia en el estudio de un acuífero, es conocer la manera como se recarga por agua de lluvia. Aunque existen muchas técnicas para determinar esta característica, una de las más comunes es realizar un balance hídrico mediante el análisis de parámetros meteorológicos. Gutiérrez en el 2005, realizó algunos balances hídricos de la zona usando 19 estaciones climatológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), empleando las técnicas de Penman, el método de Thornthwaite, el de Turc, y método de Thiessen. Clasificó las zonas por cuencas, específicamente la cuenca hidrográfica continental costera del golfo de Morrosquillo y la cuenca hidrográfica continental, aferente al Arroyo Pechelín, y éste a su vez, aferente de la cuenca mar Caribe.

En la presente investigación se estudiaron estas mismas condiciones meteorológicas, de manera de conocer el balance hídrico en el área del acuífero y calcular la recarga neta presente en la zona por medio de agua de lluvia usando dos teorías distintas a las aplicadas por Gutiérrez en el 2005, y que permitieron el cálculo de un balance hídrico y la recarga del acuífero de acuerdo a los diferentes tipos de suelo de la zona, los cuales fueron de vital importancia para la realización de la modelación matemática.

2.1.2.2.1) Balance Hídrico por metodología Zamanillo

Para la determinación del balance hídrico, según la metodología de Zamanillo (2011), se empleó el método de Thornthwaite, donde al introducir datos de temperatura y precipitación proveniente de estaciones meteorológicas, y variar algunos datos de corrección, se puede obtener el balance hídrico para cada estación seleccionada, usando una hoja de Excel. A continuación se muestra los datos a introducir en el modelo y se explica cómo se obtuvieron los datos para el balance hídrico:

- **Temp:** La temperatura es el promedio de datos diarios leídos en las estaciones y recopilados por cada mes de cada año de registro en grados centígrados.

- **i:** Se refiere al índice de calor mensual calculado a partir de la fórmula

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

Donde, "t" es la temperatura media mensual (°C).

- **ETP:** es la evapotranspiración en milímetros, la cual en la fórmula de Thornthwaite, se calcula inicialmente como si el mes tuviera 30 días y cada día tuviera 12 horas de sol y 12 horas sin sol, mediante la siguiente fórmula:

$$ETP = 16 * (10 * t / l)^a$$

- **f:** El valor de factor de corrección "f" se refiere a la duración media de las horas de sol, expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una.

- **ETP corregido:** es el valor de ETP multiplicado por el factor “f” de corrección anterior.

- **P:** es la precipitación media anual obtenida de las estaciones meteorológicas en milímetros.

- **Var reserva:** es la variación de reservas de humedad en el suelo en milímetros, es decir los cambios de humedad del suelo que se operan, ya sea como aportes y almacenamiento (+), o extracción y pérdida (-) de agua del suelo.

- **Reserva:** Indica la capacidad del agua que existe en el suelo. El valor máximo que puede tener es R_{max} (mm). Una vez que se alcanzan los R_{max} , la reserva no varía, hasta que empiece a haber extracción (Variación de la reserva negativa).

Igualmente, otro parámetro que se debe tener en consideración para la determinación de este valor de humedad, es la profundidad de las raíces de los cultivos presentes en el área. Los valores de capacidad de campo y de punto de marchitez se muestran en la tabla 1 y la profundidad de las raíces en la tabla 2.

Tabla 1.-

Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos

Textura del Suelo	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP%	CC%	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenoso	2-6	6-12	1,55-1,80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1,40-1,60
Franco	8-12	18-26	1,35-1,50
Franco- arcilloso	11-15	23-31	1,30-1,40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1,25-1,35
Arcilloso	15-19	31-39	1,20-1,30

Fuente: Grassi, 1976 en Schosinsky, 2006.

Tabla 2.-

Profundidad de raíces de diferentes cultivos

Cultivo	Profundidad de Raíces (m)
Alfalfa(pastos)	1-2
Algodón	1-1,7
Banano	0,5-0,8
Caña de azúcar	1,20-2
Frijol	0,5-0,7
Cebolla	0,3-0,5
Zacate	0,3-0,5
Cítricos	1,20-2,0
Bosques	2,0-3,0

Fuente: Grassi, 1976 en Schosinsky, 2006.

La manera de constatar la reserva del mes se hace calculando los incrementos (P-ET) cuando estos son positivos. Así la reserva en el mes "i" (en función de la del mes anterior "i-1") son:

$$R_{i-1} + (P_i - ET_i) \text{ si } 0 < R_{i-1} + (P_i - ET_i) < R_{\text{máx}}$$

$$R_i = R_{\text{máx}} \text{ si } R_{i-1} + (P_i - ET_i) > R_{\text{máx}}$$

$$0 \text{ si } 0 > R_{i-1} + (P_i - ET_i)$$

Los valores de la reserva se acumulan mes a mes en el período húmedo, según los incrementos $PET > 0$, y disminuyen al llegar el período seco, decreciendo mes a mes según los valores mensuales $P-ET < 0$. Para ello es necesario conocer la reserva del mes anterior para comenzar el cálculo de la reserva, por eso, se asigna un valor hipotético a un mes y se realizan ciclos anuales de cálculo (aunque el cuadro del balance hídrico tenga un mes inicial y otro final) hasta que la hipótesis de la cual se partió se confirma al final del ciclo (Almorox, s.f).

- **ETR:** La ETR indica la lámina de agua que en efecto ha sido evaporada. Se calcula de la siguiente manera:

- a) Si la $P < e$ y hay reserva de agua disponible en el suelo para satisfacer toda la evapotranspiración

$$ETR = ETP.$$

- b) Si la $P < e$ y hay reserva disponible en el suelo pero no para satisfacer toda la evapotranspiración, entonces:

$$ETR = P + \text{Reserva (mes anterior)}$$

- c) Si la $P < e$ y no hay reserva de agua disponible, entonces:

$$ETR = P$$

- **Déficit:** o sequía, indica la cantidad de agua en mm que faltó para satisfacer toda la evaporación, por un agotamiento de las reservas del suelo, en ausencia de precipitaciones. Para efectos de riegos esta fila indica lo que se debe derivar para satisfacer las necesidades de los cultivos. Se calcula como:

$$\text{Déficit} = ETP - ETR$$

- **Excedentes:** Representa el agua que habiendo caído por precipitación queda como sobrante, luego de haber proporcionado la cantidad necesaria para la ETP y para completar la reserva en el suelo.

a) Cuando la variación de las reservas es 0:

$$\text{Excedente} = P - \text{ETP}_{\text{corr}}, \text{ para } P > e$$

b) Cuando la variación de las reservas no es 0:

$$\text{Excedente} = P - \text{ETP} - \text{Var. Reserva}$$

- **½ Excedente:** Se asume que el excedente se reparte en dos partes; una mitad va a formar parte de las aguas de escorrentía superficial, la otra mitad se infiltra para salir nuevamente a la superficie al mes siguiente y alimentar los cursos de agua y constituir a su vez parte de la escorrentía total.

- **1/2 Escorrentía del mes anterior:** Es la mitad de la escorrentía total del mes anterior.

$$1/2 \text{ Escorrentía m. ant.} = \text{Escorrentía total mes anterior} / 2$$

- **Escorrentía total:** Representa la cantidad de agua que escurre en la superficie y está formada, al mes, por:

$$\text{Escorrentía total} = 1/2 \text{ Excedente} + 1/2 \text{ Escorrentía}$$

Se inicia el cálculo en el primer mes que hay excedentes, después de un período seco. En este caso es el mes de Junio. Se supone que media escorrentía del mes anterior es 0.

- **Déficit Diario:** Se calcula mediante la siguiente fórmula:

DD=Déficit/No días del mes

En el caso de Q neto y bruto a derivar.

- **a:** se refiere al área a regar, este valor varía dependiendo de la zona sembrada en las zonas de influencia de cada estación.

- **Eficiencia de Riego:** Este valor está relacionado con los tipos de suelos, así como del tipo de cultivo de la zona .y el tipo de método de riego usado

2.1.2.2.2) Determinación de Recarga de Agua de Lluvia

La metodología de Schosinsky (2006), considera varias variables que influyen en la recarga de los acuíferos, tales como: la precipitación mensual, la retención pluvial, la capacidad de infiltración de los suelos y sus características, la cobertura vegetal, profundidad de raíces, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno.

Para ello, inicialmente se determina la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje, la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie, y por último, se realiza un balance hídrico, que permite estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero.

- **Fracción de lluvia interceptada por el follaje**

Toda las lluvias menores de 5 mm/ mensuales, no van a generar infiltración ya que se considera que al menos 5mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (en el estudio de Schosinsky & Losilla, 2000, citado en Schosinsky, 2006). Este considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12% (Butler, 1957) de la precipitación mensual, y en bosques muy

densos la consideró en un 20% (estudio de Linsley et al, 1958 citado en Schosinsky, 2006).

Para conocer este valor es necesario determinar el coeficiente de follaje (Cfo), que se refiere al porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno. Para el 12% de retención $Cfo = 0,12$. Para el 20% de retención $Cfo = 0,20$. Para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplica la siguiente ecuación:

Si P es menor o igual a 5 mm/mes, $Ret = P$.

Si el producto $(P)(Cfo)$ es mayor o igual de 5 mm/mes, $Ret = (P)(Cfo)$.

Si P es mayor de 5mm/mes y el producto $(P)(Cfo)$ menor de 5, $Ret = 5$.

Donde:

P = Precipitación mensual del mes [mm/mes].

Ret = Retención de lluvia en el follaje [mm/mes].

Cfo = Coeficiente de retención del follaje, para bosques muy densos $Cfo = 0,20$, otros $Cfo = 0,12$ [adimensional].

- **Infiltración**

Uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (K_{fc}), el cual puede ser calculado por la siguiente ecuación (estudio de Schosinsky & Losilla, 2000, citado en Schosinsky, 2006):

$$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$$

Donde:

K_{fc} [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo);

f_c [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

Para aplicar esta ecuación, el rango de f_c ha de encontrarse entre 16 y 1568 mm/día. Para valores de f_c menores a 16 mm/día, $K_{fc} = 0,0148f_c/16$. Para valores de f_c mayor a 1568 mm/día, $K_{fc} = 1$. Con las observaciones mencionadas, el cálculo del coeficiente de infiltración por textura del suelo, se representa en la siguiente ecuación:

Si f_c se encuentra entre 16 y 1568 mm/día $K_{fc} = 0,267\ln(f_c) - 0,000154f_c - 0,723$

Si f_c es menor a 16 mm/día $K_{fc} = 0,0148f_c/16$

Si f_c es mayor de 1568 mm/día $K_{fc} = 1$

Además del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (K_{fc}), también se toman en consideración la pendiente del terreno y la vegetación. Estos coeficientes, vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo (C_i), basado en la siguiente ecuación (estudio de ONU, 1972, citado en Schosinsky, 2006):

Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es mayor de 1, $C_i = 1$.

Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es menor o igual a 1, entonces

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc}.$$

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

K_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional].

K_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional].

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional].

Para el cálculo de K_p se usa la siguiente relación:

Tabla 3.-**Fracción que infiltra por efecto de pendiente (Kp)**

Pendiente	Kp
Muy plana (0,02%-0,06%)	0,30
Plana (0,3%-0,4%)	0,20
Algo plana (1%-2%)	0,15
Promedio (2%-7%)	0,10
Fuerte (mayor de 7%)	0,06

Fuente: Schosinsky (2006)

En el caso del cálculo de Kv se toma en consideración la siguiente relación:

Tabla 4.-**Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (Kv)**

Por cobertura vegetal	Kv
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75%	0,21

Fuente: Schosinsky (2006)

- **Cálculo de infiltración pluvial mensual**

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente (Pi) al suelo, está dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i)(P - \text{Ret})$$

Donde:

Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes].

Ci = Coeficiente de infiltración [adimensional]

P = Precipitación mensual en [mm/mes] (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en [mm/mes].

En ningún caso el coeficiente de infiltración (C_i) ha de ser mayor de 1, si así fuese, se le asignaría a C_i el valor de 1.

- **Escorrentía superficial**

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración. La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - P_i$$

Donde:

ESC = Escorrentía superficial en mm/mes.

P = Precipitación en mm/mes (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes.

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

En la tabla 2 se muestra la profundidad mencionada de raíces de algunas plantas. La forma natural de extracción de agua del suelo es mediante la transpiración de las plantas.

La máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado, es igual a la capacidad de campo, es entonces cuando la planta tiene la máxima capacidad de transpiración. La mínima humedad que puede tener un suelo es aproximadamente igual al punto de marchitez, pues con humedades menores la planta muere. De lo anterior se deduce que un suelo, no saturado, a profundidades mayores que la profundidad de raíces se encuentra a capacidad de campo.

- **Evapotranspiración**

Este parámetro de evapotranspiración potencial es calculado usando la siguiente ecuación:

$$ETPR = (HS - PM)(ET)/(CC-PM)$$

Donde:

ETPR [mm/día] = Evapotranspiración potencial real

HS [%] = Humedad del suelo

ET [mm/día] = Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo

CC [%] = Capacidad de campo

PM [%] = Punto de marchitez permanente

- **Recarga al acuífero**

Para esto, se usó la siguiente relación, que se refiere a tablas calculadas en laboratorio:

$$\% \text{ por volumen} = (\% \text{ por peso de suelo seco}) (\text{densidad aparente})$$

Posterior a esta transformación, se calcula el coeficiente de humedad (Ch) mediante la siguiente fórmula:

$$Ch = (\text{humedad de suelo} - \text{punto de marchitez}) / (\text{capacidad de campo} - \text{punto de marchitez})$$

También es necesario conocer la humedad inicial (HSi) a comienzo de un mes para esto, siendo necesario calcular el coeficiente de humedad, al final del mes, el cual sería (C1):

$$C1 = (HSi - PM + Pi) / (CC-PM)$$

Donde:

C1 = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

Hsi = Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en [mm].

PM = Punto de marchitez en [mm].

Pi = Precipitación que infiltra en [mm/mes].

CC = Capacidad de campo en [mm].

Si se considera que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad, al final del mes sería:

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC - PM)$$

$$ETR1 = (C1)(ETP)$$

Donde:

C2 = Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.

ETR1 = Evapotranspiración potencial real [mm/ mes], considera la humedad correspondiente al coeficiente C1. Calculada en el balance hídrico.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes]. Calculada en el balance hídrico.

El valor de C1 corresponde al coeficiente de humedad máximo, ya que considera la humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de C2, corresponde al coeficiente de humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad del suelo anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máximo, C1. Por lo tanto, el coeficiente C2 se aproxima al coeficiente de humedad al final del mes. Como la infiltración y la evapotranspiración ocurre durante el mes, se estima que el

coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2; o sea, $(C1+C2)/2$; esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado es:

$$ETPR \text{ (mm/mes)} = ((C1+C2)/2) \text{ ETP (12)}$$

Donde:

ETPR= Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes [mm/mes]

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes], calculada en el balance hídrico.

Ninguno de los coeficientes de humedad, C1 y C2, pueden ser superiores a 1, ni menores a 0. En caso que C1 o C2, sea mayor de 1, son igual a 1. Si C1 o C2 son negativos se tomó con valor de 0.

Para conocer la de humedad disponible (HD), es necesario saber que se trata de la humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar. La humedad disponible está dada por la siguiente ecuación:

$$HD \text{ (mm/mes)} = HSi + Pi - PM$$

Donde:

HD = Humedad disponible [mm/mes].

Hsi = Humedad de suelo inicial (al inicio del mes) [mm].

Pi = Precipitación que infiltra [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

Si la humedad disponible es menor que la ETPR de la ecuación, la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad, sino que evapotranspirará únicamente la humedad disponible, debido a que no hay suficiente humedad para evapotranspirar la cantidad de agua indicada en la ecuación. Sin embargo, si la humedad disponible (HD) es mayor que la cantidad de agua indicada en la ecuación anterior, la planta evapotranspira la cantidad expresada en dicha ecuación. Por lo tanto la evapotranspiración real se obtiene por:

$$\begin{aligned} \text{Si } ((C1+C2)/2)ETP \text{ es menor o igual a HD, } ETR \text{ (mm/mes)} &= ((C1+C2)/2)ETP \\ \text{Si } ((C1+C2)/2)ETP \text{ es mayor que HD, } ETR \text{ (mm/mes)} &= HD \end{aligned}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración [adimensional].

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1, [adimensional].

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/ mes].

HD = Humedad disponible [mm/mes]

Para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, humedad de suelo final (Hsf), la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\text{Si } (HD + PM - ETR) \text{ es menor que la capacidad de campo, } Hsf = HD + PM - ETR$$

$$\text{Si } (HD + PM - ETR) \text{ es mayor o igual que la capacidad de campo, } Hsf = CC$$

La HSf en ningún momento puede ser mayor a la CC.

Donde:

HSf = Humedad del suelo final (final de mes) [mm].

HD = Humedad disponible [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

ETR= Evapotranspiración real [mm/mes].

CC = Capacidad de campo [mm].

Además del cálculo de la ecuación para la humedad del suelo al final del mes, es necesario conocer la humedad de suelo al inicio del mes, o sea, humedad inicial (HSi). La humedad inicial de un mes dado es la siguiente:

HSi = Es igual a la humedad de suelo final del mes anterior (HSf de ecuación anterior)

HSi = Humedad del suelo inicial (inicio de mes) [mm].

HSf = Humedad del suelo final (final de mes) [mm].

- **Cálculo de recarga potencial al acuífero**

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, es la que recarga al acuífero, la que se calcula con la siguiente ecuación.

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR$$

Donde:

Rp = Recarga potencial mensual en mm/mes.

Pi = Precipitación que infiltra en mm/mes.

HSf = Humedad del suelo al final del mes en mm.

ETR = Evapotranspiración real en mm/mes.

2.1.2.3) Hidrografía

La cuenca total del Golfo de Morrosquillo tiene aproximadamente 2.100 Km². Uno de sus principales fuentes superficiales es el río Sinú que desemboca actualmente en la margen exterior suroccidental del Golfo, mantiene cauces menores que a través de los caños Sicará y Grande desembocan sobre la Bahía de Cispatá. Estos caños junto con la desembocadura principal del río constituyen el mayor aporte fluvial y sedimentario sobre el Golfo. (estudio de IGAC & ITC, 1999, citado en Gutiérrez, 2005).

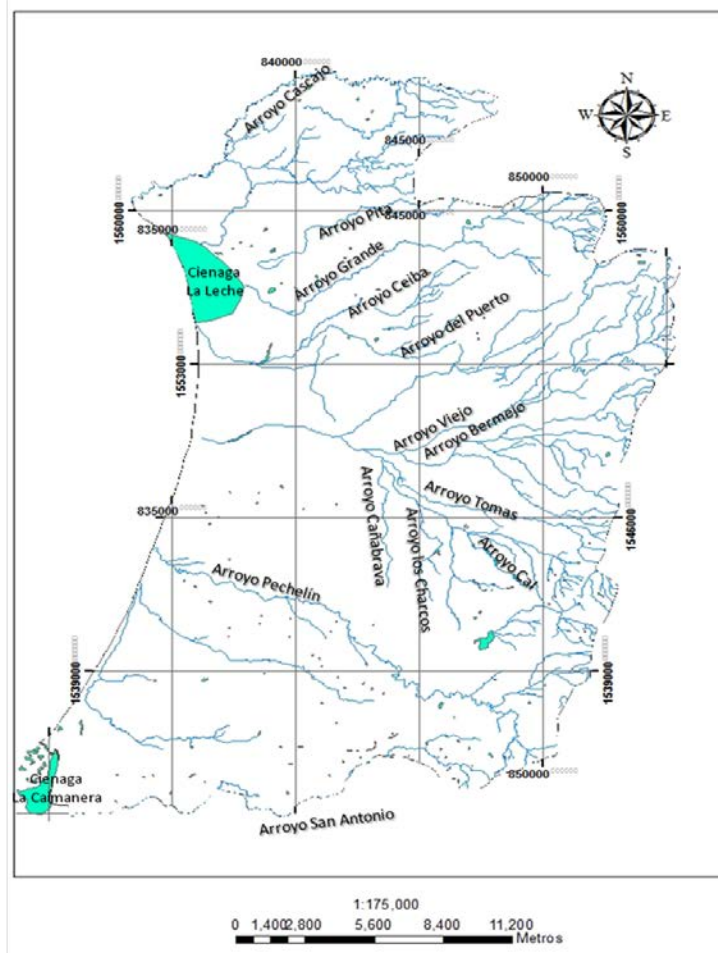


Figura 1.- Mapa hidrográfico golfo de Morrosquillo

Fuente: Ingeominas, 2002. CARSUCRE, 2012 (modificado)

Dentro del sistema hidrográfico del golfo, se destacan los arroyos cuyo flujo se da por la escorrentía en invierno, y que se secan durante el verano formando barras de arena en sus bocas por efecto del transporte sedimentario a lo largo de la costa, favoreciendo la formación de pantanos salinos e hipersalinizados; dentro de éstos sobresalen los arroyos la Perdiz, la Angarilla y Arroyo Verde, ubicados al sur del arroyo Pechelín, y los arroyos de Guainí, la Leche, Alegría, Pita, Tigre y Tumba Frayles, todos ellos ubicados desde el centro hacia el Norte del municipio de Santiago de Tolú. (Estudio de P.O.T. 2000, citado en Gutiérrez, 2005). En la figura 1 se puede observar algunos de los principales arroyos que alimentan la hidrografía de la zona del Morrosquillo.

2.1.2.4) Geología

El área de estudio forma parte de la región noroccidental de Colombia, la cual ha tenido una gran complejidad estructural y sedimentaria producto de la estrecha interrelación y evolución tectono-sedimentaria de la esquina noroccidental de Sudamérica (Gutiérrez, 2005).

Estructuralmente, la zona está conformada por el Cinturón fragmentado de San Jacinto, que se caracteriza por ser una faja replegada, donde predominan fallas inversas y de cabalgamiento longitudinales y paralelas a la actitud estructural, asociadas a pliegues apretados. Las unidades roca que afloran al oriente del área corresponden a rocas sedimentarias del Paleógeno (formaciones San Cayetano, Toluviejo y El Carmen). Sobre las rocas anteriores se encuentra discordantemente una cobertura de sedimentos de origen marino, fluvial y marino-aluvial.

La compactación y ambiente de las rocas aflorantes hacen que tengan baja permeabilidad primaria, con potencial hidrogeológico muy bajo. Las zonas con mayor potencial de aguas subterráneas se hallan en la llanura

costera del Golfo de Morrosquillo, conformada por sedimentos de origen marino-aluvial y se halla relacionado con la presencia de paleocauces de espesor y litología variable (op. cit).

Uno de los estudios previos presentes en la litología de la zona, es el realizado por HERRERA P. Y PUENTES C. en Unisucre (1997) citado en Gutiérrez (2005); donde se muestra la descripción detallada columnas litológicas generadas a partir de diseños de construcción de algunos pozos en los alrededores de Tolú. De manera resumida, los autores resaltan tres conjuntos litológicos predominantes. El primero de ellos, es el superior, el cual va hasta los 20 metros de profundidad, y está constituido por capas de arcillas limosas de color amarillo de hasta 9 metros de espesor intercalados con capas de arenas gruesas y gravas finas con clastos de chert, jaspe, cuarzo y conchas de hasta siete metros de espesor.

El conjunto litológico medio, subyace al conjunto superior, va hasta una profundidad máxima de 88 metros y está constituido por capas de limo de color café y arcillas grises de hasta 20 metros de espesor, intercalados con capas y lentes de arenas gruesas y gravas finas con clastos subredondeados de cuarzo, chert y jaspe, de hasta 11 metros de espesor.

El conjunto litológico inferior está constituido principalmente por arcillositas de color gris verdoso, correlacionadas con la Formación Carmen; lo conforman una secuencia de lodolitas gris oscuras, con intercalaciones ocasionales de capas finas a muy finas de areniscas y limolitas.

Entre otros autores están BARRERA O. Y URREGO L., los cuales generaron un mapa geológico del Departamento Sucre a escala 1: 250.000 (estudio de Ingeominas, 1997. Citado en Gutiérrez, 2005). En éste se muestra una formación geológica de depósitos marino-aluviales (Qma),

caracterizados por ser limos, arcillas y gravas en cauces y paleocauces, y muestran en las zonas adyacentes a la Ciénaga la Caimanera y a la Ciénaga la Leche depósitos de sustrato de manglar (Qmm), caracterizados por ser arcillas y limos blandos grises con fragmentos de conchas intercaladas con arenas arcillosas de grano fino color gris parduzco.

A mayor detalle, la explicación de la geología local de la zona de estudio se muestra en la figura 2, la cual corresponde a la litología presente.

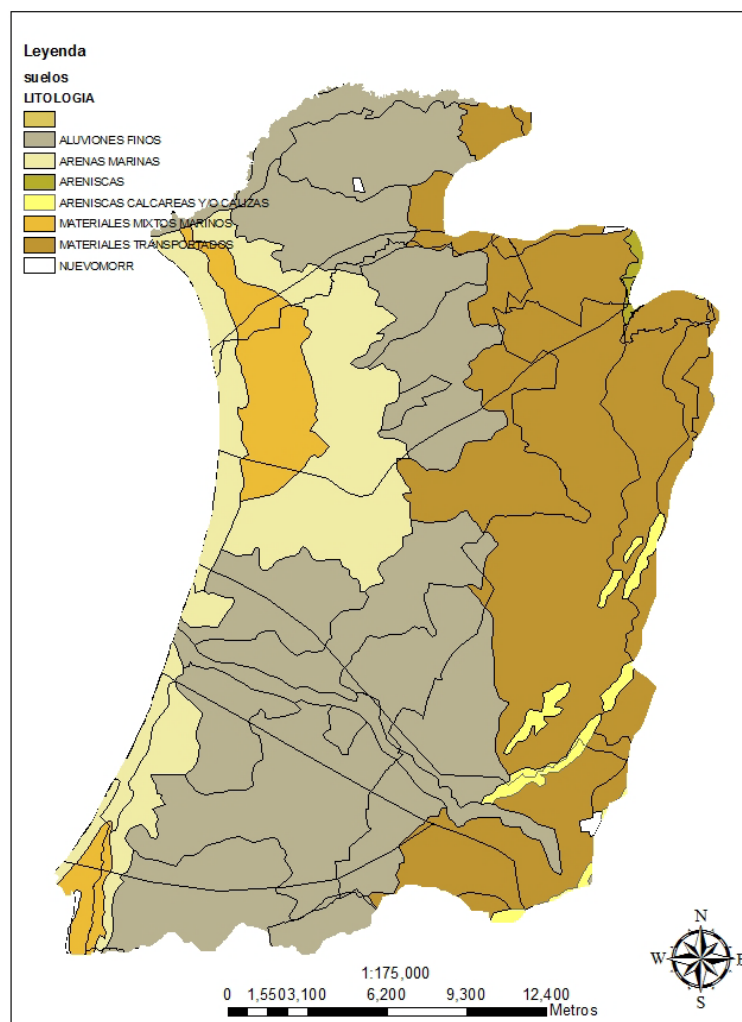


Figura 2.- Mapa geológico de la zona de Morrosquillo, Sucre-Colombia.

Fuente: CARSUCRE, 2011 (modificado).

En conjunto se trata de materiales cuaternarios recientes, depositados por la acción fluvial de las corrientes de agua presentes en la zona, las cuales ayudaron a diferenciar ambientes sedimentarios. Además, la zona costera está regida por procesos no solo de tipo fluvial, sino también se presentan ambientes marino costeros (playa y de manglar). La litología a detalle fue realizada a partir de registros de diseño de pozos aportados por CARSUCRE, generándose cortes geológicos necesarios para el modelo matemático.

2.1.2.5) Geomorfología

La topografía de la región es plana con pendientes entre 0 % y 3 %, la textura del suelo es arcillosa a limo - arcillosa. Solo hacia la zona de piedemonte se presentan mayores pendientes, donde se alcanzan los 40 m.s.n.m

La unidad geomorfológica predominante es la planicie aluvial costera, es una superficie plana a levemente inclinada y/u ondulada, con una extensión que llega a ser superior a los 10 km² cortada por drenajes poco profundos, la mayoría de los cuales son estacionales. No se observan procesos erosivos. Separándola de la costa se encuentran franjas angostas de manglar, algunas lagunas costeras, complejos de cordones litorales y antiguas barras litorales (estudio de Franco y otros, 1992. citado en Gutiérrez, 2005).

También en la zona costera se pueden conseguir pantanos de manglar, alcanza su máxima extensión hacia la Ciénaga La Caimanera; están distribuidos a lo largo de la línea de costa. En lugares en donde se ha producido la deforestación del mangle se han formado pantanos salobres.

Por acción de los ambientes costeros existen algunas lagunas costeras, y zonas de playas, las cuales alcanzan máximo 10 metros de ancho, y en ellas

se aprecian gemas discontinuas y de poca altura, que son rebasadas por mareas muy altas o durante tormentas.

Según el mapa geomorfológico de CARSUCRE (2011), también se presentan algunas barras y crestones, en donde afloran la formación geológica de tolú viejo. Son de poca altura y presentan alineación con la cadena montañosa de tolú viejo. Las demás relieves del mapa, coinciden con las expuestas anteriormente, pero con otra clasificación, sólo que la anterior es un poco más detallada (figura 3).

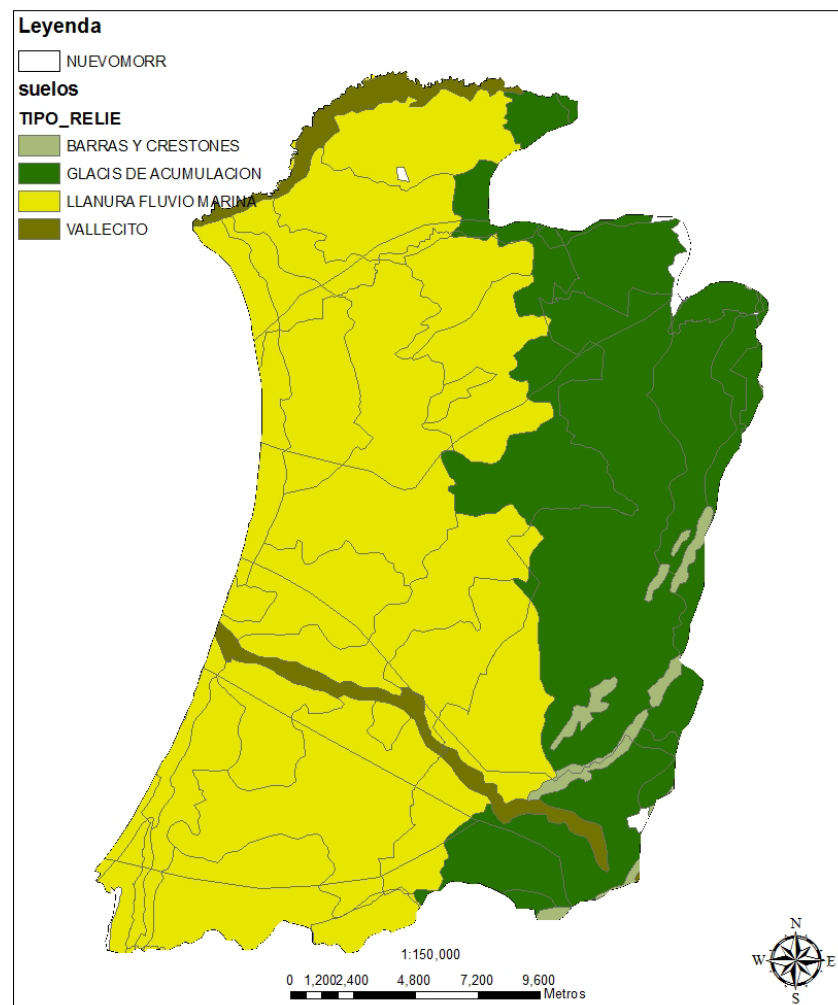


Figura 3. Geomorfología de la zona del Golfo de Morrosquillo

Fuente: CARSUCRE, 2011 (modificado)

2.1.2.6) Suelos

En el área de estudio, el suelo predominante, es la textura arcillosa a Franco-arcilloso (Gutiérrez, 2005). Se tratan de suelos pesados e impermeables y de escasa pendiente (<3%). Están conformados por el orden: Inceptisol, el cual ocupa la mayor parte de los municipios de Santiago de Tolú, Coveñas, San Antonio de Palmito y San Onofre, siendo los subgrupos Vertic Trpaquepts y Ultrapepts los predominantes. Presentan textura arcillosa y fertilidad baja, de régimen de humedad ústico y temperatura isohipertérmica.

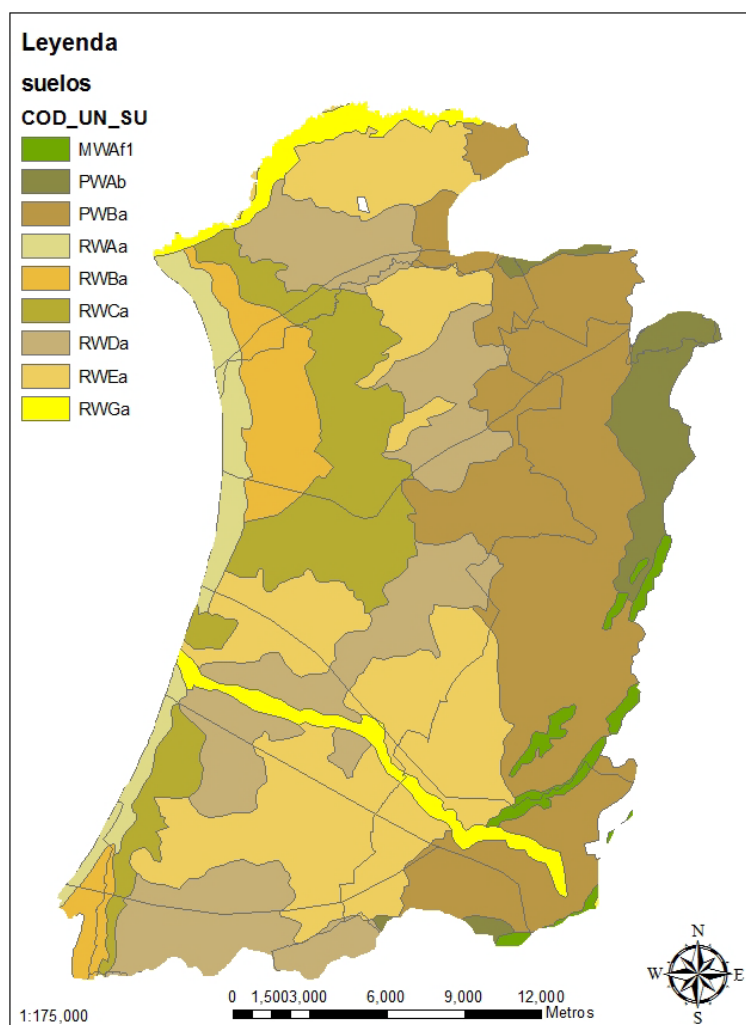


Figura 4.- Mapa de suelos de la zona de Morrosquillo, Sucre-Colombia.

Fuente: CARSUCRE, 2011 (modificado)

Según el mapa de suelo realizado en CARSUCRE (2011), los suelos varían de texturas finas a gruesas, acorde con la disposición de sedimentación en zonas de piedemonte y en ambientes marinos costeros. A partir de la clasificación de suelos de la figura 4, basado en el sistema taxonómico de la República de Colombia (Instituto geográfico Agustín Codazzi, 2009), los suelos en la zona de montaña son clasificados como Ustorthents, Haplustepts y afloramientos rocosos, bien drenados de texturas gruesas a medias (MWa).

En la zona de piedemonte, se presentan suelos generados por abanicos de terrazas (PWBa), con texturas moderadamente gruesas. Y también se presentan suelos generados por abanicos de explayamientos (PWa) de texturas gruesas a finas, ambos bien drenados, clasificados como Haplustepts, Haplustepts y Ustorthents y Ustipsamments.

En el caso de los suelos de planicie se tienen los RWAa, formados en terrazas subcrecientes de depósitos aluviales medios, con texturas medias a moderadamente gruesas, de tipo Haplustolls. Están los RWBa, que son suelos formados en depósitos finos aluviales, profundos y superficiales, y bien drenados, con texturas medias a finas. Son suelos clasificados como Haplusteps, Haplustepts, Endoaquepts. Los RWCa, son suelos formados en aluviones finos bien a moderadamente drenados, texturas finas a medias. Son suelos de tipo Saladic Natrustalfs y Haplustepts. Los RWDa son suelos de depósitos aluviales mezclados, bien drenados, con texturas finas y medias. Son suelos de tipo Ustifluvents, Haplustepst, Ustipsamments, y Endoaquerts. Los RWEa generados por terrazas antiguas de depósitos aluviales finos, bien a moderadamente drenados, texturas finas a moderadamente finas. Son suelos de tipo Typic Plinthustults, Chromic Haplusterts y Vertic Haplustepts. Y por último los RWGa, que son suelos de formados en planos de inundación con texturas medias a gruesas, pobre a

imperfectamente drenados. Son suelos de tipo Aerico Fluvaquents, Fluventic Haplustepts, Typic Psammaquents y Typic Ustipsamments.

2.1.2.7) Hidrogeología

Herrera y Puentes (estudio de UNISUCRE – 1997. citado en Gutiérrez, 2005) determinaron en la zona, que el acuífero de Morrosquillo era de naturaleza multicapa, presentando tres tipos de acuíferos. Un Acuífero A, denotado como un acuífero libre que se encuentra hasta los 15 metros de profundidad constituido de arena de playa, de finas a gruesas, y por gravas finas con clastos de Chert, jaspe, cuarzo y conchas calcáreas e indicaron que el agua de este acuífero es salobre.

Los autores también determinaron un acuífero B, el cual indicaron que es tipo semiconfinado, tiene un espesor de 38 metros y está constituido por arenas gruesas y gravas finas con clastos de Chert, cuarzo y jaspe. El agua es de calidad variable, se encuentran aguas duras con altos contenidos de calcio y valores tolerables de cloruros (50 - 150 ppm) en la parte oriental y central; en la franja costera la dureza sobrepasa las 150 ppm. Y por último, se explicó un acuífero C, que es de tipo confinado y se encuentra a profundidades entre 70 y 87 metros; la calidad del agua tiene características similares a las del acuífero B.

En el 2002 Ingeominas, realizó un proyecto de exploración y evaluación de las aguas subterráneas en toda la República de Colombia, incluyendo al Departamento Sucre, donde generaron un mapa hidrogeológico a escala 1:250.000 (figura 5). En este, identificaron a la unidad hidrogeológica Morrosquillo (Qma) como un acuífero discontinuo en extensión regional, multicapa conformado por arenas cuarzosas finas, gravas y guijarros con intercalaciones de arcillas, depositadas en ambientes fluviales de paleocauces y litoral con espesores variables entre 20 a 100 metros.

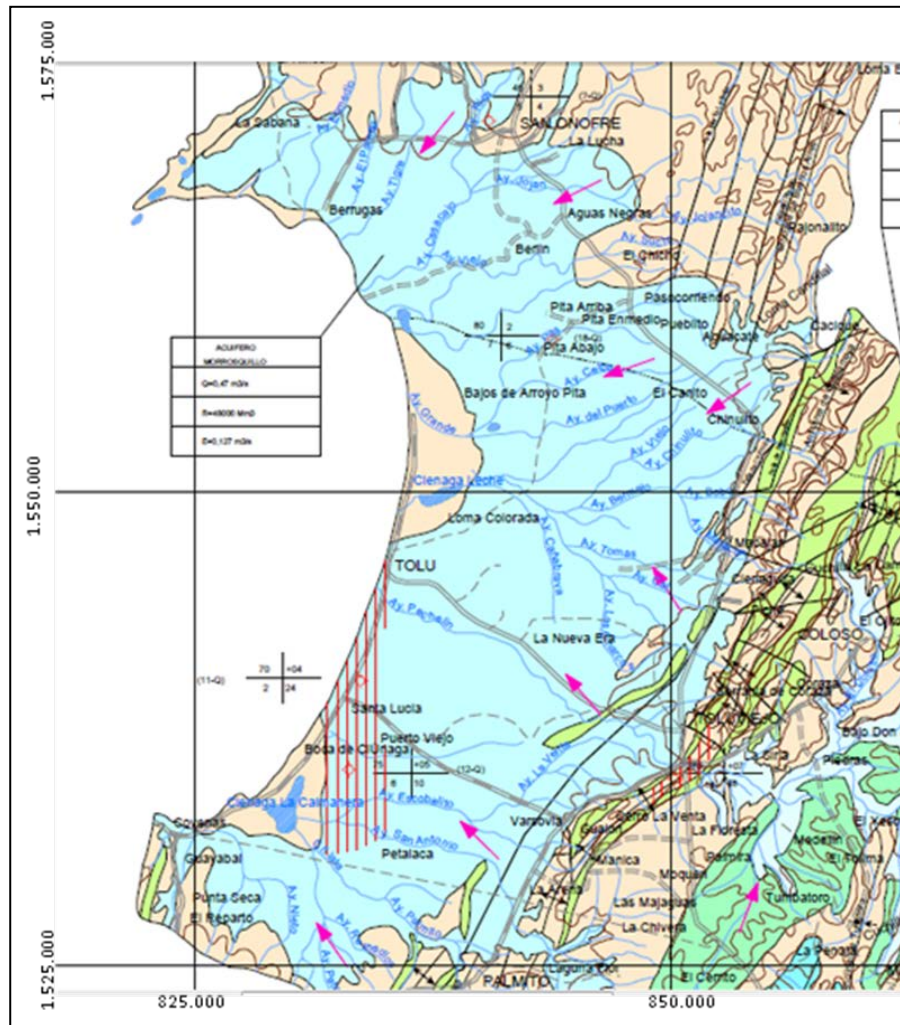


Figura 5.- Mapa Hidrogeológico acuífero de Morroquillo

Fuente: Ingeominas, 2002 (modificado)

Respecto a las características hidráulicas de estos acuíferos, Ingeominas (2002), determinó que el acuífero podría ser clasificado como de baja productividad con capacidades específicas de 0.05 a 1 l/s/m, con transmisividades de entre 80 y 110 m²/d, con coeficientes de almacenamiento del orden de 1×10^{-2} a 1×10^{-6} y conductividades hidráulica equivalente de 0.7 a 1 m/d. Gutiérrez en el 2005, realizó algunas pruebas de bombeo, de las cuales obtuvo valores de Conductividad Hidráulica (K) de

0.4×10^{-1} a 2.4×10^{-1} m/día, indicando que el acuífero está constituido en general por una mezcla de arenas y arcillas y le corresponde una conductividad hidráulica cualitativamente mala. La Transmisividad (T), tuvo valores del orden de 4 a $22 \text{ m}^2/\text{día}$. El coeficiente de almacenamiento (s), fue calculado en el orden de 3.2×10^{-4} a 5.7×10^{-5} , correspondiendo a acuífero confinado.

Desde el 2006, CARSUCRE ha realizado pruebas de bombeo, las cuales han ayudaron a determinar ciertos parámetros físicos de los materiales que conforman al acuífero usados en la modelación matemática de esta investigación. Estas pruebas se muestran a continuación en la tabla 5.

Tabla 5.-

Pruebas de bombeo realizadas en pozos del acuífero de Morrosquillo

codigo pozo	fecha prueba de bombeo	nivel estático	nivel dinámico	caudal	Método usado	Transmisividad	Conductividad Hidráulica (m/s)
36-IV-A-PP-04	4/24/2002	4.65	13.36	4.23	THEIS	48.3	3.45
37-III-D-PP-02	11/27/2007	0	0	0	THEIS-RECUPERACION	94.1	2.94
37-III-D-PP-03	4/12/2006	2.62	11.68	7.36	THEIS	89.8	22.4
37-III-D-PP-04	11/14/2006	2.71	14.6	7.27	THEIS	60.2	6.02
37-III-D-PP-05	9/11/2006	1.76	5.84	13.42	THEIS	411	45.6
37-III-D-PP-06	11/29/2006	3.76	9.35	6.56	THEIS	69.8	1.75
37-III-D-PP-07	11/30/2007	3	9	5	HANTUSH JACOB	57	6
37-III-D-PP-08	12/12/2006	2.72	12.7	6.64	THEIS	63.2	10.5
43-II-C-PP-133	-	0	5.8	2.48	THEIS	38.5	2.4
43-IV-A-PP-04	5/16/2005	0	27	18	CAUDAL CTE	202	1
43-IV-A-PP-160	2/8/2008	0.1	4.48	0.62	THEIS	13.4	4.45
43-IV-A-PP-203	10/4/2007	0	1	0	THEIS RECUPERACION	80	16

Fuente: CARSUCRE, 2011

Continuación Pruebas de Bombeo

codigo pozo	fecha prueba de bombeo	nivel estático	nivel dinámico	caudal	Método usado	Transmisividad	Conductividad Hidráulica (m/s)
43-IV-A-PP-247	8/22/2007	0.32	2.16	3.46	THEIS RECUPERACION	191	63.7
43-IV-A-PP-262	8/27/2007	0.07	1.49	1.22	THEIS RECUPERACION	0	63.7
43-IV-A-PP-269	4/15/2008	0.34	3.36	1.05	COOPER JACOB	48.8	3.49
43-IV-A-PP-368	1/13/2006	2.41	2.13	8.12	JACOB	225	22.5
43-IV-A-PP-376	7/16/2007	3.41	7.32	3.8	JACOB	81.7	0
43-IV-A-PP-72	8/19/2008	0	3.23	3	THEIS	59.8	2.21
44-I-D-PP-01	2/14/2002	6.86	13.15	8.04	COOPER JACOB	600	2.96
44-I-D-PP-02	3/4/2002	8.3	9.95	4.61	THEIS, JACOB, RECUPERACION	300	7.35
37-III-D-PP-09	3/3/2008	4.86	12.779	1.47	THEIS	7.35	0.368
36-IV-A-PA-01	-	2.41	2.13	8.12		2	0
37-III-D-PP-14	3/5/2008	3.08	5.1	1.6	THEIS-HANTUSH	5.4	1.16
44-I-D-PP-01	8/24/2007	7.65	13.93	5.77	THEIS	198	33
44-I-D-PP-01	8/24/2007	0	0	0	THEIS RECUPERACION	602	100
43-IV-A-PP-55	5/14/2007	0.29	44.44	3.44	THEIS	4.59	0.509
43-IV-A-PP-55	5/14/2007	0	0	3.44	COOPER-JACOB- RECUPERACION	3.79	0.421
37-III-D-PP-03	-	0	0	0	RECUPERACION	99.5	24.9
43-IV-A-PP-160	2/8/2008	0	0	0	THEIS RECUPERACION	12.6	4.19
43-II-C-PP-135	9/13/2007	0.4	0.998	3.38	HANTUSH	109	21.8
37-III-D-PP-09	3/3/2008	0	0	0	THEIS- RECUPERACION	7.35	1.76
37-III-D-PP-02	11/27/2007	1.7	10.51	10.08	THEIS	147	4.59
43-IV-A-PP-269	4/15/2008	0	0	0	THEIS- RECUPERACION	26.9	1.92
36-IV-A-PP-04	8/28/2008	3.03	12.05	4.87	THEIS	59.8	2.21
36-IV-A-PP-04	8/28/2008	0	0	0	THEIS- RECUPERACION	56.3	0
43-IV-A-PP-50	8/8/2007	0.2	3.25	1.18	THEIS	65.8	21.9
43-IV-A-PP-50	8/8/2007	0	0	0	THEIS	42.2	14.1
43-IV-A-PP-73	7/29/2008	0.191	1.36	1.66	THEIS	109	12.1
43-IV-A-PP-73	7/29/2008	0	0	0	THEIS- RECUPERACION	97.7	10.9
44-II-C-PA-06	1/2/2007	7.64	7.4	0.22	PAPADOPULUS COOPER	77.22	0
37-III-D-PP-14	3/5/2008	0	0	0	THEIS- RECUPERACION	178	8.46
43-IV-A-PP-206	9/10/2008	0	2.25	1.06	HANTUSH-COOPER- JACOB	161	53.6

Fuente: CARSUCRE, 2011

2.1.2.8) Recarga del acuífero de Morrosquillo. Hidrología Isotópica

La recarga a un acuífero puede darse por infiltración de excedentes de la precipitación, a partir de cuerpos superficiales o desde acuíferos lejanos debido a flujos regionales. Para el acuífero de Morrosquillo por su carácter de libre a multicapa deben combinarse con distinta magnitud varias de estas posibles fuentes de recarga.

Gutiérrez en el 2005, calculó mediante un balance hídrico una recarga proveniente de excedentes de la precipitación de 282 mm/año y según los resultados reportados en el mapa hidrogeológico de Sucre este valor corresponde a 370 mm/año, en este mismo documento se reporta un cálculo de las reservas equivalente a 10.080 Mm³.

Algunos autores asocian una posible infiltración de algunas de las fuentes superficiales hacia el acuífero de Morrosquillo (Gutiérrez 2005, e INGEOMINAS, 2002), aunque esta teoría aún no ha sido verificada por investigaciones hidrogeológicas.

También se ha hablado de una posible recarga por flujo lateral desde la formación Toluviejo en las estribaciones de los montes de María, y que pudiera ser el mayor aporte de recarga al acuífero.

Una de las pruebas de recarga lateral al acuífero, fue presentada en el 2011 por Herrera y Gutiérrez, donde por medio de un estudio de isótopos estables de ¹⁸O y ²H determinaron una posible conexión entre el acuífero de tolú viejo y el acuífero de Morrosquillo. Para ello, se usó la línea meteórica local de corozal ($\delta^2\text{H} = 8.3^{18}\text{O} + 8.3$), realizada en años anteriores para determinar la recarga del acuífero de Morroa, con la Organización Internacional de Energía Atómica "OIEA" (HERRERA et al., 2005 en CARSUCRE, 2010).

Este estudio permitió confirmar información de los modelos de circulación del viento en la zona, ya que los resultados isotópicos del agua de lluvia en época de sequía provienen del mar Caribe y en épocas de lluvia provienen del interior de Colombia. Isotópicamente las aguas superficiales presentaron relación con las aguas lluvias, y no con las aguas del acuífero (Herrera y Gutiérrez, 2010).

De los resultados isotópicos ^{18}O vs ^2H , se dedujo que la muestra de la Ciénaga la Caimanera está más enriquecida en ^{18}O vs ^2H que el agua de mar, debido a la fuerte evaporación a la que está sometida este cuerpo de agua, y todo indicó que se presenta relación aparente entre esta humedad y las aguas del acuífero. En general, los isótopos estables del acuífero tienen una variabilidad isotópica similar a los valores encontrados en los manantiales ubicados en los Montes de María, corroborando que la principal recarga del acuífero Morrosquillo se presenta en esta zona (op. cit).

2.1.2.9) Infraestructura

Actualmente existe un sistema de acueducto de la zona urbana en el área de Santiago de Tolú y parte de Coveñas, los cuales se abastecen de pozos tanto superficiales como profundos con un bombeo continuo para abastecer las necesidades del recurso en esta área densamente poblada.

Además del sistema de acueductos, el acuífero cuenta con al menos 900 pozos legalizados en toda el área, de los cuales la mayoría de los pozos profundos extraen aguas provenientes de los tres niveles permeables del acuífero. Estos son utilizados para surtir la demanda de la comunidad en general, como se muestra en la tabla 6, y también se muestra la cantidad de agua extraída por tipo de consumo. En el estudio elaborado por Gutiérrez en el 2005, se hizo un cálculo de las extracciones que se producían en ese

momento en la zona del acuífero, concluyéndose que la demanda presentada estaba en el orden de los 6.426.782 m³/año.

Tabla 6.-

Consumo de agua en el golfo de Morrosquillo

Tipo consumo	l/s
consumo humano privado	286
consumo humano acueducto	270
Pecuario	146.6
Agrícola	97
Recreativo	267.34
Industrial	45.3
Total	1112.24

Fuente: CARSUCRE, 2012

2.1.2.10) Hidrogeoquímica

Este quizás sea una de las características más estudiadas y actualizadas del acuífero de Morrosquillo y ha ayudado a entender muchos de los comportamientos hidrogeológicos reinantes en estas aguas. Uno de los primeros estudios realizados para entender la química de las aguas fue elaborado por Gutiérrez en el 2005, donde indicó, que el agua freática era salobre o se había tornado salobre con los años, las tres capas son aguas duras, y que para ese momento ya había evidencia clara de la acción salinizadora de las aguas subterráneas. Según los resultados, las aguas que fueron clasificadas anteriormente como bicarbonatadas cálcicas o sódicas se habían tornado en bicarbonatadas cloruradas o en cloruradas, indicando la presencia de agua salada. Además, de los resultados obtenidos, las relaciones $rCl/rHCO_3$, rMg/rCa y rSO_4/rCl aumentaron en sus valores, avanzando hacia los estándares del agua salada marina. Para el autor, el agua desde el 2005 no califica como potable, debido al proceso de salinización por intrusión marina que está en desarrollo desde hace más de 30 años en el acuífero Golfo de Morrosquillo.

En el 2009, Martínez realizó el modelo hidrogeoquímico de las aguas del golfo de Morrosquillo, mediante dos campañas de muestreo (tabla 7). A partir de los diagramas de Piper y los diagramas de Stiff se logró caracterizar las facies de cada una de las secciones de flujo y por medio de los diagramas de Schoeller se pudo observar la variación iónica a lo largo de las líneas de flujo. Mediante este modelo se determinaron varios grupos de aguas. La primera facies eran aguas bicarbonatadas cálcicas a bicarbonatadas mixtas. La segunda facies se catalogó como mixta, la tercera como facies bicarbonatada sódica y por último una facies cloruradas sódicas. Esta última presentó la evidencia de una posible intrusión salina.

La evolución química de estas aguas se da principalmente debido a procesos iónicos de disolución de calcita y yeso y en menor proporción al aporte de iones provenientes de la halita y feldespatos. El proceso de intrusión salina no es el proceso dominante en la evolución química de las aguas, pero si se afirmó que es posible que afecte a la calidad de las aguas. Por ser un acuífero multicapa se evidenció una intrusión diferencial, indicando que el avance de la cuña se ha dado mayormente en la capa superior del acuífero. Además, el autor indicó que existen flujos locales y flujos regionales que alimentan el acuífero de Morrosquillo (op. cit).

Esta información pudo ser verificada en el 2011, donde Herrera y Gutiérrez realizaron un estudio hidroquímico isotópico de las aguas de la zona, e indicaron la presencia de tres tipos de agua: bicarbonatada cálcica (zonas de recarga), bicarbonatada sódica (evolución hidroquímica natural de las aguas subterráneas) y clorurada sódica (procesos localizados de intrusión marina). También se muestra en la tabla 8 el muestreo hidrogeoquímico de monitoreo realizado por CARSUCRE en el 2011.

Tabla 7.-

Campaña Hidroquímica (2008-2009)

CODIGO	x	y	pH	Eh	conductividad	T	STD	Na	K	Ca	Mg	Fe	Cl	HCO3	CO3	NO3	SO4	SiO2
GW-101	844800	1565416	6.78	110	947	28.30	648.00	115.00	0.83	58.90	44.90	0.18	89.20	406.00	0.00	0.75	124.00	23.30
GW-102	843233	1561966	6.72	140	1045	29.20	782.00	125.00	1.94	82.80	62.70	0.06	173.00	510.00	0.00	0.75	121.00	17.00
GW-103	838189	1561077	7.49	-0.26	970	29.90	702.00	262.00	3.63	21.20	11.10	0.09	77.30	622.00	0.00	0.75	13.80	9.00
GW-201	850234	1558624	6.82	212	663	29.50	484.00	60.20	0.16	90.40	22.00	0.06	20.00	451.00	0.00	0.75	33.90	17.90
GW-202	843351	1557802	7.34	90	1066	31.80	816.00	228.00	0.98	46.90	31.20	0.17	87.80	612.00	0.00	0.75	87.40	22.60
GW-203	835974	1554658	7.25	-	1923	29.10	1044.00	337.00	5.98	47.50	24.50	0.03	239.00	655.00	0.00	0.75	76.80	14.70
GW-301	851219	1556333	6.26	187	356	29.20	292.00	14.90	0.58	61.10	10.20	0.07	9.53	248.00	0.00	0.75	12.80	20.50
GW-302	842996	1552382	7.05	-	1071	30.40	784.00	217.00	0.38	75.40	46.50	0.03	41.00	729.00	0.00	0.75	75.50	17.60
GW-303	840233	1551904	6.66	180	1116	29.20	804.00	212.00	1.00	60.50	37.90	0.03	102.00	593.00	0.00	0.75	81.40	17.20
GW-401	850958	1547678	7.01	-	681	28.80	406.00	47.40	0.25	57.90	30.50	0.03	31.20	307.00	0.00	2.55	52.60	19.30
GW-402	845609	1545554	7	-	2250	29.60	1400.00	197.00	1.90	196.00	60.00	0.03	200.00	511.00	0.00	0.75	239.00	21.10
GW-403	841438	1546399	7	-	1126	29.50	760.00	102.00	2.24	95.60	27.30	0.03	78.80	526.00	0.00	0.75	51.80	22.70
GW-404	836106	1547160	7.32	-	3680	30.90	2168.00	838.00	23.20	25.40	21.60	0.03	492.00	864.00	0.00	1.73	377.00	18.90
GW-405	836100	1547153	7.24	-	1903	30.50	1174.00	264.00	3.64	112.00	39.00	0.03	183.00	456.00	0.00	0.75	300.00	19.00
GW-501	845793	1538553	7.42	-	963	28.90	568.00	87.50	6.91	99.30	18.50	0.03	52.80	401.00	0.00	0.75	93.80	15.30
GW-502	839022	1540115	7.36	-	1044	29.20	598.00	61.30	4.53	125.00	23.40	0.03	76.80	478.00	0.00	0.75	48.20	23.00
GW-503	833277	1541477	7.17	-	776	28.70	446.00	59.70	5.80	81.20	17.60	0.03	26.00	372.00	0.00	0.75	56.40	24.00
GW-504	833292	1541476	7.36	-	1109	28.20	698.00	86.80	2.08	113.00	29.50	0.03	59.00	531.00	0.00	0.75	77.90	21.80
GW-601	840075	1530486	8.87	-	2040	30.50	1630.00	150.00	11.40	269.00	11.50	0.03	350.00	124.00	7.92	0.75	466.00	9.77
GW-602	833877	1531787	6.91	-	1176	29.40	704.00	119.00	3.17	106.00	24.30	0.03	90.10	496.00	0.00	0.75	78.70	24.00
GW-603	828733	1534551	6.75	196	814	31.50	596.00	64.70	3.83	77.50	14.50	0.03	60.80	216.00	0.00	0.75	70.60	24.00
GW-700	841120	1550349	6.9	196	979	28.60	732.00	205.00	2.54	43.60	15.70	0.07	74.20	458.00	15.70	0.75	92.70	22.20
Man-01	855311	1543956	7.14	-	430	28.70	346.00	8.99	0.64	103.00	2.63	0.03	19.30	304.00	0.00	2.03	9.93	5.85
SUP-11	851842	1555994	7.3	203	619	30.70	506.00	35.00	4.26	85.80	23.60	0.08	15.10	271.00	0.00	0.75	183.00	10.50
SUP-12	841677	1549703	6.9	-	260	28.60	200.00	16.60	4.45	21.00	6.93	0.43	14.80	113.00	0.00	0.75	1.50	9.50
SUP-21	845002	1537985	7.52	105	1035	27.20	790.00	104.00	7.78	116.00	26.70	0.09	113.00	294.00	0.00	0.75	197.00	9.99
SUP-22	839403	1542385	8.04	-	902	27.60	542.00	61.80	9.79	87.60	19.30	0.27	74.80	235.00	0.00	0.75	156.00	10.20
mar	835620	1549826	8.56	124	44200	29.30	31666.00	11391.00	342.00	373.00	1099.00	0.03	17240.00	126.00	0.00	ND	2276.00	0.00

Fuente: Martinez (2009)

Tabla 8.-

Muestreo Hidroquímico 2011

No. Muestra CARSUCRE	x	y	Z	UBICACIÓN	muestra	PROFUNDIDAD	OBSERVACIONES	pH	Cond	T(WA)	Alcalinidad (<=200)	Ca	Mg	K	Na	Fe	HCO3	CO3	Cl	NO3	SO4
M1	855204	1543973	295	ROCA MADRE	44-II-C-MA-11	superficial	MANANTIAL	7.37	539.0	26.4	258.0	110.0	2.6	0.9	9.9	0.1	315.00	0.00	14.30	6.98	7.16
M2	854205	1543993	152	FINCA LA VICTORIA	44-II-C-MA-12	superficial	MANANTIAL	7.40	518.0	26.3	236.0	100.0	3.3	0.9	10.6	0.0	288.00	0.00	16.40	6.00	14.90
M3	850966	1547678	36	PARCELACION HAMBRUNA	44-II-C-PP-04		ZONA DE RECARGA	7.24	566.0	30.1	237.0	47.6	22.7	1.7	38.2	0.0	289.00	0.00	1.50	7.50	33.40
M4	851882	1538961	-	MANANTIAL SALOMON FERIS		superficial	MANANTIAL	7.14	820.0	27.4	289.0	132.0	10.3	3.0	28.3	0.1	352.00	0.00	64.00	8.01	45.10
M5	844945	1532147	97	ELOJITO	44-III-B-MA-06	superficial	MANANTIAL	7.10	950.0	27.7	346.0	177.0	8.8	1.5	36.4	0.0	422.00	0.00	71.30	9.04	53.10
M6	845454	1532065	161	MINA COMUN TROPICAL	44-III-B-MA-03	superficial	MANANTIAL	6.94	1006.0	26.9	347.0	170.0	12.6	2.0	30.8	0.1	423.00	0.00	71.80	9.40	83.00
M7	838348	1531974	16	HACIENDA VENECIA	44-III-B-PP-42			7.52	895.0	30.3	369.0	102.0	21.7	2.4	77.3	0.3	450.00	0.00	52.10	5.20	48.20
M8	832713	1538883	8	PZ 4 MONTECRISTO	43-IV-A-PZ-04			7.49	753.0	28.2	309.0	69.6	16.8	2.9	73.2	0.0	363.00	6.96	29.50	5.61	62.00
M9	832718	1538884	8	PZ06 MONTECRISTO	43-IV-A-PZ-06			7.42	923.0	30.1	358.0	62.0	21.9	2.3	162.0	0.2	437.00	0.00	60.00	5.99	57.30
M10	833299	1541472	2	PZ 01 SOCIEDAD PORTUARIA	43-II-C-PZ-01		ZONA DE DESCARGA	7.33	736.0	29.0	305.0	72.2	16.4	3.3	82.9	0.1	372.00	0.00	28.00	3.89	60.50
M11	833293	1541476	2	PZ03 SOCIEDAD PORTUARIA	43-II-C-PZ-03		ZONA DE DESCARGA	7.22	1065.0	29.4	437.0	110.0	30.2	14.8	136.0	0.1	533.00	0.00	55.00	4.58	81.40
M12	835974	1554658	0	FELIPE VILLEGAS	44-I-B-PP-31		ZONA DE DESCARGA	7.33	2020.0	30.3	513.0	43.6	25.7	22.1	438.0	0.1	626.00	0.00	318.00	8.50	72.30
M13	836101	1547145	9	PZ01 ANTIGUO BASURERO	44-I-D-PZ-01			6.80	1757.0	28.9	377.0	110.0	38.7	3.7	236.0	0.1	460.00	0.00	142.00	4.79	352.00
M14	835360	1548141	1	CASA IBIS	44-I-D-PP-165		ZONA DE DESCARGA	7.10	6050.0	30.2	727.0	154.0	76.0	6.9	1414.0	0.3	887.00	0.00	1399.00	11.30	384.00
M15	836102	1547152	3	PZ02 ANTIGUO BASURERO	44-I-D-PZ-02	acuitardo		7.00	5230.0	29.3	369.0	301.0	74.8	8.6	865.0	1.0	450.00	0.00	1315.00	10.10	385.00
M16	836102	1547157	9	PZ03 ANTIGUO BASURERO	44-I-D-PZ-03	acuíf libre		6.90	3670.0	29.5	704.0	21.3	21.7	15.4	826.0	0.1	859.00	0.00	535.00	9.99	405.00
M17	841006	1542477	52	PZ11 LA CORONA	44-I-D-PZ-11			6.90	1154.0	28.3	375.0	192.0	27.6	2.2	66.4	0.1	458.00	0.00	116.00	4.80	71.40
M18	841003	1542478	21	PZ10 LACORONA	44-I-D-PZ-10			7.00	1162.0	28.4	417.0	157.0	29.2	1.3	69.5	0.1	510.00	0.00	87.80	4.78	99.20
M19	851219	1556336	19	HDA PALENQUILLO	44-II-A-PP-01		ZONA DE RECARGA	6.90	381.0	27.7	187.0	56.2	9.3	0.6	11.7	0.0	228.00	0.00	7.87	2.64	8.75
M20	848019	1558946	19	HDA MUNDO NUEVO	44-I-B-PP-78		ZONA DE RECARGA	7.50	770.0	29.3	376.0	126.0	21.0	0.3	55.2	0.0	459.00	0.00	22.30	4.33	32.00
M21	842874	1562272	20	FINCA LA VICTORIA	37-III-D-PP-18		ZONA DE RECARGA	7.20	1242.0	29.4	431.0	69.3	56.5	1.1	98.5	0.0	526.00	0.00	96.00	3.98	1.21
M22	832794	1540335	1	MANGLAR DE LAS GARZAS	43-II-C-PP-135		ZONA DE DESCARGA	7.80	890.0	28.0	369.0	137.0	22.2	2.4	63.0	0.0	450.00	0.00	52.80	4.44	51.90
M23	831092	1537521	0	VICTORIA REAL	43-IV-A-PP-72		ZONA DE DESCARGA	7.50	801.0	28.8	306.0	67.5	16.0	2.5	84.1	0.0	373.00	0.00	38.90	3.86	75.10
M24	828897	1534786	1	VERGARALANDIA	43-IV-APP-204		ZONA DE DESCARGA	7.60	1757.0	29.7	370.0	89.1	27.4	2.1	247.0	0.0	451.00	0.00	300.00	5.29	102.00
M25	839022	1540115	3	VILLA LUCY	44-I-D-PP-02			7.10	977.0	30.0	382.0	149.0	23.1	3.3	50.8	0.0	466.00	0.00	69.30	5.00	48.20
M26	839390	1542391	-	ARROYO PECHILIN	VIA A SANTA LUCIA	superficial		7.70	590.0	29.5	155.0	57.6	14.8	8.3	37.4	0.3	189.00	0.00	41.40	3.66	146.00
M27	828730	1534466	0	PUNTA AZUL	43-IV-A-PP-376		ZONA DE DESCARGA	7.30	958.0	30.7	347.0	76.0	15.0	2.6	147.0	0.1	423.00	0.00	61.70	4.32	76.80
M28	838625	1532660	38	HDA EL DELIRIO	44-III-B-PP-39			8.00	3460.0	29.3	269.0	447.0	112.0	8.6	252.0	0.7	328.00	0.00	658.00	5.34	643.00
M29	840132	1552213	5	HDA PROVIDENCIA	44-I-B-PP-53		ZONA DE DESCARGA	7.90	1299.0	28.8	489.0	59.9	30.0	1.1	196.0	0.0	597.00	0.00	104.00	4.46	81.20
M30	841003	1542470	21	PZ09 LA CORONA	44-I-D-PZ-09			7.60	791.0	28.9	327.0	95.4	17.6	2.7	45.7	0.0	399.00	0.00	38.90	3.65	49.60
M31	845533	1538976	43	Fca El Limonar	44-III-B-PP-05		ZONA DE RECARGA	7.80	895.0	29.1	353.0	113.0	19.0	2.3	67.1	0.0	431.00	0.00	16.90	3.09	109.00
M32	845615	1545552	21	FCA LA PRADERA	44-I-D-PP-152			7.10	2230.0	30.0	416.0	192.0	58.6	2.7	188.0	0.0	508.00	0.00	372.00	4.58	232.00
Agua Mar								8.34	44200.0	29.3	103.0	373.0	1099.0	342.0	11391.0	0.0	126.00	0.00	17240.00	ND	2276.00

Fuente: CARSUCRE, 2011

- **Determinación de tipo de intercambio iónico. reacción química de la interfaz**

Este método es posible si se conoce la concentración de un componente conservativo, en este caso se refiere a los cloruros de las aguas presentes (Cl) en las dos (o más) aguas extremo que se están mezclando y también en cada una de las aguas mezcla. Es decir, las aguas consideradas como dulces (tierra adentro en el acuífero), aguas mezclas (zona de la costa), y por último el agua de mar (Manzano, 2011).

Para todas las aguas mezcla es necesario realizar el siguiente balance de masas:

$$C_{lm} = xC_{ls} + (1-x)C_{ld}$$

Donde x sería el porcentaje de agua salada, y 1-x sería el agua dulce de las aguas mezclas. Para calcular x y 1-x se empleó la siguiente ecuación:

$$x = \frac{Cl_m - Cl_s}{Cl_s + Cl_d} 100$$

Donde:

Cl: concentración de cloruro en las distintas aguas (mg/l)

m: agua mezcla

d: agua dulce

s: agua salada (de mar)

x = % de agua de mar en el agua mezcla

(1-x) = % de agua dulce en el agua mezcla

Una vez obtenido los porcentajes de mezcla de agua dulce y salada, se aplicó el balance de agua para cada agua mezcla usando la relación de calcio (Ca) y Sodio (Na):

$$Cam = xCas + (1 - x)Cad$$

Donde:

Cam: Calcio del agua mezcla (mg/l)

Cas: Calcio del agua de mar (mg/l)

Cad: Calcio del agua dulce (mg/l)

x = % de agua de mar en el agua mezcla

(1-x) = % de agua dulce en el agua mezcla

El valor obtenido de esta ecuación fue comparado con el valor de calcio calculado en laboratorio en cada muestra, la cual fue considerada como calcio real. La misma relación se realizó para el sodio (Na), mediante la siguiente fórmula:

$$Nam = xNas + (1 - x)Nad$$

Donde:

Nam: Sodio del agua mezcla (mg/l)

Nas: Sodio del agua de mar(mg/l)

Nad: Sodio del agua dulce (mg/l)

El valor obtenido de esta ecuación fue comparado con el valor de sodio calculado en laboratorio en cada muestra, la cual fue considerada como sodio real.

Una vez obtenido el valor de sodio y calcio mezcla, estos se compararon con los datos de calcio y sodio obtenidos del muestreo en laboratorio,

haciéndose así la variación de calcio (ΔCa), es decir se obtiene la diferencia entre el valor de calcio real y el calcio teórico. Si, la diferencia es negativa, es indicativo de una disminución de calcio, y al dividir este valor entre el peso atómico del calcio se obtiene la variación de calcio equivalente. Se hace lo mismo para el sodio (ΔNa).

La diferencia sea positiva o negativa es indicativa de dos tipos de intercambio iónico: ablandamiento o endurecimiento, ayudando así a descartar aguas que pudieran estar salinizadas, pero que no son verdaderamente aguas relacionadas a la mezcla de agua de mar con agua dulce, sino se trata de aguas fósiles, y para el caso de este estudio, se necesita conocer cuáles de estas aguas mezclas son verdaderamente indicadoras del avance de la cuña salina producto de la extracción de agua dulce.

Sí la variación de calcio termina siendo menor que la variación de sodio, indica que se está produciendo un ablandamiento, es decir, el calcio está presentando un intercambio iónico a sodio, demostrando así, que se trataría de un agua fósil. Ahora bien, si ocurre lo contrario, se produce un endurecimiento, lo que indica que el sodio está intercambiándose a calcio, y se estaría produciendo el avance de la cuña salina tierra adentro.

2.1.2.11) Diagnostico ambiental de impactos sobre aguas subterráneas

Para el diagnóstico ambiental de las aguas del golfo, Gutiérrez (2005), realizó una línea base, basado en el Decreto No.1.180 de 10 de mayo de 2003, del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Para esto, el autor usó algunas técnicas que ayudan en la determinación de la vulnerabilidad del acuífero, y a su vez, permitieron evaluar la posible contaminación del agua subterránea. Una fue DRASTIC, desarrollada en los Estados Unidos (estudio de Canter, 1998. Citado en Gutiérrez, 2005). Otra

importante es la metodología GOD, en el contexto de USEPA; desarrollada en América Latina y el Caribe por CEPIS como D.I.O.S siendo la técnica GOD modificada, al incluir la valoración de la recarga neta .

De los índices Drastic de Vulnerabilidad de las tres capas acuíferas (A, B y C) se determinó que la contaminación del acuífero tiene su mayor potencial en la capa superficial; la vulnerabilidad es de grado alta a moderadamente alta, de arriba abajo. Al analizar los cálculos de éste resultado, se observa que los factores Topografía y el tipo de medio acuífero son los que propician mayormente el carácter vulnerable en grado alto del acuífero. Esto significa que las características naturales del aluvión fluvio-marino, como son la geomorfología (una llanura de pendiente muy suave hacia la línea de costa) y el tipo de rocas sedimentarias en explotación dan lugar a un mayor tiempo de contacto del agua dulce del embalse subterráneo con el agua contaminante infiltrada, parte de la cual percola como recarga neta.

El análisis de los resultados de vulnerabilidad indicó que el acuífero golfo de Morrosquillo reunía las condiciones para ser intrusionado por el mar, periódicamente, y su tendencia actual es la salinización total de sus aguas, y perdería de modo irreversible la calidad de fuente de abastecimiento de agua dulce aceptable para el consumo humano, proceso que se ha venido produciendo desde hace 45 años.

En cuanto a la posición de la interfaz, al considerar que el techo del basamento impermeable, de acuerdo con las profundidades de explotación actuales, se encuentran a 84.0 metros bajo el nivel del mar, un análisis en donde se asuma ésta cota como la posición de esa superficie de contacto agua dulce –agua salada, requiere que exista una columna media de agua dulce de valor $h_d = +84.0/40 = +2.10$ metros sobre el nivel del mar , evento que sería factible solamente cuando el acuífero reciba la recarga neta máxima

adecuada, acumulada a lo largo del período de lluvias, anualmente. Estas apreciaciones se basan en la Teoría de Ghyben – Herzberg que aunque fue formulada para la condición de equilibrio hidrostático se consideran válidas aceptablemente cuando en el marco del equilibrio dinámico se tiene un valor bajo del gradiente hidráulico dulce.

2.1.3) MODELACIÓN MATEMÁTICA

La complejidad inherente a los procesos que tienen lugar en el medio natural, ha hecho necesario el desarrollo de herramientas que faciliten la labor de los técnicos que trabajan en el campo de la hidrogeología. Entre las herramientas más sofisticadas de las que se dispone en la actualidad se encuentran los modelos de simulación. Entre ellos, los que tienen su aplicación en el campo de la modelización del flujo y calidad de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, se encuentran entre los más desarrollados y utilizados.

Los modelos son por definición aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural. Un modelo conceptual es una hipótesis de cómo se comporta un sistema o proceso. Esta hipótesis se puede expresar de forma cuantitativa o como un modelo matemático. Los modelos matemáticos se rigen por un conjunto de ecuaciones diferenciales que simulan la relación estímulo-respuesta de un sistema usándose ampliamente para analizar o evaluar cualquier situación que uno desee. En este caso, los de simulación hidrodinámica tendrán como resultado los niveles piezométricos y el flujo hídrico producido (Armas, 2010).

Para el modelado matemático se hace necesario conocer como parámetros de entrada la ubicación y característica de pozos, la geometría del acuífero, propiedades hidrodinámicas, mecanismos de recarga y descarga, condiciones de borde, fuentes y sumideros, propiedades de

contaminantes y carga contaminantes, así como las condiciones iniciales de niveles (carga) y concentraciones. Como salidas se obtendrán niveles y concentraciones en cada celda en el tiempo, mapas de contorno, cortes del acuífero, flujo y velocidades y trayectoria de partículas (Monerri, M y Doménech, P; s.f).

Como ejemplo de aplicación, CARSUCRE en el 2005, aplicó la herramienta de modelación matemática para otorgar concesiones de agua subterránea para el campo de pozos de Corozal en el acuífero de Morroa. También se realizaron seguimientos a la profundidad de los niveles estáticos y dinámicos de los pozos, indicando el comportamiento de los acuíferos con relación a la recarga y extracción, a través de estudios piezométricos.

El programa que usado para la presente investigación se llama FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system = Sistema de Simulación de Flujos Subterráneos basado en el Método de Elementos Finitos), el cual es un paquete de software profesional para modelado de flujo de fluidos y transporte de los constituyentes disueltos y/o procesos de transporte de calor en el subsuelo (fuente:www.feflow.info/-Alemania). Es un sistema interactivo de modelado de aguas subterráneas para problemas tri-y bidimensionales, en áreas y cortes, o para problemas desacoplados o acoplados a la densidad variable del fluido (también termohalinos), o para modelos variable y/o enteramente saturados, transitorios o estacionarios, también para modelos de transporte de flujo, masa y/o calor, así como para problemas de recursos hídricos subterráneos con una, ninguna o múltiples napas freáticas. Puede servir para planear y diseñar estrategias de remediación y técnicas de interceptación, y para apoyar el diseño de alternativas y de esquemas efectivos de monitoreo, como es el caso que se propone en este estudio al conocer la problemática de contaminación salina en el acuífero costero de Morrosquillo.

Capítulo III:

Metodología de la Investigación

3.1) MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio fue realizado bajo un nivel de investigación de tipo descriptiva-explicativa. Se consideró de tipo descriptiva porque se realizó una caracterización del fenómeno, estableciendo su estructura y comportamiento, y midiendo de forma independiente las variables que fueron enunciadas en los objetivos de la investigación. Y se trató como una investigación de tipo explicativa porque sirvió para buscar el por qué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto (Arias, 1999). De acuerdo con Hurtado (2008), las investigaciones de tipo explicativa tratan de encontrar posibles relaciones, a veces causales, respondiendo a las preguntas por qué y cómo del evento estudiado. Los estudios explicativos van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos, o del establecimiento de relaciones entre conceptos y están dirigidos a encontrar a las causas de los eventos, sucesos y fenómenos físicos o sociales.

El diseño de investigación es la estrategia que adopta el investigador para responder al problema planteado. Para este proyecto se realizó una Investigación Documental que es aquella que se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otros tipos de documentos previos que sirvan para la investigación. Y también se trató como una Investigación de Campo, ya que se realizó una recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna (Arias, 1999).

3.2) UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la planicie ubicada en la zona costera del Golfo de Morrosquillo, localizado en la parte nor-occidental de Colombia, en el Departamento de Sucre (CARSUCRE, 2010). El Golfo de Morrosquillo limita al norte por las islas de San Bernardo y al sur por Isla Fuerte. Su litoral

está alineado por un amplio arco de círculo constituido por una amplia playa de más de 40 kilómetros de longitud, desde punta de San Bernardo hasta la laguna de Cispata, antigua desembocadura del río Sinú.

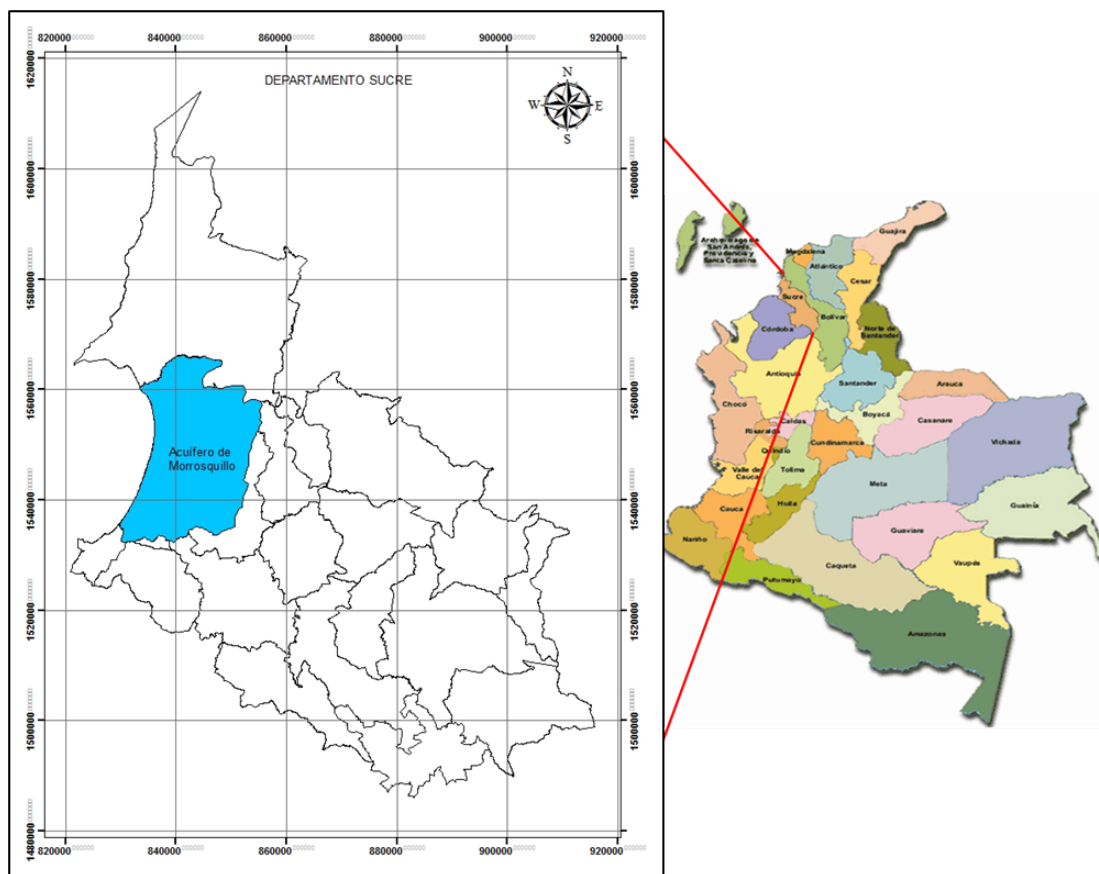


Figura 6.- Ubicación del área de estudio

Elaboración Propia

El golfo cubre una extensión aproximada de 800 kilómetros cuadrados. Y está limitado al este por algunas elevaciones topográficas, que permitieron la sedimentación de suelos fluvio marinos que constituyen el material de depósito donde se encuentra actualmente el Acuífero de Morrosquillo (Figura 6). Éste, es la principal fuente de abastecimiento de agua de las poblaciones de urbanas y rurales de los Municipios de Santiago de Tolú, Coveñas, San Antonio de Palmito, San José de Toluviejo y San Onofre. (op.cit).

3.3) BALANCE HÍDRICO

Para la realización del balance hídrico del acuífero de Morrosquillo, se usaron dos técnicas que determinaron la recarga neta presente en la zona. Una de ellas se realizó haciendo un balance hídrico convencional mediante la metodología empleada por Zamanillo (2011), y la otra determinando la recarga potencial del acuífero mediante un balance hídrico del suelo empleada por Schosinsky (2006). De los resultados del primer balance, se tomaron algunos datos como base para la determinación de la recarga del acuífero aplicando la metodología de Schosinsky.

Respecto a la obtención de los datos de lluvia mensual, se usaron tres estaciones ubicadas en las inmediaciones de la zona de estudio (tabla 9). Estas estaciones tienen registro de veinte años de precipitación y pertenecen al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). De esta información, se realizaron polígonos de thiessen usando el programa ArcGis 9.3, de manera de conocer si la información cubría en su totalidad la cantidad de agua de lluvia caída en la zona del acuífero.

Tabla 9.-

Información de Estaciones Meteorológicas usadas en el estudio

Nº	CODIGO IDEAM	NOMBRE	MUNICIPIO	TIPO	LATITUD N	LONGITUD W	COTA m.s.n.m
1	1309002	San Onofre	San Onofre	PM	09°	75°	55
2	1309010	Hacienda Argentina	Tolúviejo	PM	09°	75°	20
3	1309502	Primates	Colosó	CP	09°	75°	200

Fuente: IDEAM (2011). Tomado de CARSUCRE, 2012

En el caso de la variable temperatura solo una de la estaciones contaba con ésta información, por lo que se asumió este dato para las otras dos estaciones usadas,

además que, gracias a los leves cambios en la topografía de la zona se puede tomar esa variable como constante en toda el área.

3.3.1) Balance Hídrico por metodología Zamanillo

Para la determinación del balance hídrico, según la metodología de Zamanillo (2011), se empleó el método de Thorntwaite, donde al introducir datos de temperatura y precipitación proveniente de estaciones meteorológicas, y variar algunos datos de corrección, se puede obtener el balance hídrico para cada estación seleccionada, usando una hoja de Excel (Zamanillo, 2011).

Los datos de temperatura, infiltración, evapotranspiración sin corregir, evapotranspiración corregida, precipitación, variación de la reserva, reserva, evapotranspiración real, déficit, excedentes, $\frac{1}{2}$ excedentes, $\frac{1}{2}$ escorrentía del mes anterior, escorrentía total, déficit diario y caudales fueron hallados mediante el uso de las fórmulas presentadas en el marco teórico de este estudio, para la determinación de un balance hídrico. De los datos restantes, se obtuvieron los mismos de la siguiente manera:

- El cálculo de la reserva máxima se realizó por la metodología empleada por Almorox (s.f), donde se determinó la diferencia existente entre las entradas y salidas del sistema, es decir, precipitación y evapotranspiración corregida, y determinando el valor de reserva máxima a partir de la capacidad de campo y punto de marchitamiento, los cuales determinan las texturas de suelo presentes en el área. Para ello, se hizo un análisis bibliográfico de estudios que determinaron los tipos de suelos presentes en la zona de estudio, así como las texturas y porcentajes de materia orgánica en los mismos, a fin de determinar un valor acorde con las condiciones físicas y mecánicas del suelo que ayudaran a definir cuál sería la humedad máxima de estos.

- **f:** El valor de factor de corrección "f". Este dato fue tomado de una tabla de correlación presentada en Mijares (1992). Para el caso de Colombia, se trabajó con el factor correspondiente a la latitud 9°, y realizando una interpolación de los datos para ajustarlos a esta latitud en el golfo de Morrosquillo que es de 10°.
- El parámetro referente al área a regar "a", se halló usando información aportada por la Gobernación del Departamento Sucre (2012), relacionada a la superficie sembrada en los sectores del golfo de Morrosquillo. La información se muestra a continuación en la tabla 10:

Tabla 10.-

Superficie sembrada en Golfo de Morrosquillo. Departamento Sucre-Colombia

Distribución de áreas de pasto para Ganadería		Superficie sembrada agrícola	Superficie sembrada total (ha)
SECTOR	ha	Ha	
Coveñas	1806	292	2098
San Antonio de Palmito	16323	1323	17646
San Onofre	50628	3130	53758
Tolú	25140	586	25726
Tolú viejo	23691	1379	25070
TOTAL	117588	6710	124298

Fuente: Gobernación Departamento Sucre (2012) en CARSCUCRE, 2012.

Pero, como se conoce que en área la carencia de agua disminuye las áreas sembradas y que los tipos de suelos no son buenos, se asumieron áreas menores a éstas. Además, los sectores nombrados en la tabla no corresponden en su totalidad al área de estudio propuesto.

- Para la eficiencia de riego, se necesitaron conocer los tipos de cultivos que generalmente son sembrados en la zona, y a partir de tablas de correlación para este valor, se escogió una eficiencia de riego.

3.3.2) Determinación de Recarga de Agua de Lluvia

Para conocer la recarga del acuífero por los tipos de suelos presentes, se siguió la metodología empleada por Schosinsky en el 2006. Pero algunos parámetros fueron explicados a mayor detalle a continuación:

- **Infiltración**

Para este valor se hizo necesario conocer el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (K_{fc}), y para hallarlo se usó el factor “ f_c ”, el cual corresponde a la permeabilidad del suelo. Este valor se obtiene en campo por medio de pruebas de anillo enterrados en el terreno, pero, para el caso de la zona de estudio, no fueron encontrados datos relacionados a las pruebas de infiltración, por lo que el valor de K_{fc} usado para el cálculo proviene de una tabla de relación empleada por la ONU en 1974 (tabla 11).

Tabla 11.-

Valores de Coeficiente de Infiltración

Tipos de Suelos	K_{fc}
Arcilla compacta Impermeable	0.10
Combinación de limo y arcilla	0.20
Suelo limo arenoso no muy compacto	0.40

Fuente: ONU, 1974 en Schosinsky y Losilla, 1999

Para asignar los valores, se analizó un mapa de los tipos de suelos presentes en la zona. Los suelos en menor proporción relacionados a materiales geológicos compactos fueron descartados del cálculo de la recarga; así como los suelos considerados como mixtos marinos, los cuales fueron asumidos como similares a las arenas marinas. Por lo tanto, para la

recarga usada en este estudio se asumieron solo 3 tipos de suelos: arenas marinas, aluviones finos y materiales transportados.

Los demás valores de coeficiente que infiltra por efecto de la pendiente (K_p) y coeficiente que infiltra por efecto de la cobertura vegetal, se obtuvieron de las tablas 3 y 4.

- **Cálculo de infiltración pluvial mensual**

Para hallar este valor, se consideraron los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje y el coeficiente de infiltración.

- **Balance del suelo**

Para el balance del suelo, fue usado el dato calculado de infiltración mensual, generada por la lluvia. Posteriormente, se necesitó conocer la capacidad de campo y punto de marchitez del suelo, así como también la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua en la zona; todo esto a partir de las relaciones de tabla presentadas en el marco teórico de esta metodología.

- **Evapotranspiración**

La evapotranspiración promedio de la cuenca, se asumió igual la evapotranspiración potencial (ETP), la cual se calculó en el balance hídrico para cada una de las estaciones meteorológicas.

- **Recarga al acuífero**

Para este cálculo fueron transformadas las unidades de la capacidad de campo, punto de marchitez, humedad del suelo, precipitación y evapotranspiración a milímetros. Todo esto, para conseguir el coeficiente de humedad (Ch) mediante la ecuación presentada en el marco teórico. El valor

de evapotranspiración real “ETPR” se tomó del balance inicial realizado con la metodología de Zamanillo (2011).

- **Cálculo de recarga potencial al acuífero**

La recarga al acuífero se halló mediante el cálculo de la ecuación mostrada en la metodología de Schosinsky (2006). Y finalmente, se determinaron los valores de recarga por tipo de suelo en el acuífero de Morrosquillo.

3.4) MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA

Para la determinación de la piezometría en el acuífero se realizaron 2 campañas de monitoreo de los niveles del agua de la zona (figura 7 y 9). Para ello, se usó un medidor de niveles de agua en los piezómetros pertenecientes a CARSUCRE, o de pozos abandonados, los cuales han servido de monitoreo del acuífero desde el 2011. No sólo se tomaron datos de niveles estáticos, sino también se midieron otros datos de interés como lo son Oxígeno disuelto (DBO), conductividades, temperatura, sólidos totales disueltos (STD) y salinidad (figura 8).



Figura 7.- Medición de niveles con sonda, piezómetro perteneciente a proyecto PPIAS de CARSUCRE (Elaboración propia)



Figura 8.- Equipo de campo para medición de parámetros
Elaboración Propia

Estos datos fueron comparados con muestreos anteriores, ya que serían puntos de referencia en la modelación matemática, la cual fue trabajada usando cargas hidráulicas tomadas de monitoreos del 2008-2009.



Figura 9.- Vista de Grupo de Piezómetros Saltantes. Sociedad Portuaria. Tolú.
Elaboración propia

3.5) COMPLETACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual de un acuífero es una herramienta que permite conocer el comportamiento de las aguas subterráneas. Quizás se trate de uno de los temas más complejos de un estudio hidrogeológico, ya que cada información adicional que se puede tener sobre el acuífero, servirá para complementar la dinámica de las aguas. Así que, la modelación conceptual está en constante cambio.

Para el caso del acuífero de Morrosquillo, se presentó en este estudio una adición al modelo conceptual basado en información obtenida por CARSUCRE, así como, estudios realizados en la zona. Estos datos recopilados abarcaron diferentes herramientas hidrogeológicas, como lo son química, hidráulica, y geología, entre otros; los cuales ayudaron a complementar información de las condiciones actuales del acuífero respecto a su principal problema de contaminación que es la intrusión salina, esto con la finalidad de ser simuladas en la modelación matemática con FEFLOW.

3.5.1) Geología

La geología general del área ya ha sido descrita mediante información bibliográfica previa, la cual abarcó desde estructuras hasta estratigrafía, y los procesos de origen de las formaciones geológicas de la zona. Pero, para la modelación matemática, era necesario generar un análisis más detallado relacionado a la geología local, la cual fue analizada a partir de la información litológica registrada de algunas perforaciones de pozos.



Figura 10.- Ubicación de los cortes geológicos e información litológica
Elaboración propia

Estos datos se llevaron a un mapa del área y se realizaron líneas de cortes que sirvieron para relacionar datos adyacentes y crear una correlación litológica que finalmente, sirvió para generar las capas del acuífero en la modelación matemática. También se usaron los datos provenientes del diseño de pozos, los cuales aportaron información relacionada a las capas permeables y sirvieron de correlación con los datos litológicos. La ubicación de los cortes realizados se muestra en la figura 10:

3.5.2) Hidráulica del acuífero. Parámetros Físicos

Para conocer los parámetros físicos del acuífero se usaron varias herramientas que en conjunto, sirvieron para obtener mayor cantidad de puntos que arrojaran información de las condiciones físicas del material que conforma el acuífero.

Usando los cortes de la geología local, se ubicaron en la zona algunos puntos donde CARSUCRE, ha realizado pruebas de bombeo a diferentes pozos, ya que estas pruebas permitieron obtener información de parámetros físicos del acuífero como lo son la permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Cabe destacar, que estos estudios mostraron parámetros generales, ya que la mayoría de los pozos realizan la extracción de aguas mixtas de los diferentes niveles del acuífero. En el caso de la simulación en FEFLOW, era necesario tener estos datos físicos por cada una de las capas del mismo, y es por eso, que fueron determinados mediante la relación de flujos en serie (Silveira, 2011). Ver figura 11.

Para hallar las permeabilidades equivalentes de las capas se tomó la siguiente relación:

$$Q = b \cdot K_i \cdot \frac{\Delta h_i}{L_i} \quad (1)$$

$$Q = b \cdot K_{eqv} \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

Donde:

Q= caudal (m³/s)

b= espesor (m)

Ki= permeabilidad de capa i (m²/s)

Δhi = variación de gradiente hidráulico en capa i (m)

L_i = ancho de la capa i (m)

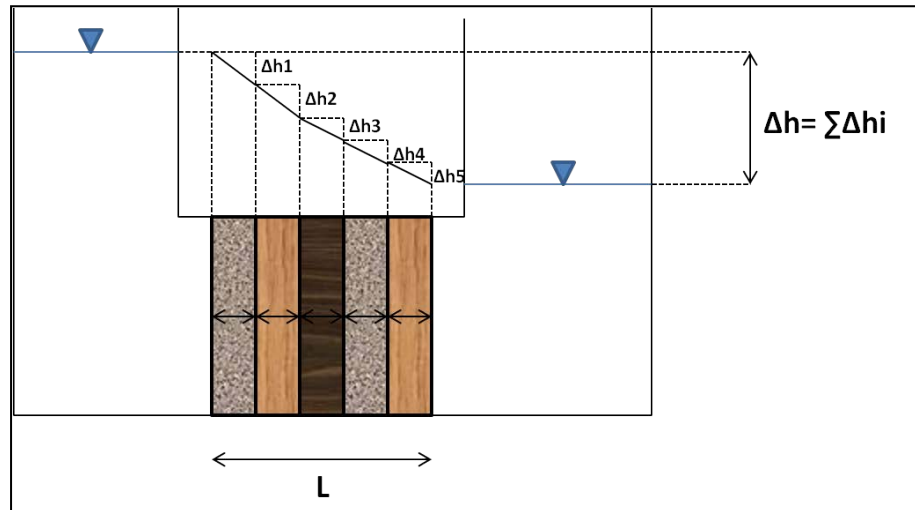


Figura 11.- Flujos en serie

Fuente: Silveira, 2011

Igualando 1 y 2:

$$\Delta h_i = K_{eqv} \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot \frac{L_i}{K_i}$$

$$\varepsilon \Delta h_i = \Delta h = k_{eqv} \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot \varepsilon \frac{L_i}{K_i}$$

$$K_{eqv} = \frac{L}{\varepsilon \frac{L_i}{K_i}}$$

Tomando los puntos conocidos de permeabilidad y aplicando la ecuación anterior, junto a la litología de los cortes, se determinaron conductividades equivalentes para cada capa.

3.5.3) Determinación de reacciones químicas en la interfaz

Para la geoquímica de la zona se usó información tomada de la modelación hidrogeoquímica realizada por Martínez (2009). Pero, para este

estudio en particular, fueron extraídos datos de este proyecto y se presentaron de otra forma, usando la metodología empleada por Manzano (2011), de manera de determinar el origen de las aguas subterráneas en el caso de acuíferos costeros, conociendo el tipo de intercambio iónico presente en este. Esto se hizo posible calculando la cuantificación de mezclas de las aguas de la zona. Este método se aplicó con la finalidad de obtener el elemento conservativo de las aguas mezclas, es decir, el cloruro de las muestras, de manera de conocer la concentración de agua dulce y salada en cada una.

Una vez obtenido los porcentajes de mezcla de agua dulce y salada, se aplicó el balance de agua para cada agua mezcla usando la relación de calcio (Ca) y Sodio (Na), para que de esta forma se compararan los valores del agua mezcla con los valores calculados en laboratorio y así obtener quienes eran aguas fósiles y quienes eran de producto de una intrusión salina

En este estudio se tuvieron tres campañas de toma de muestra de la química de las aguas del acuífero, dos de ellas tomadas por Martínez (2008-2009) y otra por CARSUCRE (2011). Para el caso del muestreo del 2008 y 2009, la muestra M1 fue catalogada como el dato de agua dulce, ya que se trató de un manantial. Y para el 2011 se trabajó con otra muestra denominada M3, la cual estaba presente en una parcela en la zona de recarga del acuífero. Los valores del agua de mar fueron tomados del muestreo realizado por Martínez (2009). Los datos de las tres campañas usados para determinar la mezcla de aguas están presentes en el marco teórico de esta investigación.

3.6) MODELACIÓN MATEMÁTICA

Para la realización de la modelación del acuífero se usó un programa de simulación matemática llamado FEFLOW 5.4 y 6.0. El principal objetivo de esta modelación era conocer hasta que punto, la intrusión salina ha sido un problema de contaminación en las aguas del acuífero de Morrosquillo. Esto se hizo teniendo como base, datos conocidos del modelo conceptual actual y de la información adicional generada en este estudio. En algunos casos se hizo necesaria la realización de mapas con shapefile de puntos (Arcgis 9.3) que sirvieron como bases de datos para introducir en el programa de simulación. Los pasos seguidos para generar la modelación matemática fueron:

3.6.1) Mallado

Para la realización del mallado se necesitó cargar dos mapas, uno que se relacionaba al área de estudio, y el segundo, un mapa de puntos que representaba la ubicación de los pozos presentes con información de caudales (figura 12).

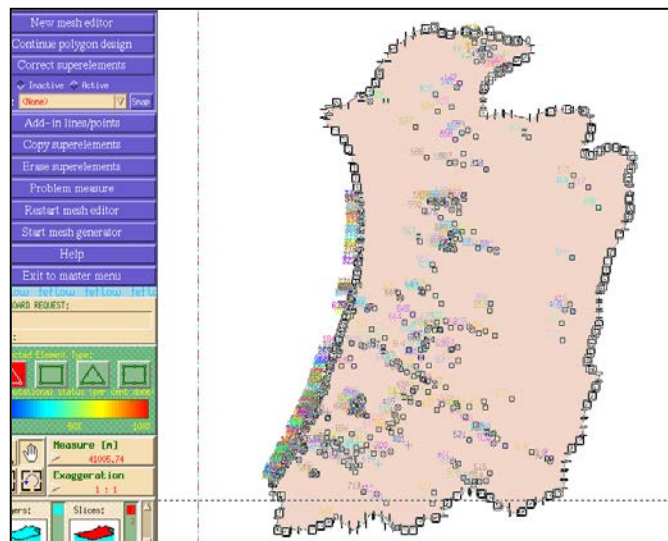


Figura 12.- Ejecución de Mallado en Feflow 6.0

Fuente: Feflow, 2012

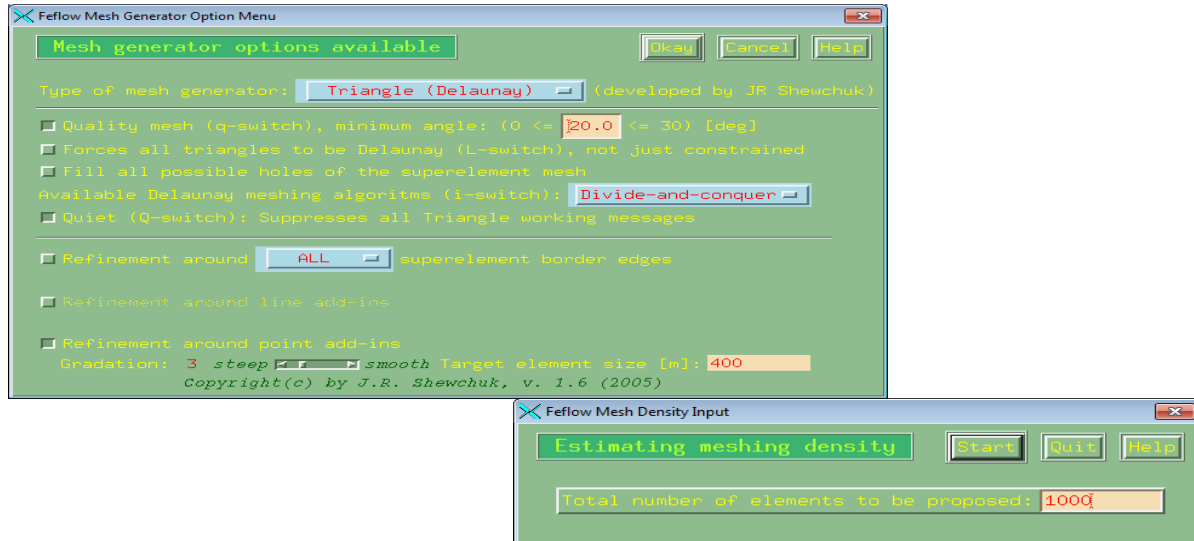


Figura 13.- Especificaciones de Mallado

Fuente: Feflow, 2012

Se realizó la adición de los elementos de la poligonal a trabajar llamada ADD-INS, esto permitió delimitar la zona del acuífero como un polígono, y también se adicionaron los pozos que se usaron para la modelación (add-points), como se ve en la figura. Una vez culminada la delimitación de la zona, se procedió a la generación del mallado, el cual se realizó usando una malla tipo triangular con algunas especificaciones que se consideraron las mejores, debido a la gran cantidad de pozos presentes y para obtener los resultados deseados en el modelo (figura 13).

Una vez comenzada la modelación, se realizó una afinación del borde del mallado occidental, es decir, en la zona de la costa, debido a la gran cantidad de pozos presentes y para que no se tuviera un contacto directo entre el agua de mar y los pozos que estaban a solo metros de la costa (figura 14).

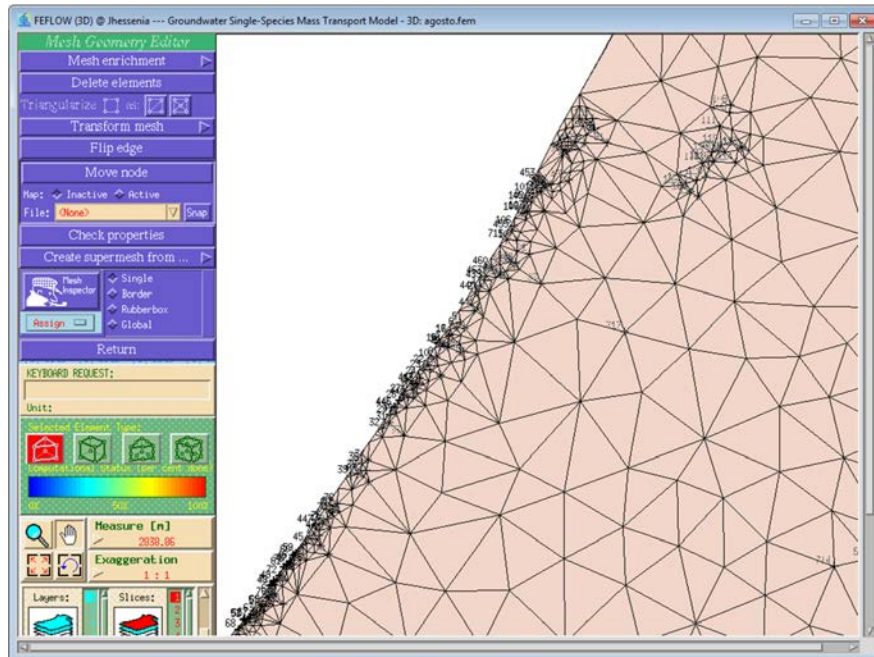


Figura 14.- Afinación de Mallado en el modelo

Fuente: Feflow, 2012

3.6.2) Editor del problema (PROBLEM EDITOR)

En este paso, se introdujeron todos los valores tanto físicos como químicos que determinaron la modelación

En esta ventana se pudo observar incluso la distribución de capas elegidas para el modelo. El programa permite realizar modelos en 2D y 3D. Se asumió para este caso, un modelo tridimensional, y se modificaron el número de capas a 6 y láminas a 7, por tratarse de un acuífero multicapa. En este punto no era posible introducir las condiciones de espesor de las capas, por lo que asumieron elevaciones de 100 metros, pero esto se modificó más adelante (figura 15).

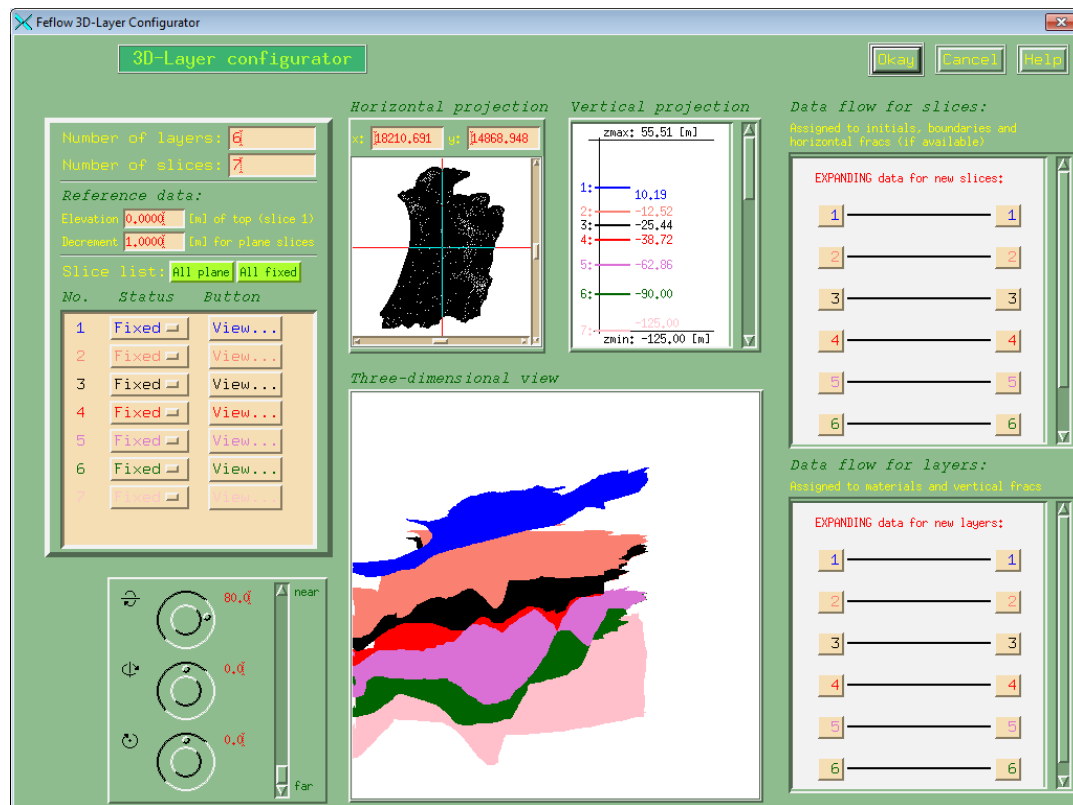


Figura 15.- Configuración de capas en 3D

Fuente: Feflow, 2012

Inicialmente, se indicaron las condiciones que definieron la modelación, y se determinó, que el problema a seguir sería un modelo saturado de flujo transiente y transporte transiente, y sería un confinado. No se trabajó como un modelo de flujo estático porque las condiciones de borde occidental debían tener comunicación directa al mar, y se quería conocer el avance de la intrusión debido a la variación de los niveles de agua en el acuífero debido a la extracción o bombeo (figura 16). Para editar las condiciones de un acuífero freático se hicieron los siguientes cambios (figura 17):



Figura 16.- Definición del tipo de modelo a seguir

Fuente: Feflow, 2012



Figura 17.- Definición de superficie de láminas

Fuente: Feflow, 2012

El programa da las opciones que pueden ser asignadas a cada lámina del modelo. Pueden ser:

- Libre y movable: Que se trataría de un acuífero libre.

- Freática: En este caso sería para acuíferos semiconfinados. Ésta puede ser adaptada a condiciones específicas, como confinada-libre, o libre-libre (figura 18).
- Fixed: Son capas rígidas como unidades estratigráficas, ejm: acuitardos.
- No especificada: El modelo adapta el tipo de capa dependiendo de las propiedades introducidas. Se recomienda esta opción para capas permeables.

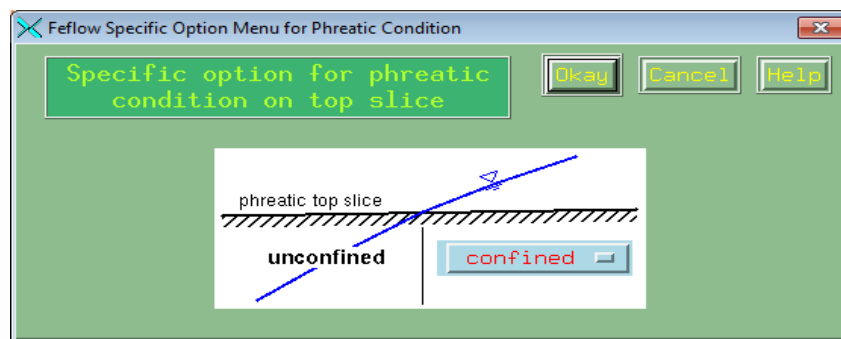


Figura 18.- Definición de las condiciones freáticas del modelo

Fuente: Feflow, 2012

Para esta modelación, la naturaleza de las capas fue la siguiente (tabla 12):

Tabla 12.-

Tipos de acuíferos definidos en la modelación

Lámina	Tipo de capa
1	Confinada
2	Freática
3	Fixed
4	Unspecified
5	Fixed
6	Unspecified

Elaboración Propia

3.6.3) Control de tiempo

En este paso se asumió un modelo a 365 días, que equivale a una modelación de un año. Se quiso asumir una modelación superior en tiempo, pero, una vez iniciada la simulación, éste corría lentamente y no se pudo avanzar al año completo. Además, que con los resultados obtenidos se consideró necesario limitar la modelación a los 230 días, ya que las condiciones solo establecían una recarga por agua de lluvia (figura 19).

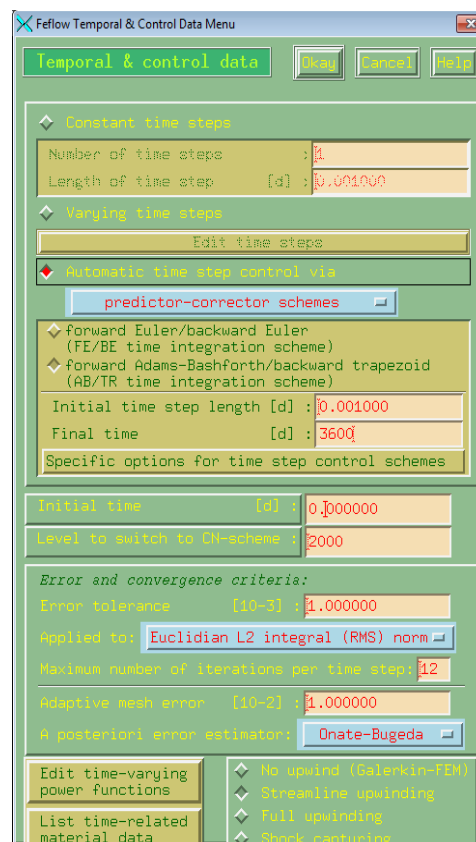


Figura 19.- Editor de tiempo

Fuente: Feflow, 2012

3.6.4) Determinación de las capas del modelo

A través de la opción COORDENADAS Z, se introdujeron los datos de puntos relacionados a la información obtenida de los cortes geológicos que se hicieron para el modelo conceptual. Primero, estos datos se tabularon en Excel y fueron llevados como base de datos a Arcgis 9.3, en donde se

generaron shapefiles de puntos para ser usados como archivos de tripletas, que son viables a usar en FEFLOW. El programa recomienda que la generación de las capas deba hacerse desde la capa inferior a la superior, por lo que se inició la introducción de los datos de la lámina 6 o basamento del acuífero hasta llegar a la lámina 1 que sería el relieve del terreno.

Estos valores del relieve, se obtuvieron de un modelo de elevación de cuencas, el cual fue aportado por CARSUCRE, y mediante el uso de Arcgis 9.3 se pudieron obtener las alturas correspondientes a un grupo de puntos tomados al azar. Todos los datos de base de lámina debieron introducirse como un valor negativo, a excepción de la lámina 1 la cual representa la topografía del terreno. Al entrar a este menú se pudo escoger el tipo de interpolación a usar para los datos. En este caso se realizó una interpolación tipo Kriging, con una condición de uso de 10 puntos adyacentes (figura 20).

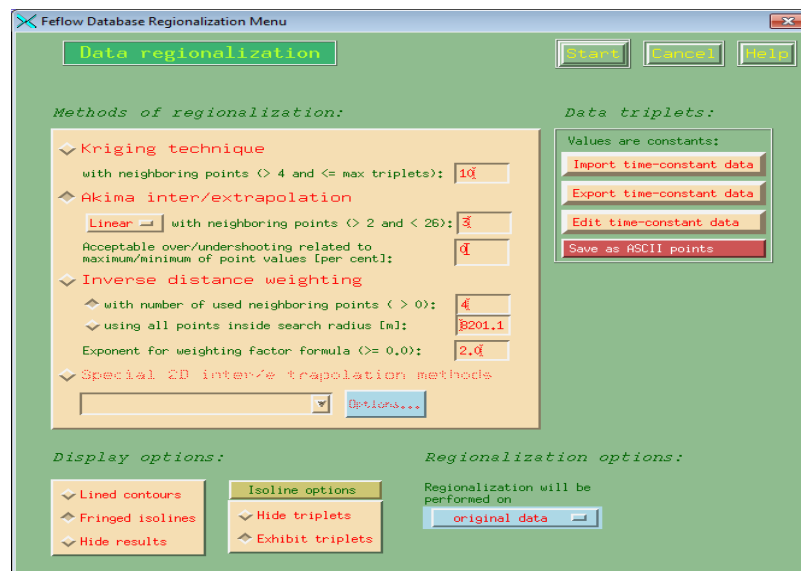


Figura 20.- Métodos de interpolación presentes en Feflow

Fuente: Feflow, 2012

Se importaron los datos de tripleta y se aceptaba la opción de interpolación (figura 21).

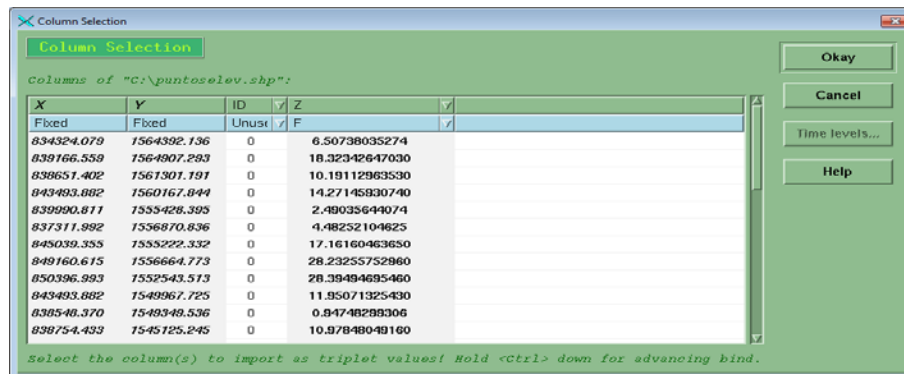


Figura 21.- Puntos de Tripleta

Fuente: Feflow, 2012

Y así se repitió el procedimiento hasta obtener la lámina superficial del terreno.

3.6.5) Datos de Flujo

En este paso se modificaron las condiciones de flujo del modelo, desde las cargas hidráulicas iniciales, hasta las condiciones de frontera, las permeabilidades y coeficientes de almacenamiento por capas.

3.6.5.1) Cargas Hidráulicas

Usando un mapa de puntos de Arcgis 9.3, se usaron datos de niveles del agua del 2008, los cuales fueron calibrados por Martínez (2009). Estos puntos se trabajaron como tripletas y se interpolaron usando Kriging, con condiciones de interpolación de 10 puntos adyacentes.

3.6.5.2) Condiciones de Frontera

Este paso permitió determinar las condiciones de borde del modelo. Estas pueden ser de 4 tipos:

- De carga Hidráulica
- De Flujo

- De Transferencia y de pozos

En la opción de carga hidráulica se podía modificar las condiciones a cabezas hidráulicas de agua de mar (figura 22).

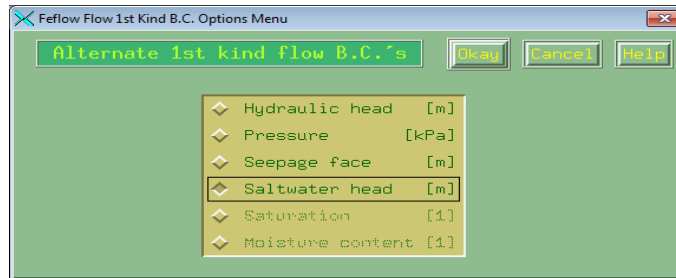


Figura 22.- Condiciones de borde frontera tipo 1

Fuente: Feflow, 2012

Para esta modelación las condiciones de borde usadas fueron: Al norte y sur del modelo el acuífero fue limitado por dos corrientes de agua o arroyos con los nombres de Arroyo Cascajo-Arroyo Paviás al norte y por el sur el Arroyo San Antonio. Como no se conoce la tasa de transferencia que puede haber entre el acuífero y estas corrientes de agua se asumieron como bordes impermeables.

El borde occidental se asumió como un borde de tipo de cabeza hidráulica de agua de mar, con la condición de cero (0) metros.

El borde oriental se asumió como un borde de carga hidráulica, la cual varió según las condiciones de los niveles de agua en la piezometría del 2008. FEFLOW permite hacer una variación por borde, por nodo, o como base de dato, o incluso con una opción llamada rubberbox que no es más que indicar con un puntero las celdas que se quieren asignar en el modelo con un valor determinado. Para este caso, se trabajó con la opción de borde y se asignaba el valor de carga en metros (figura 23).

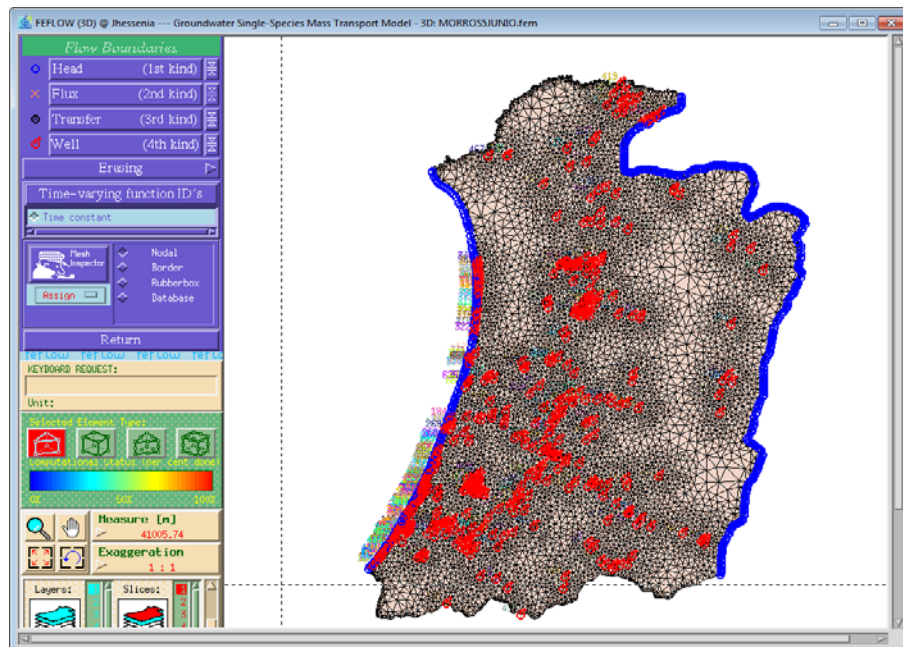


Figura 23.- Bordes de Frontera del modelo

Fuente: Feflow, 2012

Para los bordes por pozos de extracción, se usó la malla realizada con los pozos asignados. Allí, el programa permitió indicar si se trataban de pozos de extracción, o de inyección. En el caso de estudio, no se presentaron pozos de inyección, por lo que los datos asignados a los pozos siempre fueron de extracción.

En general, esta modelación cuenta con un total de 700 pozos, perteneciente a la red SIGAS, el cual es un sistema de información de pozos de CARSUCRE. A continuación se muestran los pozos y sus caudales de extracción empleados para la modelación matemática (anexo 1).

FEFLOW, tiene la opción de introducir los bombeos constantes o variable en el tiempo. Para este modelo, los caudales fueron asignados variando en el tiempo. Por esto, se realizaron gráficas de extracción, donde se indicó el tiempo de bombeo vs. el caudal extraído. En el conjunto de pozos presentes

en la zona, existe una gran variación de caudales por lo que se hizo necesario realizar un total de 27 gráficas (figura 24).

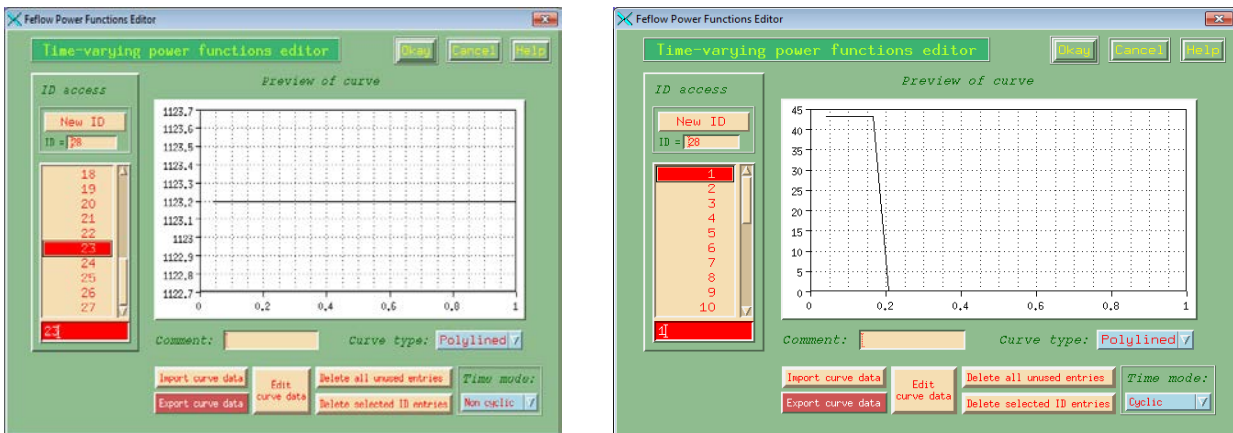


Figura 24.- Gráficas de variación de caudal en el tiempo

Fuente: Feflow, 2012

Estas gráficas son de dos tipos, unas representan un tiempo de bombeo de 4 horas, y aquellos pozos mostrados en las tablas con el color amarillo, tienen un bombeo continuo de 24 horas, ya que se tratan de pozos de acueducto. Una vez hechas las gráficas de bombeo, se asignaron a los pozos correspondientes a ese bombeo.

3.6.6) Materiales de Flujo

Acá se asignaron los parámetros físicos de los materiales presentes en el modelo.

3.6.6.1) Conductividad

Para la conductividad, se usaron datos obtenidos de pruebas de bombeos realizadas por CARSUCRE y de las conductividades equivalentes calculadas en el modelo conceptual. Una vez tabulados los valores en Excel, se procedió a realizar un mapa de puntos en Arcgis 9.3, tipo tripleta, es decir, ubicación en x-y, y el valor de conductividad para la dirección X, Y, Z. Para este estudio, se trabajó con un modelo anisotrópico, ya que las condiciones

de los materiales y la naturaleza hidrogeológica permitió inferir que el material constituyente tenía un comportamiento distinto en todas las direcciones. Cada una de las conductividades se interpolaron usando Akima Cubic (5-0), ya que al emplear otro tipo de interpolación, el resultado arrojaba conductividades negativas.

Tabla 13.- Modelo anisotrópico del modelado

CAPA	Kx	Ky	Kz
2	Prueba de bombeo	1/4kx	1/2kx
4	Prueba de bombeo	1/4kx	1/4kx
6	Prueba de bombeo	1/4kx	1/8kx

Elaboración propia

3.6.6.2) Coeficiente de Almacenamiento

Para el coeficiente de almacenamiento, sólo para la capa dos (2) se realizó una interpolación tipo akima, ya que esta capa se comportaba como confinada y libre en algunas partes, así que se mapeo por puntos las variaciones de coeficiente y se interpolaron en FEFLOW. La capa uno (1) por ser confinante se le agregó un valor alto en confinamiento. El resto de las capas se trataron como semiconfinadas por tener comunicación con capas inferiores y superiores, a excepción de la capa seis (6), la cual se estableció como confinada, y se le dio también un alto valor. Los valores de este dato son los siguientes (Tabla 14):

Tabla 14.-

Valores de coeficientes de almacenamiento usados en el modelo

Capa	Coeficiente de almacenamiento (s)
1	1 e-12
2	Variable
3	1 e-03
4	1e-03
5	1e-03
6	1e-07

Elaboración propia

3.6.7) Recarga del acuífero por agua de lluvia

Para este modelo, se trabajó solo con recarga por agua de lluvia, ya que aún no es conocido el caudal que pudiera estar aportando el acuífero de Tolú Viejo o los arroyos presentes en la zona. Para introducir la recarga, se usó la opción de JOIN. Desde acá, se puede asignar polígonos enteros con información de algún valor de interés. En este caso, se trató de zonas de recarga. Para obtener estos datos de recarga, se usaron los valores obtenidos en el balance hídrico realizado en este estudio, mediante la metodología de Schosinsky (2006), junto con el mapa de recarga generado, el cual fue modificado por polígonos y se les asignó diferentes valores de recarga, ya que en la modelación esta sería la única fuente de entrada de agua al sistema. El programa permite modificar las unidades de los datos para que coincidan con las unidades usadas por defecto en el modelo.

3.6.8) Datos del transporte

En esta parte de la modelación se trataron todos los datos referentes al contaminante, en este caso, la intrusión salina.

3.6.8.1) Contenido inicial de la masa contaminante

En esta investigación se trabajó como referencia del contaminante a los datos de sólidos totales disueltos (STD) en muestras analizadas en el 2009 por Martínez. Acá se asignó el valor del contaminante, así como su máximo valor de referencia (C_0), el cual estuvo asignado al máximo valor de STD en agua de mar, el cual es de 36000 mg/l (figura 25).

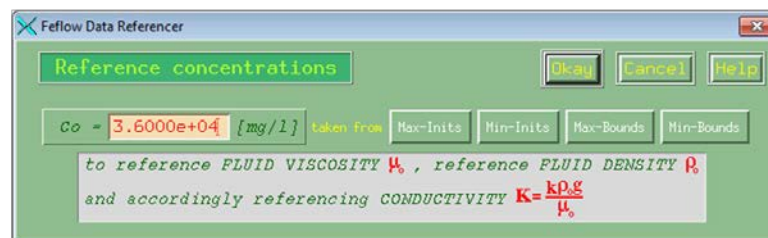


Figura 25.- Asignación de máximo valor del contaminante

Fuente: Feflow, 2012

Para la asignación de los valores de STD por capa permeable, se trabajó con mapas de puntos desde Arcgis 9.3, los cuales se modificaron para adaptarse al tipo de dato aceptado por FEFLOW, es decir, datos de tipo tripleta. La interpolación usada fue de tipo Akima cubic (5-0). En el caso de las capas acuitardos y la capa 1 se asignaron valores globales (tabla 15, 16, 17 y 18).

Tabla 15.-

Valores de STD para las capas1, 3, 5

Capa	STD (mg/l)
1	0
3	100
5	100

Elaboración Propia

Tabla 16.-

Valores de STD en capa 2

CODIGO	X	Y	STD2 (mg/l)
GW-101	844800	1565416	648
GW-102	843233	1561966	782
GW-103	838189	1561077	702
GW-201	850234	1558624	484
GW-202	843351	1557802	816
GW-301	851219	1556333	292
GW-302	842996	1552382	784
GW-303	840233	1551904	804
GW-401	850958	1547678	406
GW-402	845609	1545554	1400
GW-403	841438	1546399	760
GW-404	836106	1547160	2168
GW-501	845793	1538553	568
GW-504	833292	1541476	698
GW-601	840075	1530486	1630
GW-602	833877	1531787	704
GW-700	841120	1550349	732
43-IV-A-PZ-06	832718	1538884	583
44-I-D-PZ-11	841006	1542477	737
44-I-D-PZ-10	841003	1542478	745
44-I-D-PZ-09	841003	1542470	509
44-III-B-PP-42	838348	1531974	565
44-II-A-PP-01	851219	1556336	254
44-I-B-PP-78	848019	1558946	444
37-III-D-PP-18	842874	1562272	757
44-I-D-PP-02	839022	1540115	618
44-I-B-PP-53	840132	1552213	802
44-III-B-PP-05	845533	1538976	588

Fuente: Martínez, 2009

**Tabla 17.-
Valores de STD para capa 4**

CODIGO	X	Y	STD4 (mg/l)
GW-101	844800	1565416	648
GW-102	843233	1561966	782
GW-103	838189	1561077	702
GW-201	850234	1558624	484
GW-202	843351	1557802	816
GW-301	851219	1556333	292
GW-302	842996	1552382	784
GW-303	840233	1551904	804
GW-401	850958	1547678	406
GW-402	845609	1545554	1400
GW-403	841438	1546399	760
GW-501	845793	1538553	568
GW-502	839022	1540115	598
GW-601	840075	1530486	1630
GW-602	833877	1531787	704
GW-700	841120	1550349	732
43-IV-A-PZ-04	832713	1538883	515
44-I-D-PZ-11	841006	1542477	737
44-I-D-PZ-10	841003	1542478	745
44-I-D-PZ-09	841003	1542470	509

Fuente: Martínez, 2009

**Tabla 18.-
Valores de STD para capa 6**

CODIGO	X	Y	STD6 (mg/l)
GW-101	844800	1565416	648
GW-102	843233	1561966	782
GW-103	838189	1561077	702
GW-201	850234	1558624	484
GW-202	843351	1557802	816
GW-203	835974	1554658	1044
GW-301	851219	1556333	292
GW-302	842996	1552382	784
GW-303	840233	1551904	804
GW-401	850958	1547678	406
GW-402	845609	1545554	1400
GW-403	841438	1546399	760
GW-405	836100	1547153	1174
GW-501	845793	1538553	568
GW-502	839022	1540115	598
GW-503	833277	1541477	446
GW-601	840075	1530486	1630
GW-602	833877	1531787	704
GW-603	828733	1534551	596
GW-700	841120	1550349	732
43-IV-A-PZ-04	832713	1538883	515
44-I-D-PZ-11	841006	1542477	737
44-I-D-PZ-10	841003	1542478	745
44-I-D-PZ-09	841003	1542470	509

Fuente: Martínez, 2009

3.6.8.2) Bordes del contaminante

FEFLOW permite delimitar la zona de ubicación donde esté presente el contaminante, para este caso, el agua de mar. Así que, se delimitó como borde de contaminación a la costa. Y, el borde oriental del modelo se le asignó un valor mínimo del contaminante de 0.1 mg/l (figura 26).

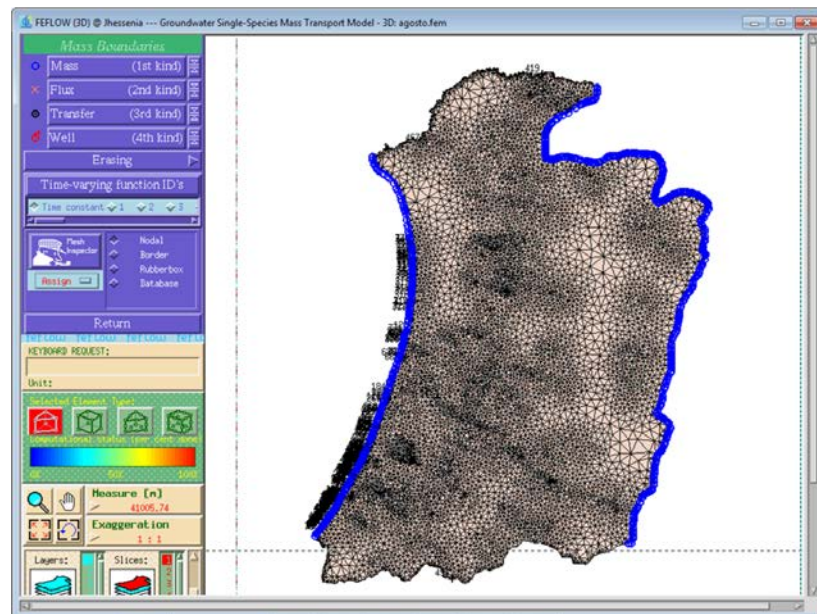


Figura 26.- Asignación de bordes de frontera del contaminante

Fuente: Feflow, 2012

3.6.8.3) Materiales de la masa contaminante

Para determinar el movimiento del contaminante en el modelo, es necesario establecer parámetros físicos, como los son porosidad, difusión molecular, dispersividad longitudinal y transversal.

En este estudio, los parámetros de difusión molecular, dispersividad longitudinal y transversal fueron asignados con los valores por defecto que trabaja FEFLOW.

Difusión Molecular: $1 \text{ e } -9 \text{ m}^2/\text{s}$

Dispersividad longitudinal: 5 m, Dispersividad transversal: 0.5 m

En el caso de la porosidad, se realizaron 3 mapas de punto en Arcgis 9.3 usando datos relacionados al tipo de litología presente. Cabe destacar, que se asignaron valores prácticamente impermeables en la zona de la costa, ya que los sedimentos presentes, están relacionados con un ambiente manglar, por lo que se trataría de arcillas con contenido de arena, pero como es de esperar, éstas no permiten fácilmente el flujo del agua. Así que para los tres mapas, se asignaron valores que iban aumentando a medida que los puntos se alejan de la costa.

Para la capa 1 y los acuitardos se asignaron valores globales:. Para las capas 2,4,6, se utilizó una interpolación tipo akima cubic (5,0). En el caso de las capas 2 y 4 se trabajó con los mismos datos, ya que se consideró que el material es similar en ambos casos.

3.6.9) Editor de datos de Referencia

Acá se introdujeron los puntos de observación (piezómetros) que servirían para verificar los valores de salinidad en el modelo. Para ello, se usó la opción de Observación de Puntos individuales (Observation Single Points).

Se importaron los valores desde un mapa de puntos realizado en Arcgis 9.3, y se asignaron al modelo con su ubicación geográfica, y profundidad de lámina (figura 27).

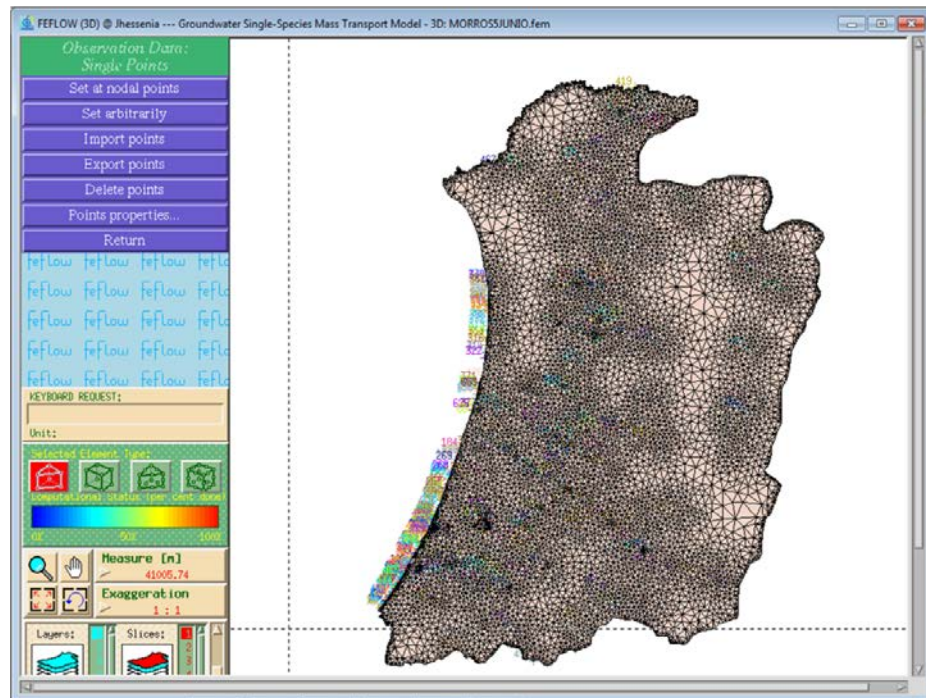


Figura 27.- Asignación de datos de referencia (piezómetros)

Fuente: Feflow, 2012

Finalmente, se procedió a realizar la simulación a un año. Pero, debido a la gran cantidad de datos de bombeo en el modelo, la simulación pasó a ser muy lenta, y por tener poco tiempo para hacerla, se llegó solo a 230 días simulados. Este tiempo, sirvió para observar el comportamiento de las aguas con sólo una recarga. Después de asignados todos los parámetros físicos y químicos del modelo se procedió a realizar la simulación matemática.

Cabe destacar, que este programa no tiene un punto de desarrollo que permitiera realizar la calibración de los parámetros del modelo, como se realiza con otros modeladores como lo es Modflow, pero, como comparación o validación, se tomaron en consideración los valores de medición de niveles realizados en el año 2012.

Capítulo IV:
Resultados y Análisis de
Resultados

4.1) BALANCE HÍDRICO POR METODOLOGÍA DE ZAMANILLO

En esta investigación se realizaron tres balances hídricos. La figura 28 muestra los polígonos de Thiessen que se obtuvieron con los promedios de precipitación en toda el área del acuífero.

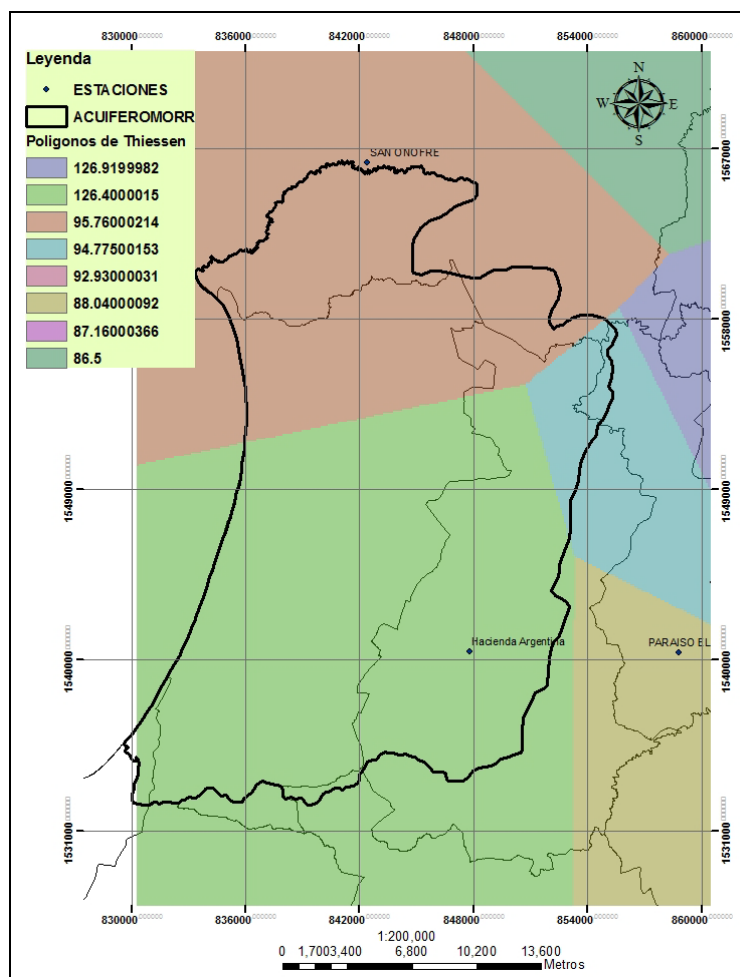


Figura 28.- Polígonos de thiessen en zona de estudio

Elaboración Propia

Según los resultados de los polígonos, las precipitaciones en la zona van desde los 94 a 126 mm mensuales, siendo mayores en el área que abarca la estación de argentina. Para conocer a más detalle las condiciones climáticas

reinantes en el área de estudio, se muestran a continuación los resultados obtenidos por cada estación analizada.

4.1.1) Estación Argentina

La figura 29 muestra los resultados obtenidos de la estación Argentina. Se dedujo a partir de las precipitaciones mensuales, que el periodo de tiempo donde se presentó aporte de almacenamiento de agua dulce hacia el acuífero es de Abril a Diciembre, periodo que coincide con la época de precipitaciones más intensas en el área. Los máximos de precipitaciones se dan en Mayo y en Octubre, alcanzando los 200 mm en el mes de Octubre. Esta estación es la que presentó los mayores registros de precipitaciones de la zona. Además, en este periodo de lluvias es en donde la evapotranspiración real y la potencial coincidieron como las mayores en la zona. La reserva máxima calculada del mes Octubre es de aproximadamente 95 mm.

Sólo pasado el mes de Diciembre, se hace uso de la reserva de agua, donde probablemente el acuífero esté aportando hacia fuentes superficiales, y se observó que las precipitaciones decaen drásticamente, a casi nulas, acompañados con una evapotranspiración potencial constante durante todo el año.

Se presentó un déficit del recurso en la época de sequía, el cual abarcó desde Enero a Marzo. En este periodo se produjeron mayores evapotranspiraciones que precipitaciones, provocando así el déficit de aporte de agua hacia el acuífero. Las temperaturas medias anuales son de 27°C, sin una gran variación a lo largo del año.

De todas las estaciones, está es la que presentó precipitaciones mayores a la ETR, por lo que se pudiera deducir que la recarga neta final al acuífero

es mayor en esta zona. Esta hipótesis pudiera ser respaldada con la información litológica, la cual muestra que en la parte suroriental del acuífero se presentan las máximas elevaciones topográficas, las cuales están representadas por a la Formación Tolú Viejo (calizas) y sirven de zona de recarga.

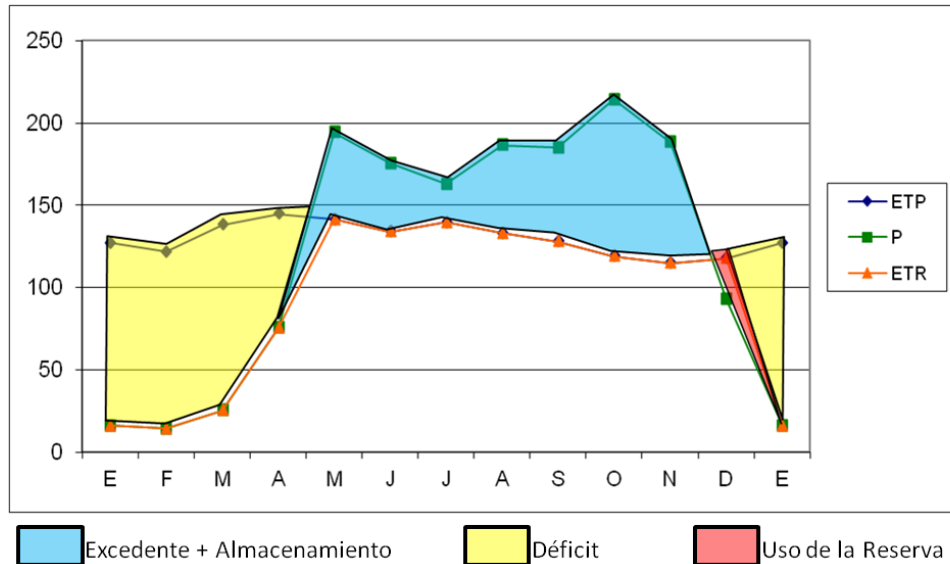


Figura 29.- Balance Hídrico. Estación Argentina

Elaboración propia

Para el análisis de la tabla 19, el valor de mayor importancia para este estudio es el relacionado al excedente, y está en el orden de 301 mm/anuales, el cual representa la escorrentía superficial y el almacenamiento al acuífero. Por lo tanto, la recarga obtenida en este punto fue de 150.5 mm/anuales, asumiendo que se den pérdidas por retención capilar, escorrentía subsuperficial, y que aún así el valor media de excedente sería el relacionado al almacenamiento.

Tabla 19.-
Balance Hídrico. Estación Argentina.

													Reserva máx:	95
	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
temp		27.0	27.3	27.3	27.7	27.2	27.0	27.1	26.8	26.9	26.4	26.4	26.5	
i		12.83	13.09	13.09	13.32	12.99	12.82	12.93	12.74	12.75	12.40	12.44	12.51	153.91
ETP sin corr		141.3	148.6	148.6	155.5	145.9	140.9	144.0	138.7	139.1	129.5	130.4	132.5	
nºdías mes		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	30	
factor corrección "f"		0.90	0.82	0.93	0.93	0.97	0.95	0.97	0.96	0.92	0.92	0.88	0.89	
ETP corr.		127	122	138.2	145	142	134	140	133	128	119	115	118	1560
P		15.92	14.40	25.28	75.48	194.26	175.44	162.98	186.52	184.88	214.16	188.24	92.68	1530.2
Var. Reserva		0.0	0.0	0.0	0.0	52.7	41.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-25.3	69.7
Reserva	0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.7	94.3	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	69.7	691.80
ETR		15.9	14.4	25.3	75.5	141.5	133.8	139.7	133.2	128.0	119.2	114.8	118.0	1159
Déficit		111.3	107.5	112.9	69.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	401
Excedentes		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.6	53.3	56.9	95.0	73.5	0.0	301
1/2 Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	26.7	28.4	47.5	36.7	0.0	
1/2 Escorrentía mes ant.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.66	16.17	0.00	7.20	21.96	
Escorrentía total	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	32.3	44.6	14.4	43.9	22.0	
Deficit diario mm/día		3.59	3.84	3.64	2.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Q (m3/s) neto a derivar		6.23129509	6.66424285	6.324236	4.0005	0	0	0	0	0	0	0	0	
Q (m3/s) bruto a derivar		15.5782377	16.6606071	15.81059	10.001	0	0	0	0	0	0	0	0	

Elaboración Propia

4.1.2) Estación Primates

La figura 30 muestra los resultados obtenidos para esta estación. Se evidencian dos periodos estacionales. De Diciembre a Abril se da una temporada seca con precipitaciones entre los 20 a 100 mm mensuales, acompañados de una evapotranspiración constante durante todo el año entre los 120 a 140 mm mensuales. En la temporada seca la evapotranspiración real (ETR) coincide con la precipitación caída en la zona, lo que evidenció el déficit de agua de recarga al acuífero.

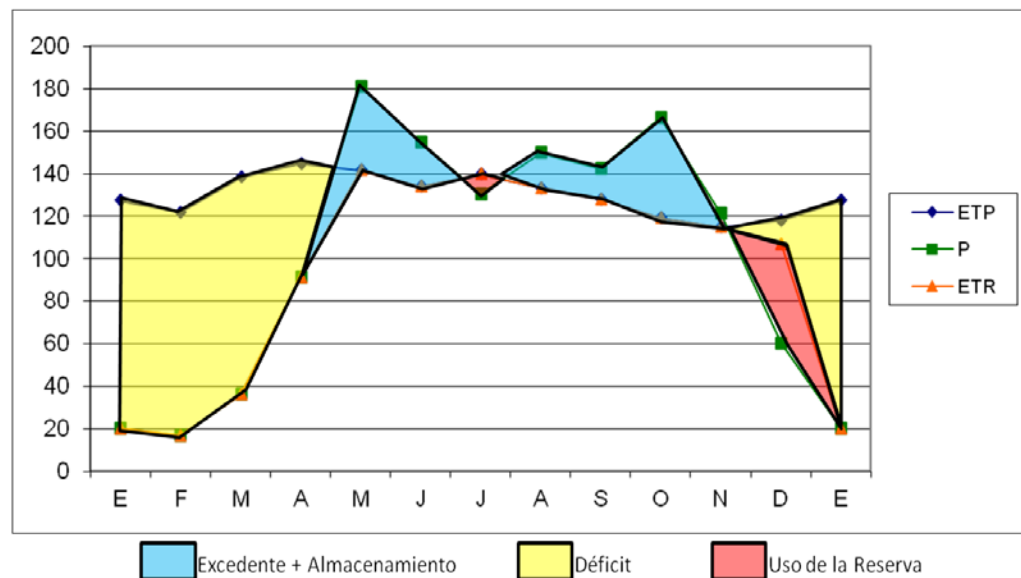


Figura 30.- Balance Hídrico. Estación Primates

Elaboración Propia

Solo pasado el mes de Abril, comienza la época de lluvias, marcadas por dos picos de actividad en los meses de Mayo y Octubre. Las ETR en este periodo no superan los 140 mm/mensual, por lo que se produce almacenamiento y excedente, que finalmente pasa a ser parte de la escorrentía superficial y como infiltración de agua hacia el acuífero, la cual produce recarga, aunque sea muy baja y sólo se produce en época de lluvia, y estuvo en el orden de 44 mm/anuales, indicando una recarga mucho menor a la generada en el área de influencia de la estación argentina (tabla 20).

La reserva máxima para esta estación se presenta en el mes de Octubre. Cabe destacar, que en el mes de Junio-Julio, se produce una pequeña disminución de precipitación, lo que hace que para ese breve periodo de tiempo se haga uso de la reserva de agua. Esto ocurre igualmente terminado el mes de Noviembre hasta Enero.

4.1.3) Estación San Onofre

Esta estación es la que menor cantidad de precipitación registró. Solo se observó un pico de actividad en el mes de Octubre, pero menor a los 200 mm mensuales, y el verdadero aporte al excedente se presentó brevemente en el mes de Junio y nuevamente en Agosto. Por lo tanto, la recarga neta en la zona que cubre esta estación, es quizás la que menor aporte haga al acuífero de Morrosquillo.

La temporada seca se inicia a finales de Diciembre hasta Enero, pero en este periodo también se presentó el uso de la reserva en la época de lluvia. Este resultado es similar al de las demás estaciones. Pero, en el mes de Julio, se presenta una pequeña disminución de las precipitaciones registradas, generando el uso de la reserva nuevamente. E incluso, se genera déficit momentáneamente, el cual se recupera rápidamente por el periodo de lluvias que se intensifica nuevamente en la zona (figura 31).

Tabla 20.-
Balance Hídrico. Estación Primates

												Reserva máx:		47
	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
temp		27.0	27.3	27.3	27.7	27.2	27.0	27.1	26.8	26.9	26.4	26.4	26.5	
i		12.83	13.09	13.09	13.32	12.99	12.82	12.93	12.74	12.75	12.40	12.44	12.51	153.91
ETP sin corr		141.3	148.6	148.6	155.5	145.9	140.9	144.0	138.7	139.1	129.5	130.4	132.5	
nºdías mes		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	30	
factor corrección "f"		0.90	0.82	0.93	0.93	0.97	0.95	0.97	0.96	0.92	0.92	0.88	0.89	
ETP corr.		127	122	138.2	145	142	134	140	133	128	119	115	118	1560
P		20.11	16.60	36.00	91.11	181.03	154.78	130.36	149.62	142.20	166.17	120.96	60.05	1269.0
Var. Reserva		0.0	0.0	0.0	0.0	39.5	7.5	-9.3	9.3	0.0	0.0	0.0	-47.0	0.0
Reserva	0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.5	47.0	37.7	47.0	47.0	47.0	47.0	0.0	312.21
ETR		20.1	16.6	36.0	91.1	141.5	133.8	139.7	133.2	128.0	119.2	114.8	107.0	1181
Déficit		107.1	105.3	102.2	53.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	379
Excedentes		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.4	0.0	7.1	14.2	47.0	6.2	0.0	88
1/2 Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	3.6	7.1	23.5	3.1	0.0	
1/2 Escorrentía mes ant.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.36	1.68	2.63	0.00	7.20	5.15	
Escorrentía total	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	3.4	5.3	9.7	14.4	10.3	5.1	
Deficit diario mm/día		3.45	3.76	3.30	1.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	
Q (m3/s) neto a derivar		0.1998893	0.2175916	0.19079	0.1032	0	0	0	0	0	0	0	0.021039	
Q (m3/s) bruto a derivar		0.49972326	0.543979	0.476974	0.258	0	0	0	0	0	0	0	0.052599	

Elaboración Propia

A pesar del poco registro de precipitaciones, la ETR no superó el total de las lluvias caídas, por lo que se puede asegurar, que si se produce recarga al acuífero, aunque se en un bajo porcentaje.

La máxima reserva se produce en el mes de Octubre en 64 mm/mes, de los cuales quizás la mitad del valor puede pasar a la recarga del acuífero, y la otra mitad a la escorrentía superficial en la zona. En este caso, se consideró que la recarga al acuífero es inmediata, ya que el acuífero en el área tiene un comportamiento freático o libre, y fue calculada en el orden de 23 mm/anuales, siendo la menor de todas las recargas obtenidas (tabla 21).

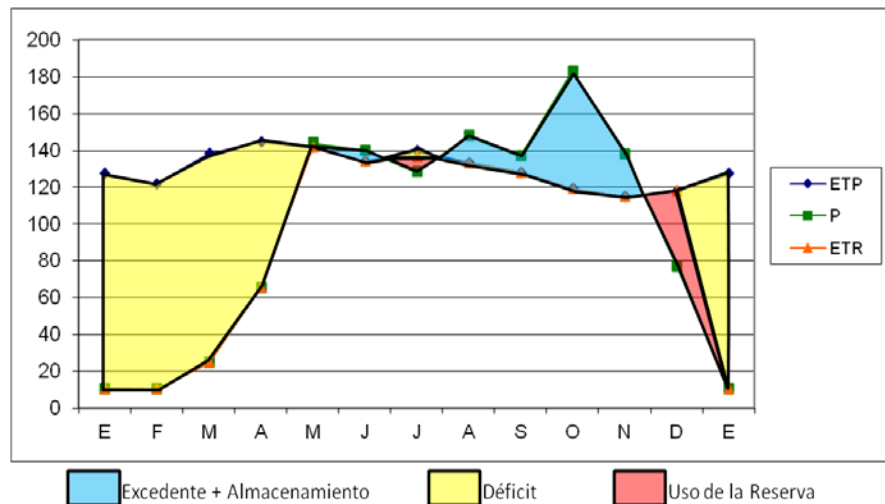


Figura 31.- Balance hídrico. Estación San Onofre

Elaboración Propia

La recarga neta calculada por estas tres estaciones fue de 240.5 mm/anuales.

Tabla 21.-

Balance Hídrico. Estación San Onofre

												Reserva máx:		64
	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
temp		27.0	27.3	27.3	27.7	27.2	27.0	27.1	26.8	26.9	26.4	26.4	26.5	
i		12.83	13.09	13.09	13.32	12.99	12.82	12.93	12.74	12.75	12.40	12.44	12.51	153.91
ETP sin corr		141.3	148.6	148.6	155.5	145.9	140.9	144.0	138.7	139.1	129.5	130.4	132.5	
nºdías mes		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	30	
factor corrección "f"		0.90	0.82	0.93	0.93	0.97	0.95	0.97	0.96	0.92	0.92	0.88	0.89	
ETP corr.		127	122	138.2	145	142	134	140	133	128	119	115	118	1560
P		10.43	10.22	24.47	65.39	144.01	139.83	128.20	147.83	136.80	182.77	137.87	76.90	1204.7
Var. Reserva		0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	6.0	-8.5	14.7	8.8	40.6	0.0	-41.1	22.9
Reserva	0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	8.5	0.0	14.7	23.4	64.0	64.0	22.9	200.01
ETR		10.4	10.2	24.5	65.4	141.5	133.8	136.7	133.2	128.0	119.2	114.8	118.0	1136
Déficit		116.8	111.7	113.7	79.2	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	424
Excedentes		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.1	23.1	0.0	46
1/2 Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	11.5	0.0	
1/2 Escorrentía mes ant.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.20	9.37	
Escorrentía total	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.4	18.7	9.4	
Deficit diario mm/día		3.77	3.99	3.67	2.64	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Q (m3/s) neto a derivar		1.30775322	1.38468579	1.27392	0.9169	0	0	0.034	0	0	0	0	0	
Q (m3/s) bruto a derivar		3.26938304	3.46171449	3.1848	2.2922	0	0	0.084	0	0	0	0	0	

Elaboración Propia

4.2) DETERMINACIÓN DE RECARGA POR AGUA DE LLUVIA (SCHOSINSKY, 2006)

Se tomaron en cuenta tres tipos de suelo para realizar este balance. Para la zona costera se asumió una textura arenosa, en la zona media como finas y en la parte de piedemonte se clasificó como franco arcilloso. A partir de estos tipos de suelos se usaron los puntos de marchitez, capacidad de campo y densidades expuestas en la tabla 22.

Tabla 22.-

Valores de punto de marchitez, capacidad de campo, humedad y densidad aparente de los suelos del área de estudio

PMP (%)	costa	4.0	PMP(mm)	6.7
	media	15.0		19.5
	transportada	6.0		9.0
CC(%)	costa	10.0	CC (mm)	16.7
	media	29.0		37.7
	transportada	15.0		22.5
H(%)	costa	9.0	H(mm)	15.0
	media	11.0		14.3
	transportada	8.0		12.0
D (g/cm3)	costa	1.7		
	media	1.3		
	transportada	1.5		

Fuente: Grassi, 1976 en Schosinsky, 2006

Los resultados que se obtuvieron en esta metodología se resumen a continuación en la tabla, pero el valor de interés para este estudio es el relacionado con la recarga neta calculada de acuerdo a los tipos de suelos en la zona (tabla 23 y 24).

Tabla 23.-

Resultados de recarga por tipo de suelo

		mm/año	Promedio: 443 mm/año	m/d
Rp	costa	549.8		0.00013
	media	183.1		0.00004
	transportada	598.9		0.00014
	total	1331.8		0.00030

Tabla 24.-

Resultados del Balance Hídrico (SCHOSINSKY, 2006)

Parámetros		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
HD		0.0	0.0	0.0	0.0	31.6	49.9	44.2	52.2	55.1	68.7	68.7	30.9
Pi (mm/mes)	costa	10.9	9.7	20.3	54.4	121.9	110.3	98.9	113.6	108.9	132.1	104.9	54.0
	media	6.5	5.8	12.2	32.7	73.1	66.2	59.3	68.1	65.5	79.3	62.9	32.4
	transportada	11.4	10.2	21.4	57.2	128.0	115.8	103.8	121.4	114.3	138.8	110.1	56.7
ET (mm/mes)		127.2	121.9	138.2	144.6	141.5	133.8	139.7	133.2	128.0	119.2	114.8	118.0
Ra (mm/día)		13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7
Tmin media (°C)		26.9	27.4	27.4	27.3	26.9	26.9	27.0	26.8	26.6	26.3	26.4	26.5
Tmax media (°C)		33.4	33.7	33.6	33.0	32.0	32.1	32.3	32.3	31.4	30.8	31.0	32.0
TD (Tmax-tmin) (°C)		6.4	6.3	6.2	5.7	5.1	5.2	5.4	5.5	4.8	4.5	4.6	5.5
Tmedia (°C)		27.0	27.3	27.3	27.7	27.2	27.0	27.1	26.8	26.9	26.4	26.4	26.5
Eto (mm/día)		3.4	3.7	3.9	3.8	3.6	3.5	3.6	3.7	3.4	3.1	2.9	3.0
ETPR (mm/mes)	costa	2.8	3.1	3.3	3.2	3.0	3.0	3.0	3.1	2.8	2.6	2.4	2.5
	media	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.9
	transportada	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7
His (mm)	costa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	media	13.0	13.7	7.3	0.0	0.0	3.2	4.4	3.6	9.2	8.9	25.3	18.0
	transportada	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C1	costa	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	media	0.1	0.0	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	transportada	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Elaboración Propia

Continuación de resultados del Balance Hídrico por metodología de SCHOSINSKY, 2006

Parámetros		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETR1 (mm/mes)	costa	127.2	121.9	138.2	144.6	141.5	133.8	139.7	133.2	128.0	119.2	114.8	118.0
	media	9.4	4.0	53.2	144.6	141.5	133.8	139.7	133.2	128.0	119.2	114.8	118.0
	transportada	127.2	118.7	138.2	144.6	141.5	133.8	139.7	133.2	128.0	119.2	114.8	118.0
C2	costa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0
	media	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	transportada	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0
ETR	costa	0.0	0.0	0.0	0.0	31.6	49.9	44.2	52.2	55.1	68.7	57.4	30.9
	media	0.0	0.0	0.0	0.0	31.6	49.9	44.2	52.2	55.1	59.6	57.4	30.9
	transportada	0.0	0.0	0.0	0.0	31.6	49.9	44.2	52.2	55.1	68.7	57.4	30.9
Hsf (mm)	costa	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	16.7	6.7
	media	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	28.6	30.8	19.5
	transportada	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	20.3	9.0
HIS (mm)	costa	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	16.7
	media	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	28.6	30.8
	transportada	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	20.3
Rp (mm/mes)	costa	10.9	9.7	20.3	54.4	90.3	60.4	54.6	61.3	53.7	63.5	37.5	33.2
	media	6.5	5.8	12.2	32.7	41.6	16.3	15.1	15.9	10.3	10.6	3.3	12.8
	transportada	11.4	10.2	21.4	57.2	96.4	65.9	59.6	69.1	59.2	70.1	41.4	37.1

Elaboración Propia

Finalmente, los resultados de recarga por tipo de suelos presente en la zona de estudio se muestran en la figura 32:

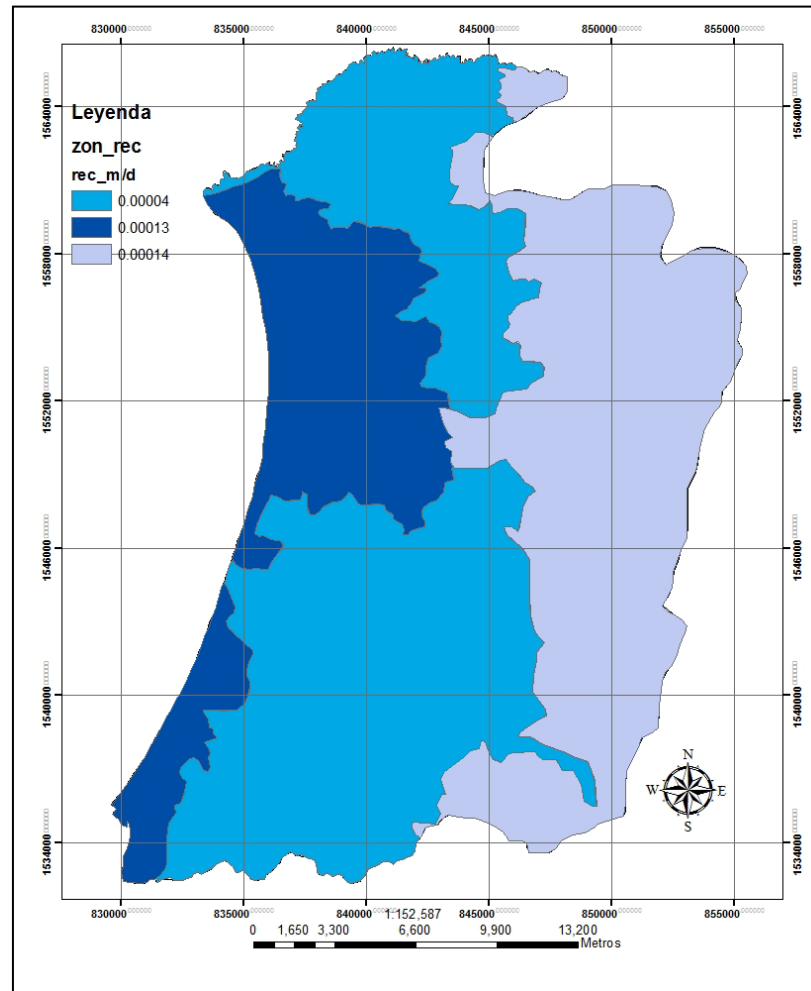


Figura 32.- Recargas calculadas para los tipos de suelos presentes la zona de estudio por metodología de Schosinsky, 2006.

Elaboración Propia

De los resultados obtenidos del balance hídrico por el método de Zamanillo, el valor de recarga calculado es mayor al obtenido en el balance hídrico por tipos de suelo de Schosinsky, lo que indica que si es importante tener en cuenta las características físicas del material que conforma al acuífero, ya que puede ser determinante a la hora de asumir un recarga.

Comparando ambos resultados con la recarga calculada en el 2005 por Gutiérrez (282 mm/anuales), la diferencia entre los resultados puede deberse a muchos motivos, una de las primeras observaciones de ese valor de 282 mm/anuales, es que fue obtenido a partir de 19 estaciones meteorológicas. Las estaciones que se analizaron en esta investigación se consideran más representativas de las condiciones climáticas que se presentan en la cuenca del acuífero, por estar justo en la zona de estudio, por lo que el valor de Gutiérrez pudiera estar demostrando una recarga inferior por considerar un área de análisis mayor al asumido en esta investigación. Otro valor de recarga conocido, pertenece a Ingeominas, pero no se conoce cuales fueron los principales parámetros seguidos para obtener dicho valor. Para este estudio, el valor de recarga fue de 443 mm/anuales, aunque se considera un valor de recarga superior al real, debido a las suposiciones asumidas en este estudio (infiltración, texturas de suelos).

Para obtener el volumen anual de recarga, se tomó en consideración el área del acuífero estudiado, la cual es de $5,66 \times 10^8 \text{ m}^2$ y la recarga nombrada anteriormente (443 mm/anuales). Como resultado, el volumen de recarga por agua de lluvia fue de aproximadamente 7950 l/s. Si se compara dicho valor con la descarga calculada por CARSUCRE en el 2011 (Tabla 5), el valor de consumo en el golfo de Morrosquillo es de 1112.24 l/s (para los 700 pozos usados en este estudio). Este valor es menor al volumen de recarga por agua de lluvia asumido en este estudio, indicando que el consumo actual aún no debería provocar la disminución de los niveles de agua, que pudieran ser los responsables de llevar a la sobrevaloración del acuífero produciendo la contaminación gradual de las aguas por la intrusión salina, (motivo por el cual se realizó este estudio), indicando que el resultado de recarga calculado hacia la zona costera debería ser mucho menor a 400 mm/anuales para que se dé un proceso de intrusión. Y de hecho, el acuífero

con solo esta recarga, pudiera mantener las necesidades de consumo, sin tocar el volumen de reserva del mismo, que pareciera provenir de otro tipo de fuente superficial o subterránea. De ser esto cierto, se estaría confirmando los resultados obtenidos de los estudios isotópicos e hidrogeoquímicos presentados en el modelo conceptual, que indicaron la posible conexión con otro acuífero cercano llamado Tolú Viejo.

4.3) GEOLOGÍA LOCAL. CORTES GEOLÓGICOS

Los resultados de los cortes se muestran a continuación. Cabe destacar que el corte GG' no fue realizado por falta de información que sirviera para correlaciones geológicas reales.

Como se puede observar de los cortes (Figuras 34, 35 y 36), el comportamiento del acuífero es bastante heterogéneo dada a la naturaleza de sedimentación en la cuenca. Al sur del área, los cortes BB', CC', DD', mostraron el mismo comportamiento confinante en la capa del acuífero superior, a excepción del corte EE' que pasó a ser libre y nuevamente en el corte FF' la capa superior se comportó nuevamente como confinante. Ya hacia el norte de la zona el acuífero es nuevamente libre.

El basamento geológico terciario de las formaciones Cayetano y el Carmen condicionan la forma del acuífero y del basamento, y de hecho, se presume, la presencia de un anticlinal que pudiera estar interviniendo en la disposición final de los sedimentos que conforman el acuífero de Morrosquillo. A pesar de lo difícil que es observar una estructura geológica en material cuaternario, el basamento representado por la lámina 7 o base de la capa 6 mostró claramente la presencia de este pliegue, el cual en la figura 2 (mapa geológico de la zona), se observó al norte y desaparece en el sedimento que conforma el acuífero para ser avistado nuevamente al sur.

Lo que llama la atención de la forma del acuífero, es que no es constante en toda el área. Hacia el sur, en el corte B B' las capas del mismo se mantienen a lo ancho del área, mostrando que el basamento no tiene influencia alguna en la forma del acuífero. En el corte CC' se presentó una de las zonas donde las formaciones terciarias ascienden casi hasta la superficie, separando así el acuífero en dos zonas, pudiendo servir como barrera ante una intrusión salina. Hacia el corte DD' se sigue manteniendo este comportamiento, aunque hacia el este el acuífero aumenta en tamaño y profundidad.

Ya en la zona central del acuífero en el corte EE' cambia la naturaleza hidrogeológica del mismo, de confinada a libre y es donde a partir de este corte, y hacia el norte, esta capa alcanzó los mayores espesores. A partir del corte HH', el desarrollo hidrogeológico del acuífero como multicapa se presentó solo cerca de la costa, y hacia el límite este, se desarrolla como una sola capa, a excepción de la zona de San Onofre donde se presentaron dos capas acuíferas, pero de profundidades no mayores a los 45 metros. Las máximas profundidades alcanzadas por los sedimentos de la Formación Morrosquillo se presentaron al norte del área, pero en la costa alcanzaron los 125 metros de profundidad.

Además de los cortes que mostraron el comportamiento del acuífero a profundidad, también se presentó en este estudio el modelo de elevación de cuencas realizado en Arcgis 9.3, donde se pudo observar la superficie del área del acuífero de Morrosquillo. Las máximas elevaciones topográficas se presentaron al sureste del área a 40 m.s.n.m, las cuales forman parte de las montañas que geológicamente están representadas por la Formación Tolú Viejo.

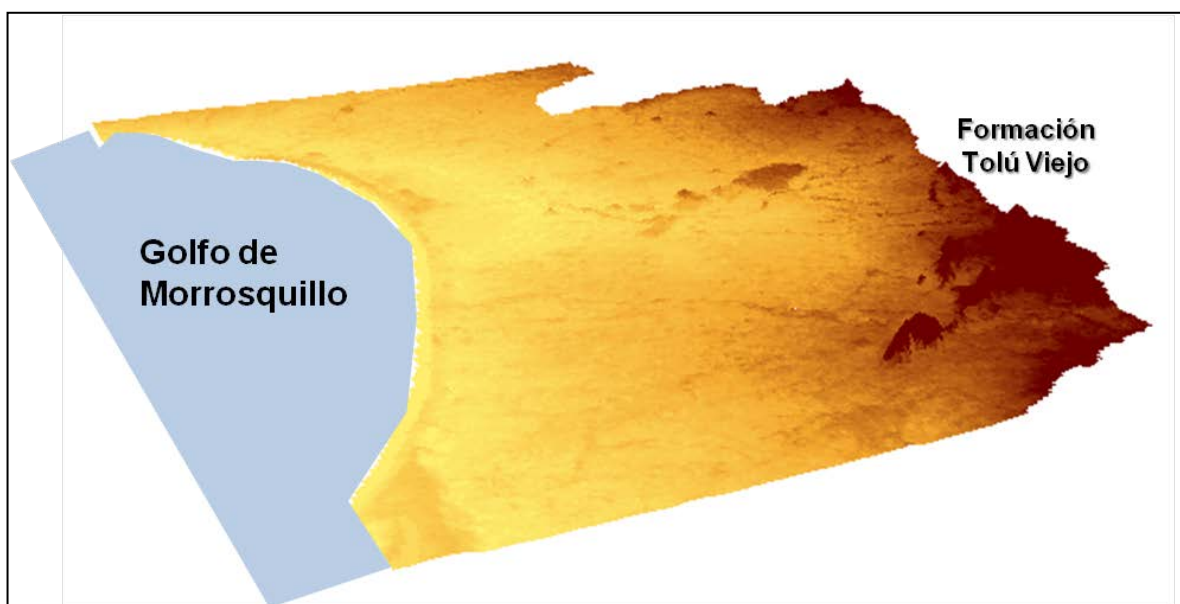


Figura 33.- Modelo de elevación de cuenca en Morrosquillo

Fuente: CARSUCRE (modificado)

De manera general, como fue descrito en el modelo conceptual del acuífero, la zona de estudio se trata de una llanura fluvial, limitada por la costa, con poca variación topográfica (figura 33).

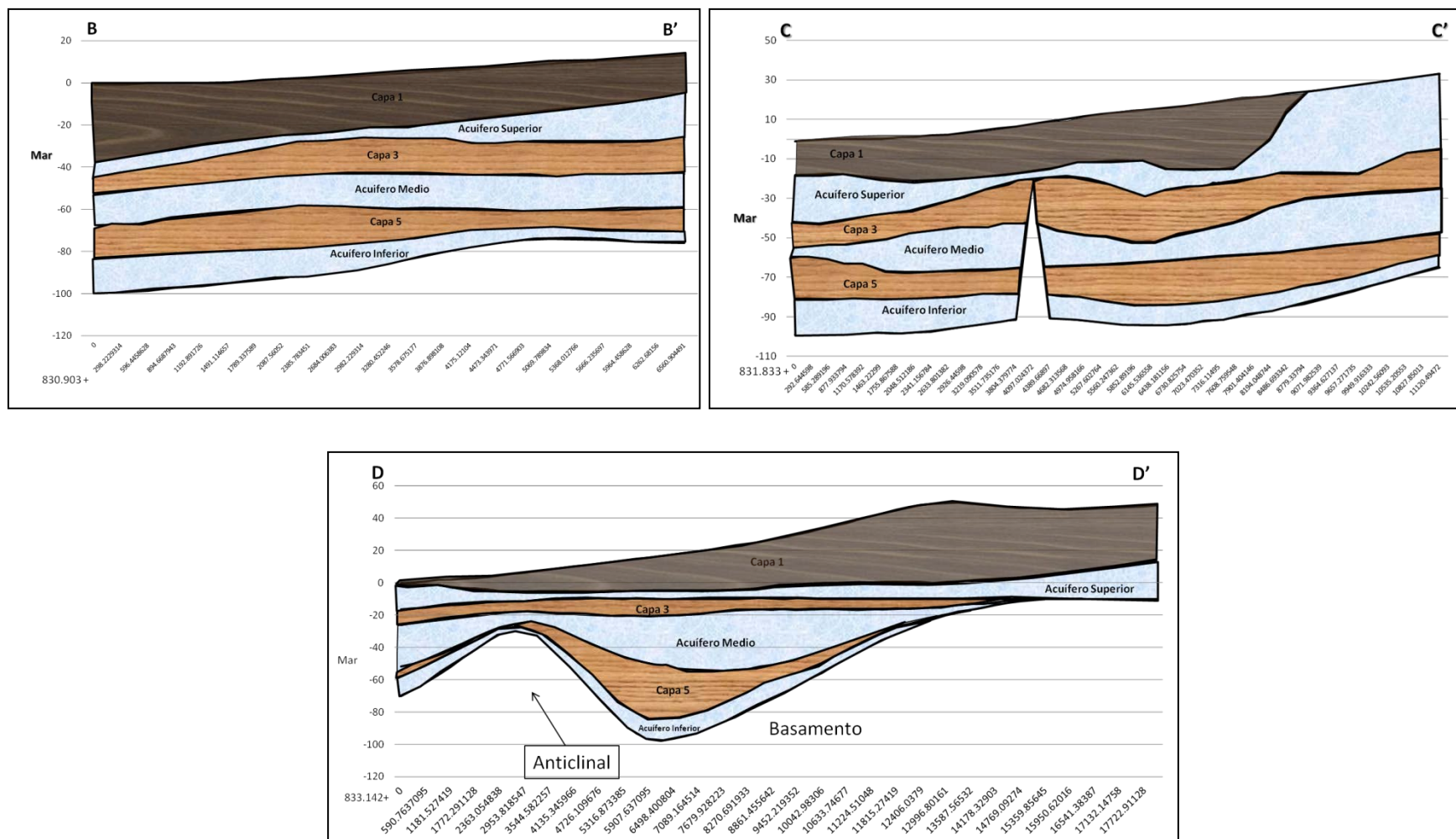


Figura 34.- Cortes Geológicos del acuífero de Morrosquillo (BB', CC', DD')

Elaboración Propia

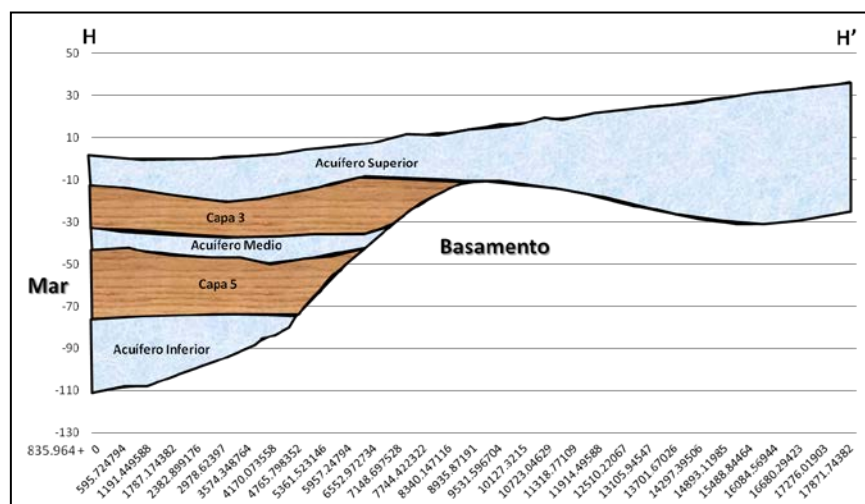
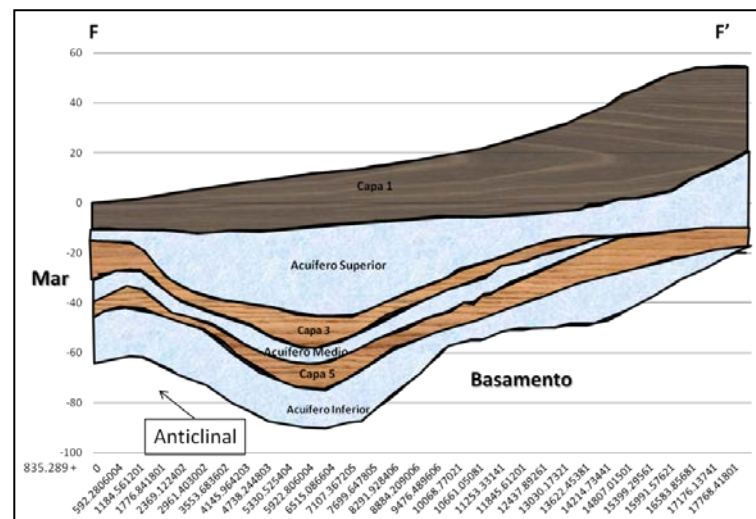
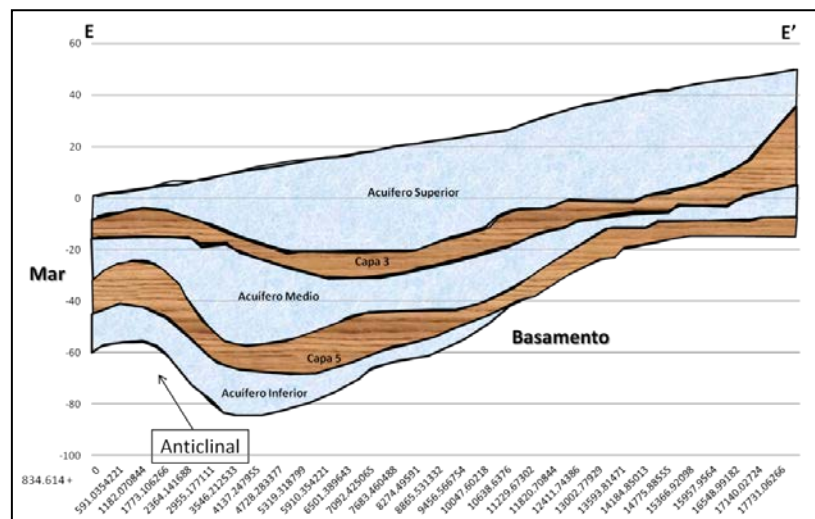


Figura 35.- Cortes Geológicos del acuífero de Morroquillo (EE', FF', HH')

Elaboración Propia

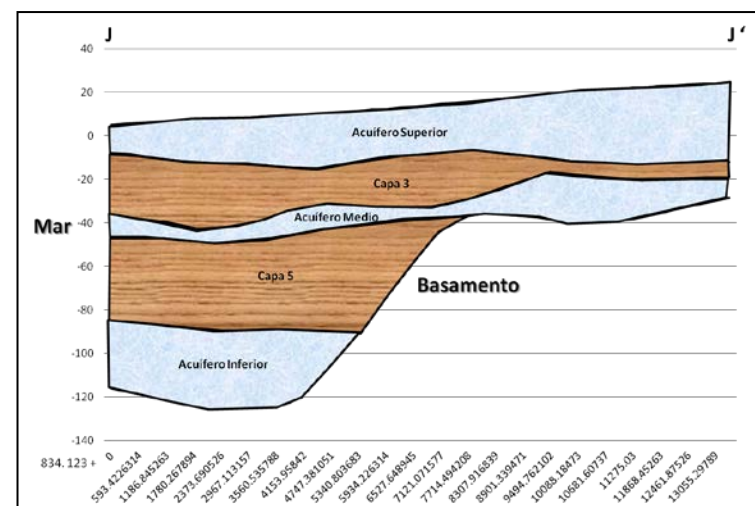
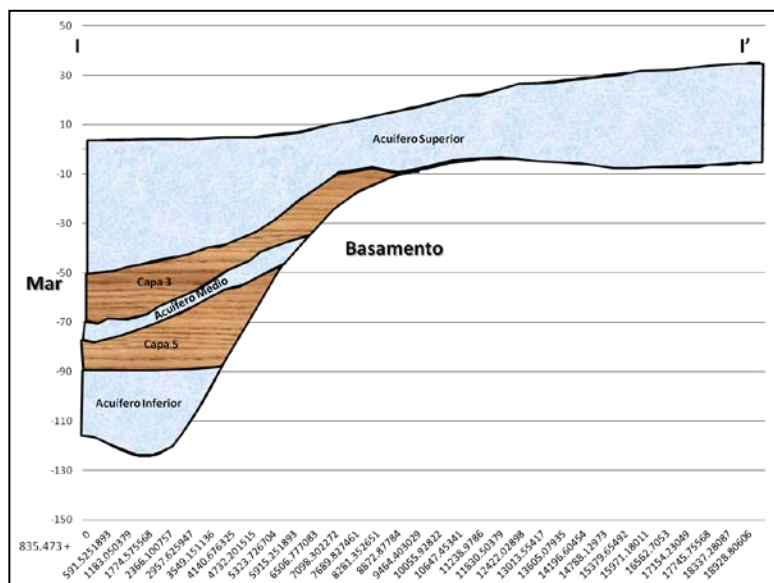


Figura 36.- Cortes Geológicos del acuífero de Morrosquillo (II', JJ')

Elaboración Propia

4.4) REACCIONES QUÍMICAS DE LA INTERFAZ

Los resultados del análisis de las reacciones químicas presentadas en la interfaz de la zona costera mostraron similitudes con los resultados expuestos en el estudio hidrogeoquímico realizado por Martínez en el 2009, y el monitoreo realizado por CARSUCRE en el 2011, pero con algunas excepciones. Los datos analizados se muestran en la figura 37.

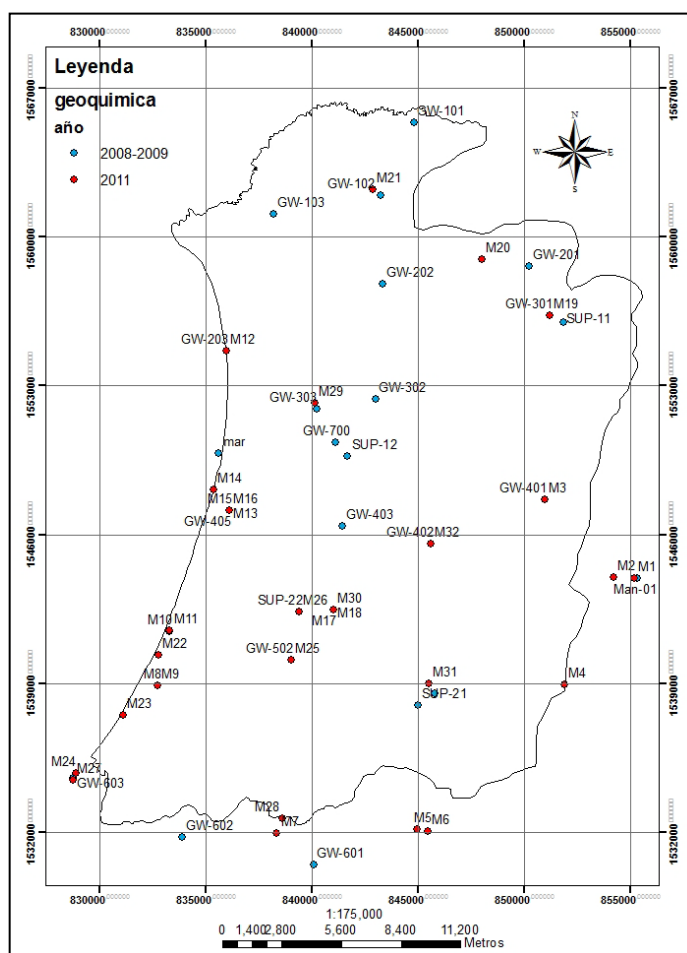


Figura 37.- Ubicación de muestreos hidrogeoquímicos 2008-2009, 2011
Elaboración Propia

El análisis de estos resultados se realizó en solo los puntos próximos a la costa, que es el sitio donde pudiera estar presente la cuña salina. Pero, aunque se aplicó la metodología a todos los puntos, se evidenció que

algunas muestras lejanas a la costa, presentaron en su composición cloruros, y éste se atribuyó a un intercambio iónico en el medio geológico, por ejemplo disolución, el cual pudo hacer que el agua se enriqueciera en ese anión. Un ejemplo de este proceso se presentó en el punto de muestreo GW-402, clasificada por Martínez (2009) como facies mixta, y que aunque no está en la costa, el proceso químico presente mostró ser un intercambio iónico con el sedimento de la zona. Otra muestra con un comportamiento similar es GW-601.

En el caso de las muestras del 2008 (tabla 25), los resultados no evidenciaron la presencia de la cuña salina en la costa, pero si se tuvieron algunas muestras con porcentajes superiores al 1% de agua salada. Según la variación de calcio y sodio de las muestras, se trató de una reacción por ablandamiento, es decir, se trataba de aguas fósiles saladas atrapadas en el sedimento. Un caso de esto es la muestra GW-203 que es el mismo punto de muestreo M12 tomada en el 2011. Se trató de un pozo surgente clasificado como Bicarbonatado clorurado sódico. Según Martínez, este era uno de los puntos que demostraba la presencia de un proceso de contaminación por avance la cuña salina, pero a partir de los resultados obtenidos en esta investigación se descartó esta hipótesis por presentar una reacción química diferente que no indicó un proceso de intrusión.

De las muestras tomadas en el 2009 (tabla 26), el punto GW-404 se clasificó como aguas bicarbonatadas cloruradas sódicas, con más de 2% de agua salada, y según los resultados de variación de los cationes calcio y sodio, se atribuyó la mayor cantidad de calcio a una reacción química por endurecimiento, es decir, a un proceso de intrusión salina.

Otra muestra que según Martínez mostraba evidencia del avance de la cuña salina era GW-800, que es la misma M14 tomada en el 2011,

clasificada como clorurada sódica. Esta muestra presentó más de 8% de agua salada, pero en los resultados de variaciones de calcio y sodio demostró que no se trata del proceso de intrusión, sino de una reacción por ablandamiento, relacionado al sedimento de la zona, el cual fue depositado por un ambiente costero de manglar y de acuerdo a la profundidad del pozo, el cual no es conocido, se presume que esté captando aguas de capas profundas, e incluso podrían tratarse de aguas acumuladas en las formaciones terciarias presentes en la zona de estudio y en el sedimento actual.

El muestreo realizado en el 2011 por CARSUCRE (tabla 27), mostró mayores resultados sobre los tipos de reacciones químicas presentes en la costa. Las primeras muestras M1 a M7 son aguas superficiales de manantiales o en la zona de recarga. Las muestras M8, M10, M11, mostraron claramente una reacción por endurecimiento. Pero, los valores de porcentaje de agua salada son menores al 1%. Sólo en M15 superó el 7%. Lo que demuestra que en la zona de Tolú se está iniciando un proceso de avance de la cuña salina. Aunque, la muestras M12, M13, M14 también están en la zona, no mostraron este tipo de reacción química, sino se obtuvo una reacción por ablandamiento. Según las profundidades de los pozos, se tratan de captaciones profundas. En el caso de la muestra M9, que se encuentra más al sur de esta área, se trata de un piezómetro que capta aguas del acuífero intermedio a 21 metros de profundidad, también se dio que capta agua fósil. Todo esto, lo que evidencia es que la intrusión en la costa no se da en todas partes, ni en todas las capas del acuífero de la misma manera.

Las muestras M15 y M16 se tratan de piezómetros, que captan la capa libre y la semiconfinada. En este punto, la evidencia de avance de cuña por capa fue evidente, ya que en la capa superior (M16) se produjo la reacción

de ablandamiento, y en la capa media (M15) se presentó la intrusión (endurecimiento).

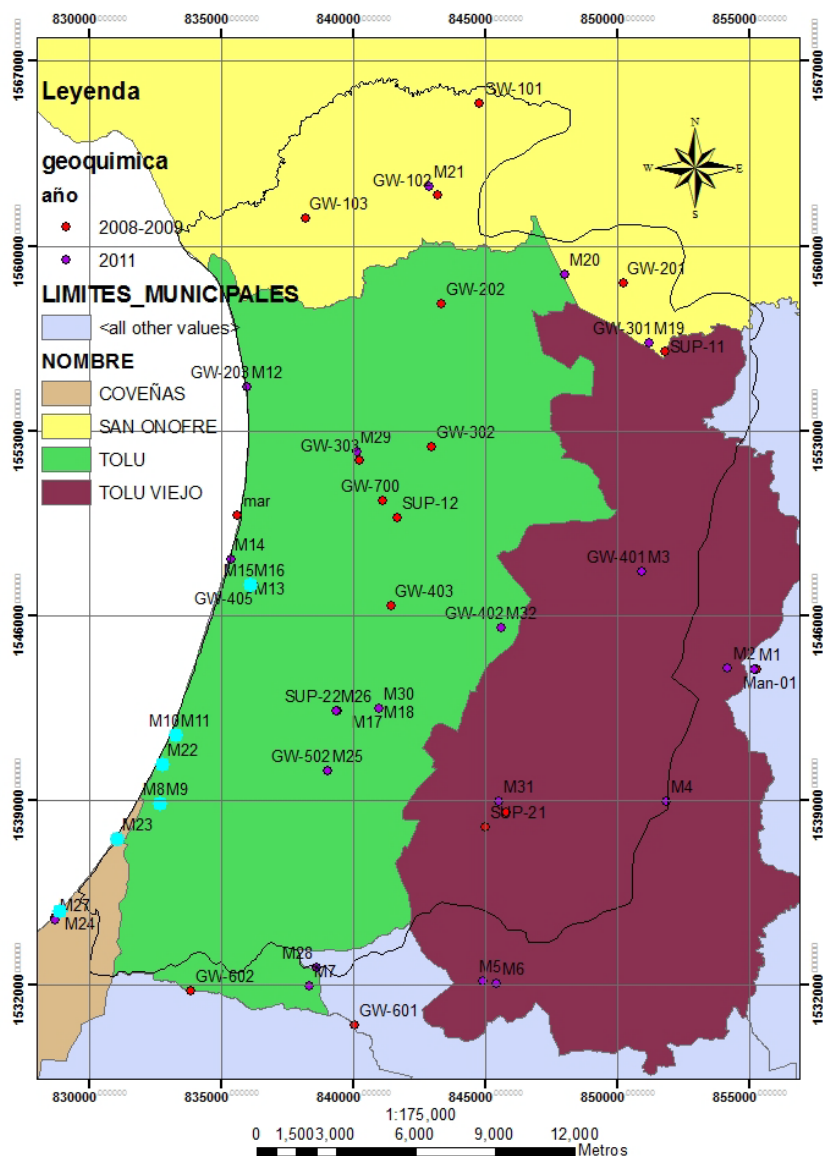


Figura 38.- Muestras con reacción química por endurecimiento. Intrusión Salina
Elaboración Propia

Probablemente esto pudiera estar relacionado con la variación litológica de la zona, la cual pudiera ser más permeable en la capa media, y menor en la superior, dando paso a la intrusión en la capa inferior y no en la libre. Más hacia el sur, en la zona de Coveñas, las muestras M22, M23, M24,

evidenciaron la presencia de la cuña salina. Y en la zona de M27, se produce la reacción de ablandamiento, indicando la captación de agua fósil. Esto puede ser explicado debido a la profundidad de captación del pozo, el cual es superior a los 80 metros, muy cercano al basamento del acuífero.

Los resultados que presentaron la reacción química indicativa de intrusión salina se muestran en la figura 38. Esto evidenció claramente que los inicios del proceso gradual de intrusión salina se estén dando hacia la zona central y sur de Tolú y en la zona de Coveñas, pero no se considera que sea un resultado alarmante que indique un grado de contaminación de las aguas que ponga en riesgo la calidad de estas aguas.

Tabla 25.-

Resultados de reacciones químicas en interfaz de estudio 2008

CODIGO	% agua salada	% agua dulce	agua salada	agua dulce	Ca mezcla	Ca real	Na mezcla	Na real	Δ Ca	Δ Na	Reacción Química en Interfaz	tipo de agua
GW-101	0.40	99.60	0.004	0.996	104.09	58.9	54.77	115	-2.26	2.62		bicarbonatada mixta
GW-102	0.88	99.12	0.009	0.991	105.39	82.8	109.64	125	-1.13	0.67		bicarbonatada mixta
GW-103	0.33	99.67	0.003	0.997	103.90	21.2	46.97	262	-4.14	9.35		bicarbonatada sodica
GW-201	0.00	100.00	0.000	1.000	103.01	90.4	9.45	60.2	-0.63	2.21		bicarbonatada mixta
GW-202	0.39	99.61	0.004	0.996	104.06	46.9	53.85	228	-2.86	7.57		bicarbonatada sodica
GW-203	1.26	98.74	0.013	0.987	106.41	47.5	152.86	337	-2.95	8.01	ablandamiento	bicarbonatada clorurada sodica
GW-301	0.00	100.00	0.000	1.000	103.00	61.1	8.99	14.9	-2.10	0.26		bicarbonatada cálcica
GW-302	0.12	99.88	0.001	0.999	103.34	75.4	23.20	217	-1.40	8.43		bicarbonatada sodica
GW-303	0.48	99.52	0.005	0.995	104.28	60.5	63.15	212	-2.19	6.47	ablandamiento	bicarbonatada sodica
GW-401	0.07	99.93	0.001	0.999	103.18	57.9	16.78	47.4	-2.26	1.33		bicarbonatada cálcica
GW-402	1.04	98.96	0.010	0.990	105.81	196	127.32	197	4.51	3.03		bicarbonatada clorurada sódica-cálcica
GW-403	0.34	99.66	0.003	0.997	103.92	95.6	47.95	102	-0.42	2.35		bicarbonatada sódica-cálcica
GW-404	2.72	97.28	0.027	0.973	110.34	25.4	318.54	838	-4.25	22.59	ablandamiento	bicarbonatada clorurada sódica
GW-405	0.94	99.06	0.009	0.991	105.54	112	116.19	264	0.32	6.43	ablandamiento	bicarbonatada sulfatada sódica-cálcica
GW-501	0.19	99.81	0.002	0.998	103.52	99.3	30.93	87.5	-0.21	2.46		bicarbonatada cálcica
GW-502	0.33	99.67	0.003	0.997	103.89	125	46.64	61.3	1.06	0.64		bicarbonatada cálcica
GW-503	0.04	99.96	0.000	1.000	103.10	81.2	13.38	59.7	-1.10	2.01	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-504	0.23	99.77	0.002	0.998	103.62	113	34.99	86.8	0.47	2.25	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-601	1.90	98.10	0.019	0.981	108.14	269	225.55	150	8.04	-3.28		clorurada-sulfatada cálcica
GW-602	0.41	99.59	0.004	0.996	104.10	106	55.35	119	0.10	2.77		bicarbonatada cálcica-sódica
GW-603	0.24	99.76	0.002	0.998	103.64	77.5	36.17	64.7	-1.31	1.24	ablandamiento	bicarbonatada cálcica-sódica
GW-700	0.32	99.68	0.003	0.997	103.85	43.6	44.94	205	-3.01	6.96	ablandamiento	-
Man-01	muestra agua dulce											bicarbonatada cálcica
SUP-11	0.00	100.00	0.000	1.000	103.00	85.8	8.99	35	-0.86	1.13	observación: son aguas superficiales	bicarbonatada cálcica
SUP-12	0.00	100.00	0.000	1.000	103.00	21	8.99	16.6	-4.10	0.33		bicarbonatada cálcica
SUP-21	0.54	99.46	0.005	0.995	104.46	116	70.35	104	0.58	1.46		bicarbonatada cálcica
SUP-22	0.32	99.68	0.003	0.997	103.86	87.6	45.34	61.8	-0.81	0.72		bicarbonatada cálcica

Tabla 26.-

Resultados de reacciones químicas de interfaz en estudio 2009

CODIGO	% agua salada	% agua dulce	agua salada	agua dulce	Ca mezcla	Ca real	Na mezcla	Na real	Δ Ca	Δ Na	Reacción Química en la Interfaz	tipo de agua
GW-101	0.346	99.654	0.003	0.997	107.92	58.90	48.94	115.00	-2.451	2.872		bicarbonatada mixta
GW-103	0.339	99.661	0.003	0.997	107.90	82.80	48.16	125.00	-1.255	3.341		bicarbonatada sodica
GW-203	1.683	98.317	0.017	0.983	111.48	21.20	201.13	262.00	-4.514	2.647	ablandamiento	bicarbonatada clorurada sodica
GW-301	-0.052	100.052	-0.001	1.001	106.86	90.40	3.63	60.20	-0.823	2.460		bicarbonatada cálcica
GW-303	0.481	99.519	0.005	0.995	108.28	46.90	64.26	228.00	-3.069	7.119	ablandamiento	bicarbonatada sodica
GW-401	0.087	99.913	0.001	0.999	107.23	47.50	19.41	337.00	-2.987	13.808		bicarbonatada cálcica
GW-402	1.839	98.161	0.018	0.982	111.89	61.10	218.81	14.90	-2.540	-8.865		bicarbonatada clorurada sódica-cálcica
GW-403	0.659	99.341	0.007	0.993	108.75	75.40	84.56	217.00	-1.668	5.758		bicarbonatada sódica-cálcica
GW-404	2.719	97.281	0.027	0.973	114.23	60.50	319.00	212.00	-2.687	-4.652	endurecimiento	bicarbonatada clorurada sódica
GW-405	0.786	99.214	0.008	0.992	109.09	57.90	98.97	47.40	-2.560	-2.242		bicarbonatada sulfatada sódica-cálcica
GW-501	0.271	99.729	0.003	0.997	107.72	196.00	40.36	197.00	4.414	6.810		bicarbonatada cálcica
GW-502	0.304	99.696	0.003	0.997	107.81	95.60	44.16	102.00	-0.610	2.515		bicarbonatada cálcica
GW-503	0.043	99.957	0.000	1.000	107.11	25.40	14.37	838.00	-4.086	35.810	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-504	0.219	99.781	0.002	0.998	107.58	112.00	34.47	264.00	0.221	9.980	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-602	0.412	99.588	0.004	0.996	108.10	99.30	56.41	87.50	-0.440	1.352		bicarbonatada cálcica-sódica
GW-603	0.271	99.729	0.003	0.997	107.72	125.00	40.36	61.30	0.864	0.910	ablandamiento	bicarbonatada cálcica-sódica
GW-800	8.519	91.481	0.085	0.915	129.66	149.00	979.07	1642.00	0.9670138	28.822897	ablandamiento	clorurada-sódica
Man-01	0.000	100.000	0.000	1.000	107.00	113.00	9.52	86.80	0.300	3.360	observación: son aguas superficiales	bicarbonatada cálcica
Man-02	0.222	99.778	0.002	0.998	107.59	269.00	34.73	150.00	8.071	5.012		bicarbonatada cálcica
SUP-11	-0.058	100.058	-0.001	1.001	106.85	106.00	2.92	119.00	-0.042	5.047		bicarbonatada cálcica
SUP-12	0.438	99.562	0.004	0.996	108.17	77.50	59.42	64.70	-1.533	0.230		bicarbonatada cálcica
SUP-21	0.843	99.157	0.008	0.992	109.24	43.60	105.52	205.00	-3.282	4.325		bicarbonatada cálcica

Elaboración Propia

Tabla 27.-

Resultados de reacciones químicas en estudio de 2011

No. Muestra CARSUCRE	% agua salada	% agua dulce	agua salada	agua dulce	Ca mezcla	Ca real	Na mezcla	Na real	ΔCa	ΔNa	Reacción Química de la Interfaz	Especie (tipo de agua)
M1	0.07	99.93	0.001	0.999	47.84	110.0	46.63	9.9	3.108	-1.595		Bicarbonatada calcica
M2	0.09	99.91	0.001	0.999	47.88	100.0	48.01	10.6	2.606	-1.627		Bicarbonatada calcica
M3	muestra agua dulce											Bicarbonatada calcica
M4	0.36	99.64	0.004	0.996	48.78	132.0	79.36	28.3	4.161	-2.220		Bicarbonatada calcica
M5	0.40	99.60	0.004	0.996	48.92	177.0	84.17	36.4	6.404	-2.077		Bicarbonatada calcica
M6	0.41	99.59	0.004	0.996	48.93	170.0	84.50	30.8	6.054	-2.335		Bicarbonatada calcica
M7	0.29	99.71	0.003	0.997	48.56	102.0	71.52	77.3	2.672	0.251		Bicarbonatada calcica
M8	0.16	99.84	0.002	0.998	48.13	69.6	56.64	73.2	1.074	0.720	endurecimiento	Bicarbonatada calcica sodica
M9	0.34	99.66	0.003	0.997	48.70	62.0	76.73	162.0	0.665	3.708	ablandamiento	Bicarbonatada sodica
M10	0.15	99.85	0.002	0.998	48.10	72.2	55.65	82.9	1.205	1.185	endurecimiento	Bicarbonatada calcica sodica
M11	0.31	99.69	0.003	0.997	48.61	110.0	73.43	136.0	3.070	2.720	endurecimiento	Bicarbonatada sodico-calcica
M12	1.84	98.16	0.018	0.982	53.57	43.6	246.64	438.0	-0.499	8.320	ablandamiento	Bicarbonatada clorurada sodica
M13	0.82	99.18	0.008	0.992	50.25	110.0	130.73	236.0	2.987	4.577	ablandamiento	Bicarbonatada Sulfatada sodica
M14	8.11	91.89	0.081	0.919	73.98	154.0	958.55	1414.0	4.001	19.802	ablandamiento	Clorurada sodica
M15	7.62	92.38	0.076	0.924	72.39	301.0	903.23	865.0	11.430	-1.662	endurecimiento	Clorurada sodica
M16	3.09	96.91	0.031	0.969	57.67	21.3	389.55	826.0	-1.819	18.976	ablandamiento	Clorurada Bicarbonatada sodica
M17	0.66	99.34	0.007	0.993	49.76	192.0	113.61	66.4	7.112	-2.052		Bicarbonatada calcica
M18	0.50	99.50	0.005	0.995	49.23	157.0	95.03	69.5	5.389	-1.110		Bicarbonatada calcica
M19	0.04	99.96	0.000	1.000	47.72	56.2	42.40	11.7	0.424	-1.335		Bicarbonatada calcica
M20	0.12	99.88	0.001	0.999	47.99	126.0	51.90	55.2	3.900	0.144		Bicarbonatada calcica
M21	0.55	99.45	0.005	0.995	49.38	69.3	100.44	98.5	0.996	-0.084		Bicarbonatada Magnesico sodica
M22	0.30	99.70	0.003	0.997	48.57	137.0	71.98	63.0	4.422	-0.391	endurecimiento	Bicarbonatada calcica
M23	0.22	99.78	0.002	0.998	48.31	67.5	62.83	84.1	0.960	0.925	endurecimiento	Bicarbonatada sodico calcica
M24	1.73	98.27	0.017	0.983	53.23	89.1	234.78	247.0	1.793	0.531	endurecimiento	Clorurada Bicarbonatada sodica
M25	0.39	99.61	0.004	0.996	48.88	149.0	82.85	50.8	5.006	-1.394		Bicarbonatada calcica
M26	0.23	99.77	0.002	0.998	48.35	57.6	64.48	37.4	0.462	-1.177		Bicarbonatada Sulfatada calcica
M27	0.35	99.65	0.003	0.997	48.74	76.0	77.85	147.0	1.363	3.007	ablandamiento	Bicarbonatada sodica
M28	3.81	96.19	0.038	0.962	59.99	447.0	470.55	252.0	19.350	-9.502		Clorurada Calcica
M29	0.59	99.41	0.006	0.994	49.53	59.9	105.70	196.0	0.518	3.926		Bicarbonatada sodica
M30	0.22	99.78	0.002	0.998	48.31	95.4	62.83	45.7	2.355	-0.745		Bicarbonatada calcica
M31	0.09	99.91	0.001	0.999	47.89	113.0	48.34	67.1	3.255	0.816		Bicarbonatada Calcica
M32	2.15	97.85	0.021	0.979	54.59	192.0	282.20	188.0	6.870	-4.096		Clorurada calcico-sodica

Elaboración Propia

4.5) MONITOREO NIVELES 2012

Los resultados de la toma de niveles en campo para este año se realizaron inicialmente con la finalidad de obtener un mapa piezométrico para ser usado en la modelación en Feflow. Pero, se decidió usar finalmente los datos del año 2007, los cuales abarcan de manera más equitativa la zona. Los datos de igual forma se presentaron pero solo para comparar con los datos obtenidos de la modelación matemática (tabla 28).

Tabla 28.-

Resultados de la toma de niveles 2012

CÓDIGO POZO	X	Y	NP	CÓDIGO POZO	X	Y	NP
44-I-D-PZ-09	841003	1542470	11.58	37-III-D-PP-03	845081	1564873	21.76
44-I-D-PZ-10	841003	1522478	14.80	37-III-D-PP-02	844799	1565416	25.70
44-I-D-PZ-11	841003	1542477	45.76	37-III-D-PP-09	844714	1564491	28.95
44-I-D-PO-168	837451	1544937	8.58	44-I-B-PP-75	843348	1557800	11.10
44-I-D-PZ-111	836640	1545064	0.66	44-I-B-PP-62	841725	1553483	13.20
44-I-D-PZ-13	835807	1545267	8.37	44-I-B-PP-52	841116	1550351	10.05
44-I-D-PZ-01	836101	1547145	7.16	44-I-D-PP-34	839119	1548471	10.20
44-I-D-PZ-02	836102	1547152	1.08	44-I-D-PP-28	836721	1547514	9.74
44-I-D-PZ-03	836102	1547157	7.04	SN-1	832900	1533549	6.80
43-IV-A-PZ-04	832713	1538883	8.95	43-IV-A-PP-373	831564	1537241	5.50
43-IV-A-PZ-05	832712	1538886	8.65	SN-2	832417	1534567	6.00
43-IV-A-PZ-06	832718	1538884	9.41	43-IV-A-PP-370	832653	1536399	3.10
43-II-C-PZ-01	833299	1541472	3.51	43-IV-A-PP-02	833260	1532415	13.70
43-II-C-PZ-02	833296	1541473	2.75	SN-3	833826	1532992	19.60
43-II-C-PZ-03	833293	1541476	2.68	SN-4	899264	1532398	14.05
44-I-D-PZ-12	836226	1541154	11.76	SN-5	833146	1533149	5.50
44-I-D-PZ-04	835153	1544710	1.95	43-II-C-PZ-04	833204	1541423	11.96
44-II-A-PP-01	851191	1556331	49.00	43-II-C-PZ-05	832990	1541010	16.72
44-II-A-PP-05	851090	1555640	7.60	43-II-C-PZ-06	832995	1541016	16.56
37-III-D-PP-23	845834	1563479	22.25	43-IV-A-PO-315	827612	1533616	9.10
37-III-D-PP-05	845546	1563905	26.50	43-IV-A-PO-115	830777	1537050	3.30
37-III-D-PP-08	844166	1565234	28.40	43-IV-A-PO-33	832206	1539419	0.05
37-III-D-PP-14	843703	1564556	19.80	37-III-D-PP-06	844788	1564262	28.75
37-III-D-PP-07	844615	1564686	25.20	37-III-D-PP-04	845252	1564444	28.76

Fuente: Monitoreo acuífero de Morrosquillo de CARSUCRE, 2012

4.6) MODELACIÓN MATEMÁTICA. DATOS INTERPOLADOS

4.6.1) Carga Hidráulica

Los datos de los niveles de agua como se indicó en la metodología pertenecen a la piezometría medida en el 2007 usada en el estudio de Martínez en el 2009. En la figura se muestra los resultados de la interpolación realizada por Feflow, junto con las líneas de flujos.

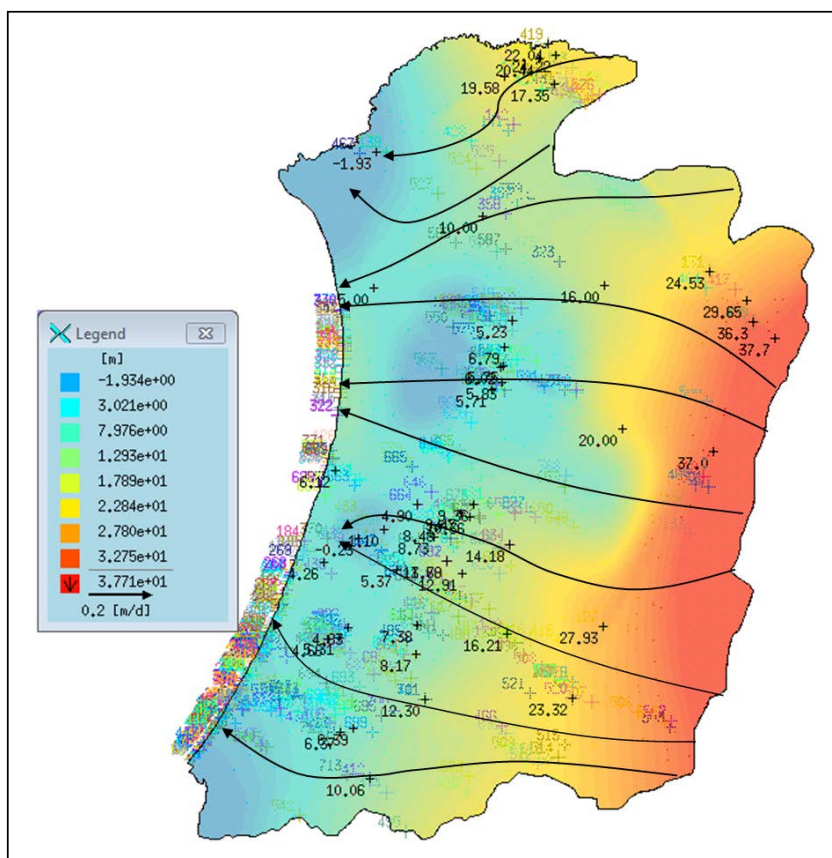


Figura 39.- Niveles de agua modelados en feflow, líneas de flujo

Elaboración Propia

Las mayores profundidades del agua se presentaron en las cercanías con la frontera oriental del modelo, las cuales llegan a profundidades de 38 m. En la zona nororiental, específicamente en San Onofre, los niveles en la frontera son un poco menores de 23 m, lo que está relacionado a las profundidades del acuífero en esta área. Como es de esperar en un acuífero costero, las

líneas de flujo llegan ortogonalmente a la costa. A excepción de las zonas donde se presentaron algunos pozos saltantes. Además, que las líneas piezométricas también se mostraron perpendiculares a los bordes norte y sur por haberse asumido como impermeables (figura 39).

4.6.2) Condiciones de los Materiales

4.6.2.1) Permeabilidad

La capa 1 por ser confinante le fue asignada un valor de comportamiento impermeable. Respecto a las capas de los acuitardos, los valores se mantuvieron constantes en todo el espacio del acuífero, siendo mayor en el primer acuitardo, debido a que, esta capa tiene interacción de flujo con la capa superior e inferior a la misma; y respecto al segundo acuitardo, las condiciones se colocaron menos permeables, de manera de simular que su capacidad de transmitir agua hacia el acuífero inferior fuera menor.

Pero la permeabilidad en las capas acuíferas, el comportamiento es diferente en cada una de ellas. Para la capa 2, las permeabilidades son bajas en casi todo el acuífero. Sólo hacia la zona de Tolú se presentaron las mayores permeabilidad, al igual que hacia San Onofre. De manera general, se trataría de una capa con poca capacidad de transmitir o almacenar agua, y se consideraría un acuífero pobre. Para el acuífero intermedio las máximas permeabilidades se presentaron al sur del área cercano al arroyo San Antonio y en Coveñas. Aunque, el acuífero disminuye en espesor hacia el límite occidental, el modelo asumió una permeabilidad en la totalidad de la zona modelada, pero esto no es cierto, ya que en esta área no hay desarrollo de esta capa acuífera, y una vez comenzada la simulación en Feflow el programa se encargó de ajustar esas interpolaciones a la realidad y se asume que descartó esta zona del acuífero. Lo mismo ocurrió con el acuífero inferior, el cual no está desarrollado en la zona occidental. De manera general, el acuífero de Morrosquillo tiene un comportamiento pobre, con

bajas transmisividades, pero con algunas excepciones, lo que pudiera estar relacionado con los ambientes sedimentarios que generaron inicialmente a este acuífero. Los resultados de permeabilidad por capa se muestran en las figuras 40 y 41.

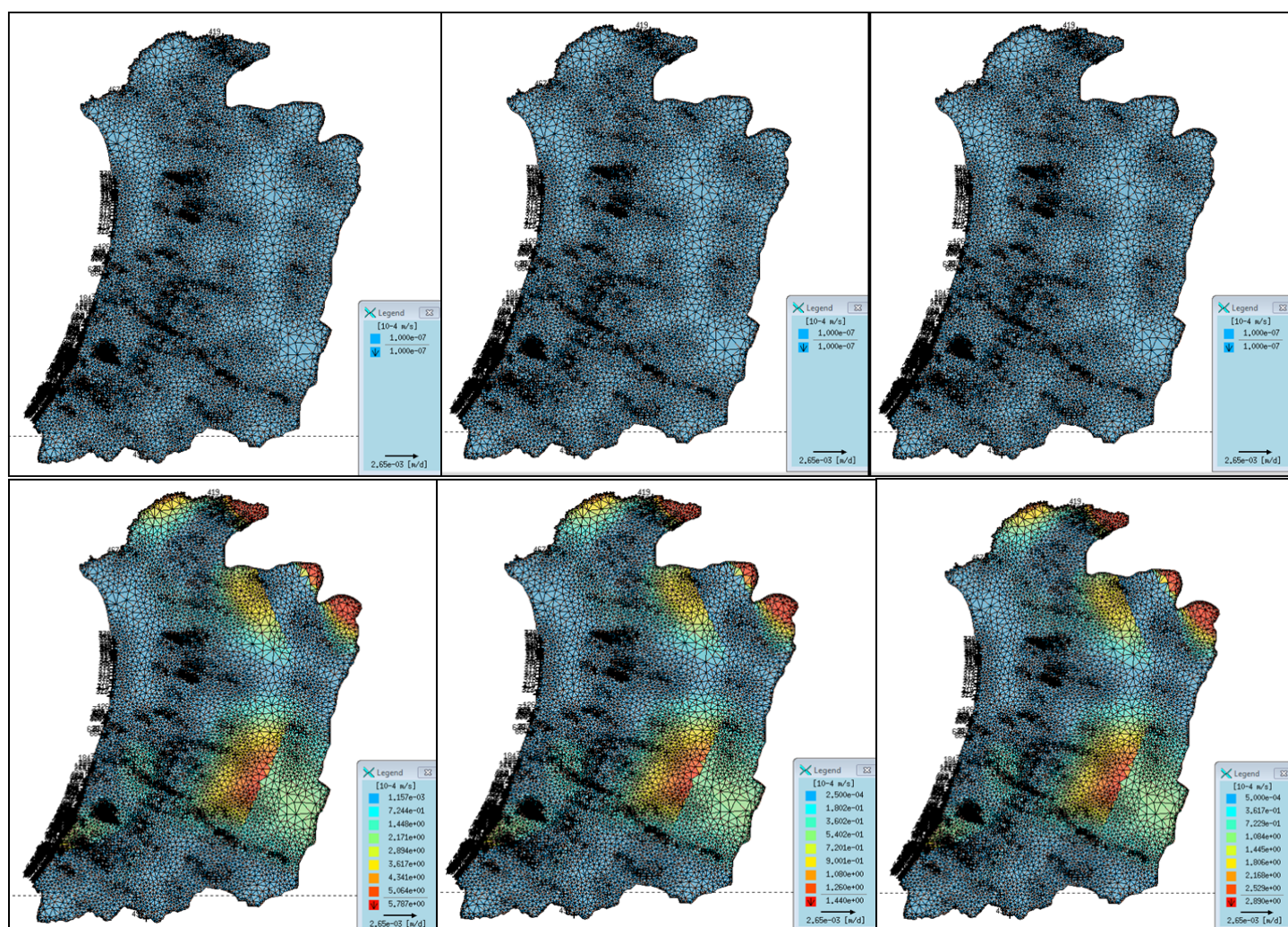


Figura 40.- Permeabilidades modeladas en feflow. Arriba capas 1, 3 y 5. Abajo capa 2 (Kx, Ky, Kz)

Elaboración Propia

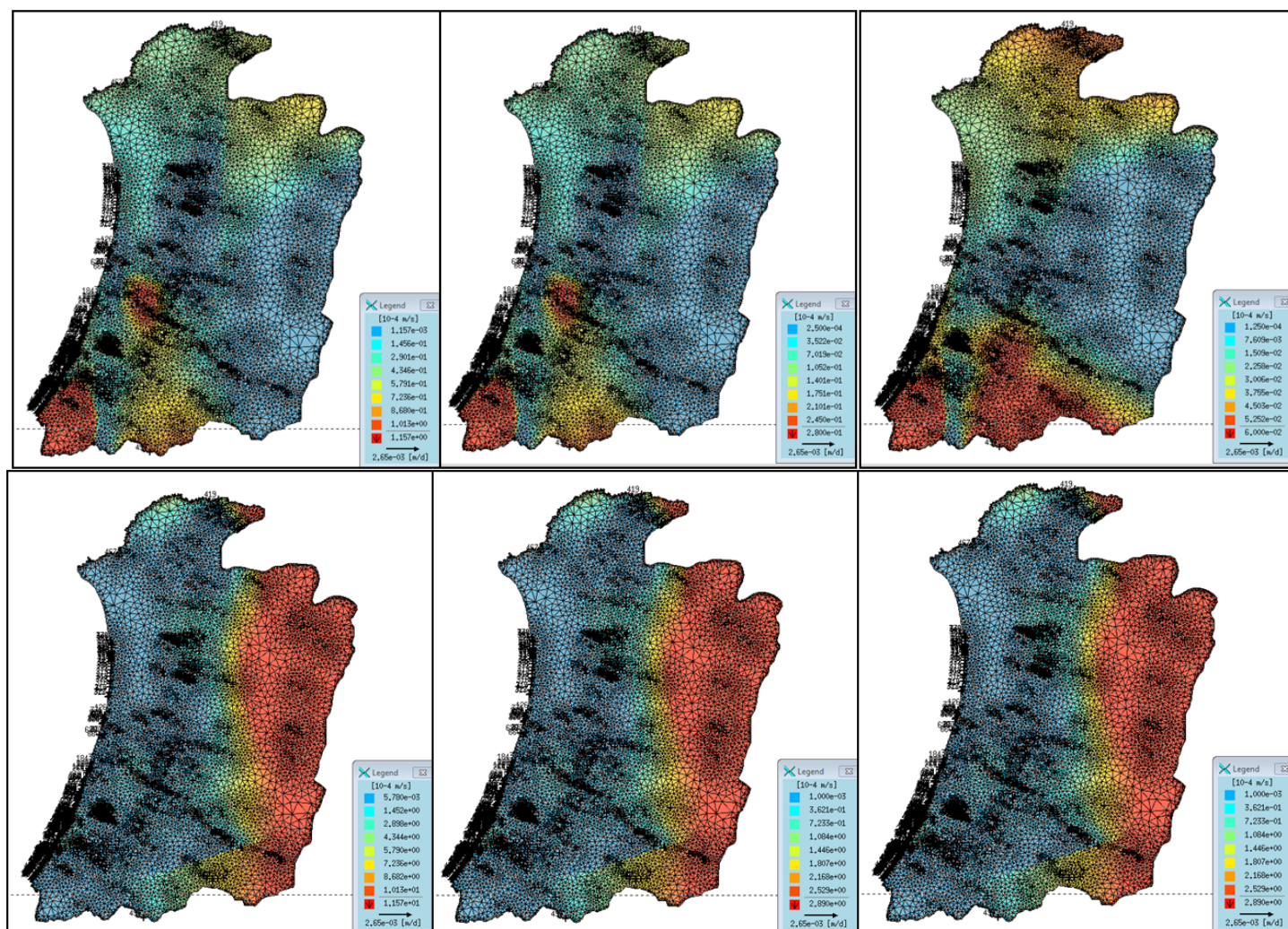


Figura 41.- Permeabilidades modeladas en feflow. Arriba capa 4 (Kx, Ky, Kz). Abajo Capa 6 (Kx, Ky, Kz)
Elaboración Propia

4.6.2.2) Coeficiente de almacenamiento

Los coeficientes de almacenamiento de las capas 1, 3, 4, 5, 6 se mantuvieron en todo el espacio modelado, a excepción de la segunda capa acuífera. En la figura se muestra la distribución de la naturaleza variable del acuífero superior. Hacia el sur y gran parte de la costa el acuífero tiene un comportamiento confinante. Hacia el borde occidental del mismo su naturaleza es libre, al igual que hacia la zona de San Onofre (figura 42).

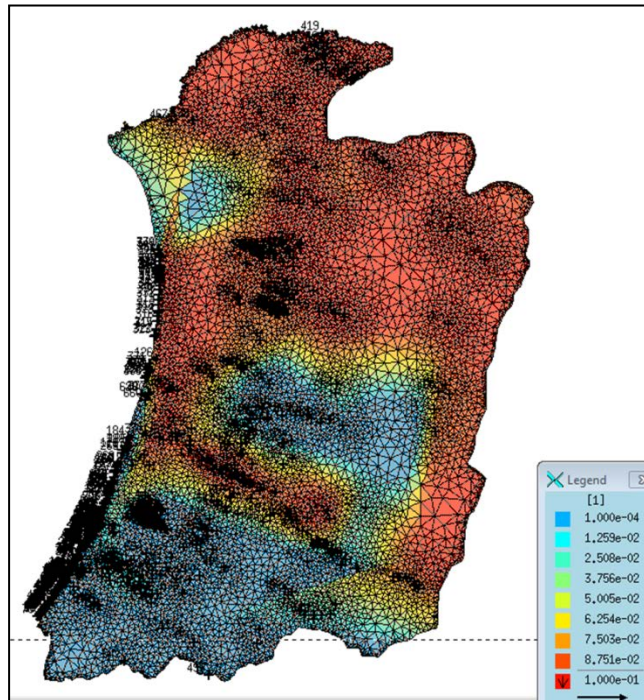


Figura 42.- Comportamiento semiconfinante de la capa 2

Elaboración Propia

4.7) RESULTADOS MODELACIÓN MATEMÁTICA

La modelación inicialmente iba a ser realizada para 365 días, aunque en realidad, sólo se obtuvieron resultados para 230 días. El programa arrojó tres gráficas de importancia. Una de ellas relacionada a la variación de carga hidráulica en pozos, otra al avance del contaminante (cuña salina) y la última relacionada a la variación de contaminante en puntos de observación.

4.7.1) Variación Carga Hidráulica

En la figura 43 se pueden observar las variaciones de carga hidráulica de los pozos modelados. Debido a la cantidad de pozos usados en la simulación, la gráfica obtenida por el programa no muestra claramente cuáles son los pozos con problemas. De manera general, se observó la falta de agua en el modelo, lo cual quedo evidenciado por algunos pozos que

presentaron una tendencia decadente en sus valores, es decir que poco a poco se van secando. Pero este resultado no coincide con las condiciones reales en la zona, evidenciadas por los valores de niveles de agua medidos en este estudio (2012), los cuales mostraron que la variación de niveles en el acuífero desde el 2007, no ha sido significativa en el tiempo (tabla 27). Especialmente, cuando en los años 2010 y 2011 se presentaron picos de precipitación anormales en la zona, los cuales están relacionados con el fenómeno de la niña, y permitió una mayor recarga por agua de lluvia al acuífero en este periodo de tiempo.

Por otra parte, se presentaron algunos pozos como saltantes, pero este resultado no coincide con la realidad. Esto se observó en el punto del pozo 417, que se encuentra al noreste en la zona de San Onofre, cercano al borde de frontera por carga hidráulica. Este resultado demostró que con las condiciones iniciales modeladas, en este punto está entrando mayor cantidad de agua que la real, o la permeabilidad modelada no coincide con la real; es decir, en este punto la permeabilidad debería de ser mayor.

En la figura 44 se muestran algunos pozos resaltados en color azul, que son aquellos pozos que en la figura 42 presentaron mayor pérdida de niveles de agua, al punto en el que algunos de ellos, llegaron a descender a los niveles de profundidad del acuífero, es decir, que se secaron por completo.

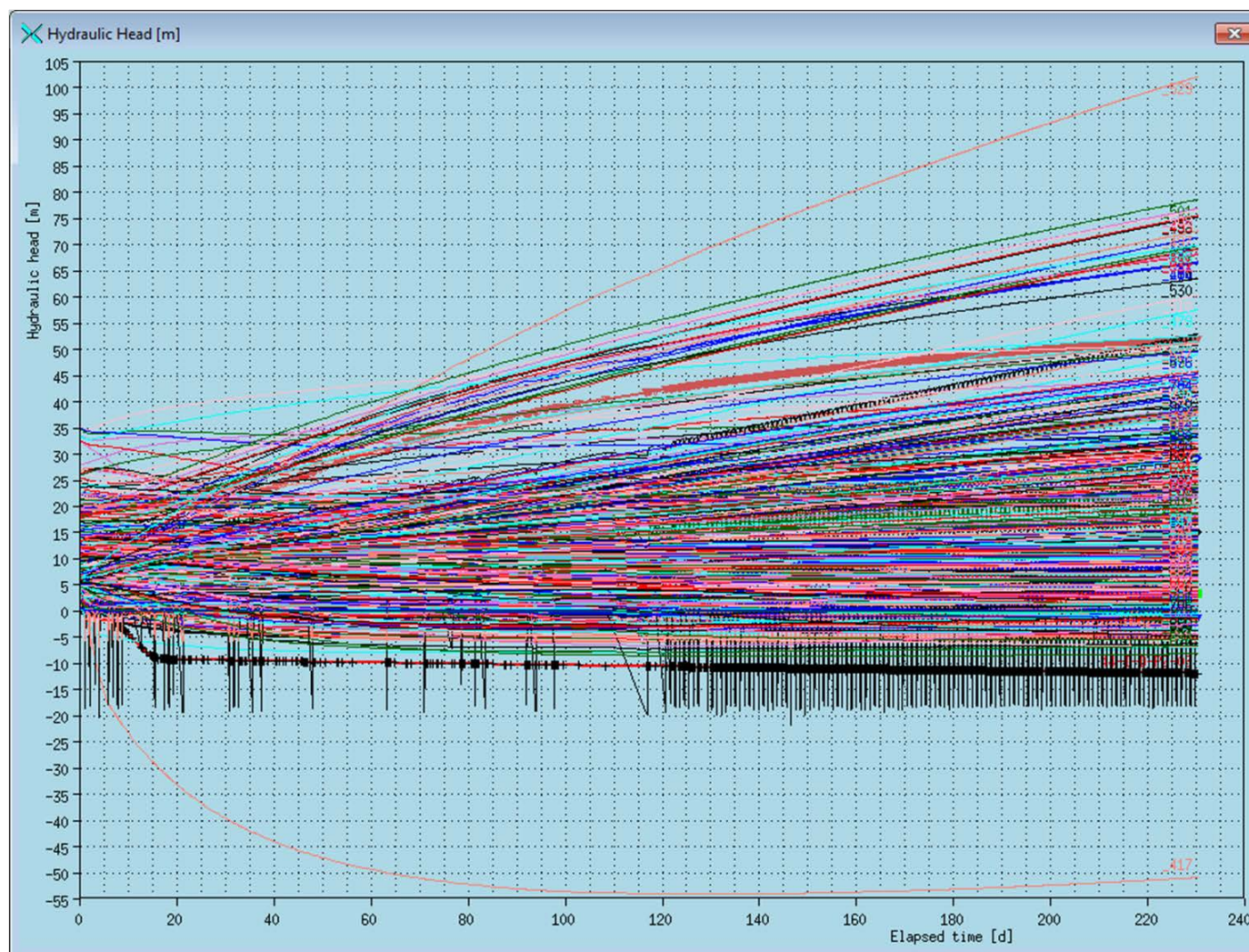


Figura 43.- Resultados de Feflow en variación de niveles a 230 días

Elaboración Propia

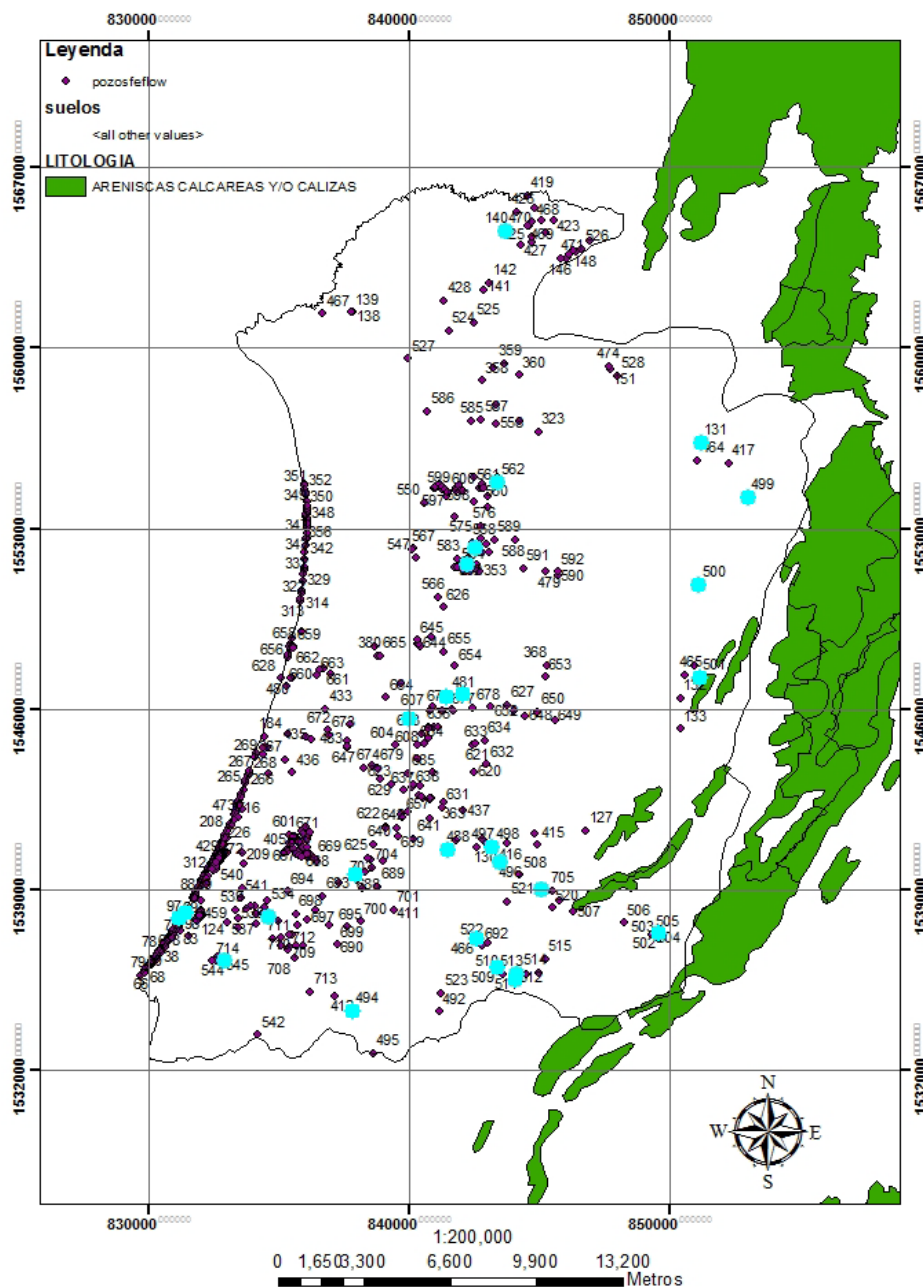


Figura 44.- Pozos con mayores descensos en los niveles de agua en el modelo
Elaboración Propia

En este análisis es importante señalar, que la variación de la carga hidráulica estuvo condicionada por un valor de recarga superior al asumido en este estudio que era de 443 mm/año. Este dato fue modificado a medida

que se fueron realizando modelaciones de prueba, las cuales demostraron, que ese valor de recarga distribuido en polígonos (Figura 32), no era suficiente para abastecer la descarga simulada en Feflow. De hecho, el último valor introducido al modelo fue 50 veces superior a esta recarga, y aún así resultaron zonas con tendencia a decaer los niveles de agua en los 230 días modelados.

Este resultado en las cargas hidráulicas del acuífero indicaron que las condiciones físicas de los materiales modelados que conforman la cuenca no son del todo correctos; y de hecho, se pudiera decir que las permeabilidades fueron mayores a las reales, y que las condiciones de almacenamiento debieron ser superiores a las asumidas en este estudio. Además, no se tomó en consideración la posible descarga de agua dulce que se pudiera estar dando hacia el golfo de Morrosquillo, y todo pareciera indicar, que las permeabilidades asumidas en la costa permitieron que la carga de agua dulce introducida saliera del sistema rápidamente por esta vía, y que la reserva de agua del acuífero se esté dando por otros medios de recarga.

Llevando el modelo a la realidad, esto demuestra que de hecho la hipótesis aportada por Herrera y Gutiérrez (2011), de que existe una conexión que recarga al acuífero de Morrosquillo por medio del acuífero de Tolú Viejo sea cierta.

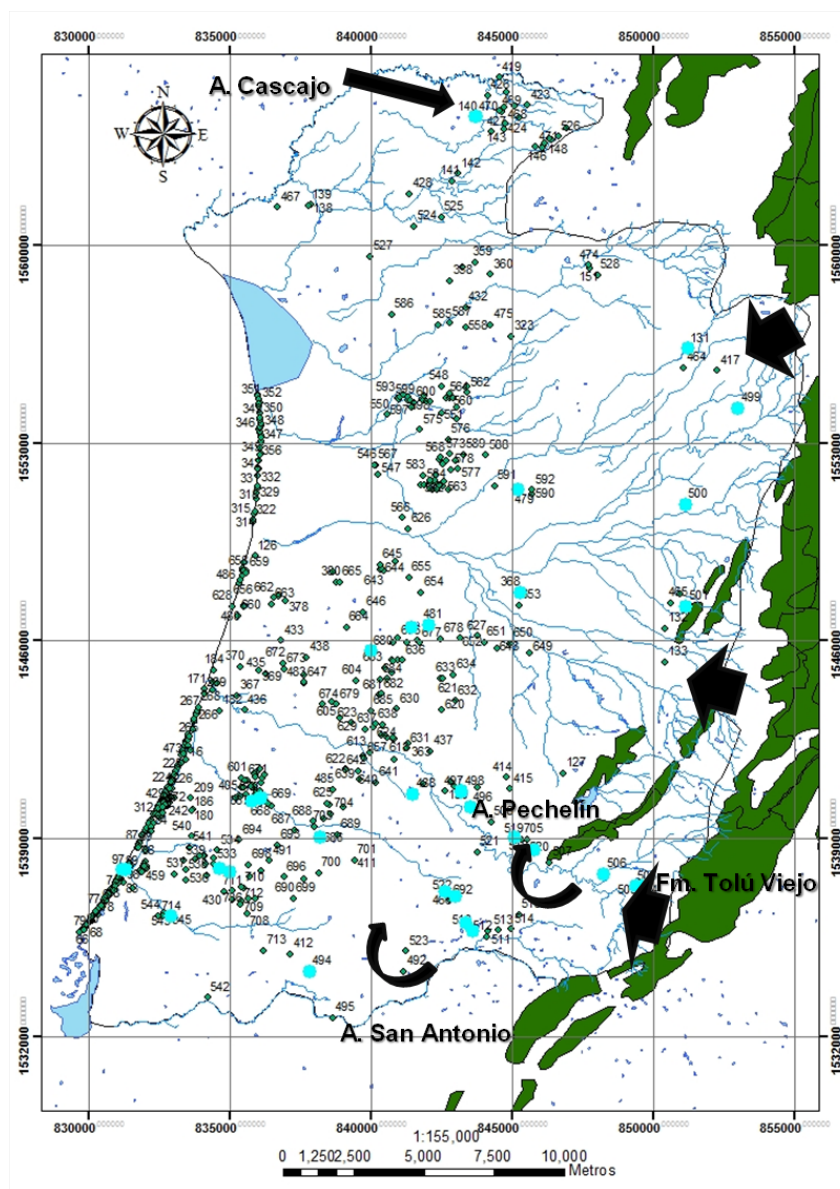


Figura 45.- Posibles recargas hacia el acuífero de Morrosquillo.

Elaboración Propia

Otra observación realizada en el análisis de los resultados obtenidos, estuvo relacionado a los mayores descensos que se presentaron hacia el sur del modelo, lo que demostró que también se podría estar dando una transferencia entre los arroyos y el acuífero, el cual probablemente se dé

mejor en época de lluvia, específicamente entre el arroyo Pechelín y el arroyo San Antonio. En la parte de san Onofre probablemente la recarga se dé por el arroyo Grande y por el arroyo Cascajo, específicamente hacia la zona suroriental donde el acuífero tiene un comportamiento libre.

Los puntos cercanos a los arroyos que mostraron esta tendencia de disminución de sus niveles, puede deberse a que los valores de permeabilidad y coeficientes de almacenamiento interpolados son mayores a la realidad, y que por esos sectores, pudiera haber una recarga directa con estas fuentes superficiales, pero que el agua que está entrando al sistema fluye rápidamente y no permite la acumulación del agua en esos puntos, lo cual no es cierto. Esta relación coincide con muchos de los resultados hidrogeoquímicos obtenidos en el 2009, e isotópicos del 2011, que mostraron que las muestras cercanas a estas fuentes tienen las mismas marcas químicas e isotópicas a estos arroyos, lo que afirmaría este tipo de recarga. Otra teoría de los descensos en estos puntos cercanos a las fuentes superficiales, pudiera deberse a que las extracciones asumidas para esos puntos superaron al agua almacenada en el sector, y la cantidad de agua que entra rápidamente al sistema es captada por el pozo, produciendo el descenso generalizado del nivel de agua.

En la figura 45 se muestra los sitios que posiblemente sean los responsables de aportar una mayor cantidad de agua al acuífero por recarga, ya sea producto de la conexión con el acuífero de Tolú Viejo, o por fuentes superficiales; y que a su vez, son estas las conexiones responsables de mantener la reserva del acuífero, a pesar de la extracción del recurso; permitiendo inferir, que este es el volumen responsable de mantener la interfaz de la cuña salina relativamente controlada debido a esta actividad de descarga.

4.7.2) Avance del Contaminante. Cuña salina

Los resultados obtenidos en esta modelación, en la cual se asumió una recarga por agua de lluvia, demostraron irregularidades en las condiciones de los materiales que conforman el acuífero, ya que a pesar de la gran recarga introducida, esta no fue suficiente para igualar las condiciones actuales reinantes en la zona del acuífero de Morrosquillo.

A partir de los estudios hechos por Gutiérrez en el 2005 y Martínez en el 2009, ya era conocido que en el área se estaba presentando un proceso de contaminación gradual relacionado a la intrusión salina. En este estudio, aún con estas condiciones modeladas, las cuales son el peor escenario posible que se pudiera presentar en el acuífero (recarga sólo por lluvia), demostraron que el avance de la interfaz es un hecho pero en un grado bastante bajo. En la figura se puede mostrar los resultados de la modelación en planta, la cual demostró ciertas zonas de vulnerabilidad al proceso de contaminación salina. La parte norte del golfo presentó la interfaz en mayor grado, pero esto no se debe a la extracción de agua dulce en la zona específica, ya que en ésta no se da ningún proceso de extracción, sino se relaciona a la topografía. Además, esta área es protegida por la presencia de manglar.

Avanzando hacia el sur del área, desde donde comienzan a presentarse pozos de extracción, es decir, al norte de tolú, se avistan los inicios del avance de la cuña salina, pero no son de importancia debido a que el caudal extraído es bastante bajo respecto a los pozos presentes al centro y sur del área, y además, quizás las condiciones de permeabilidad asumidas hayan sido muy elevadas y permitieron que un avance de la cuña, cuando no es así (figura 46).

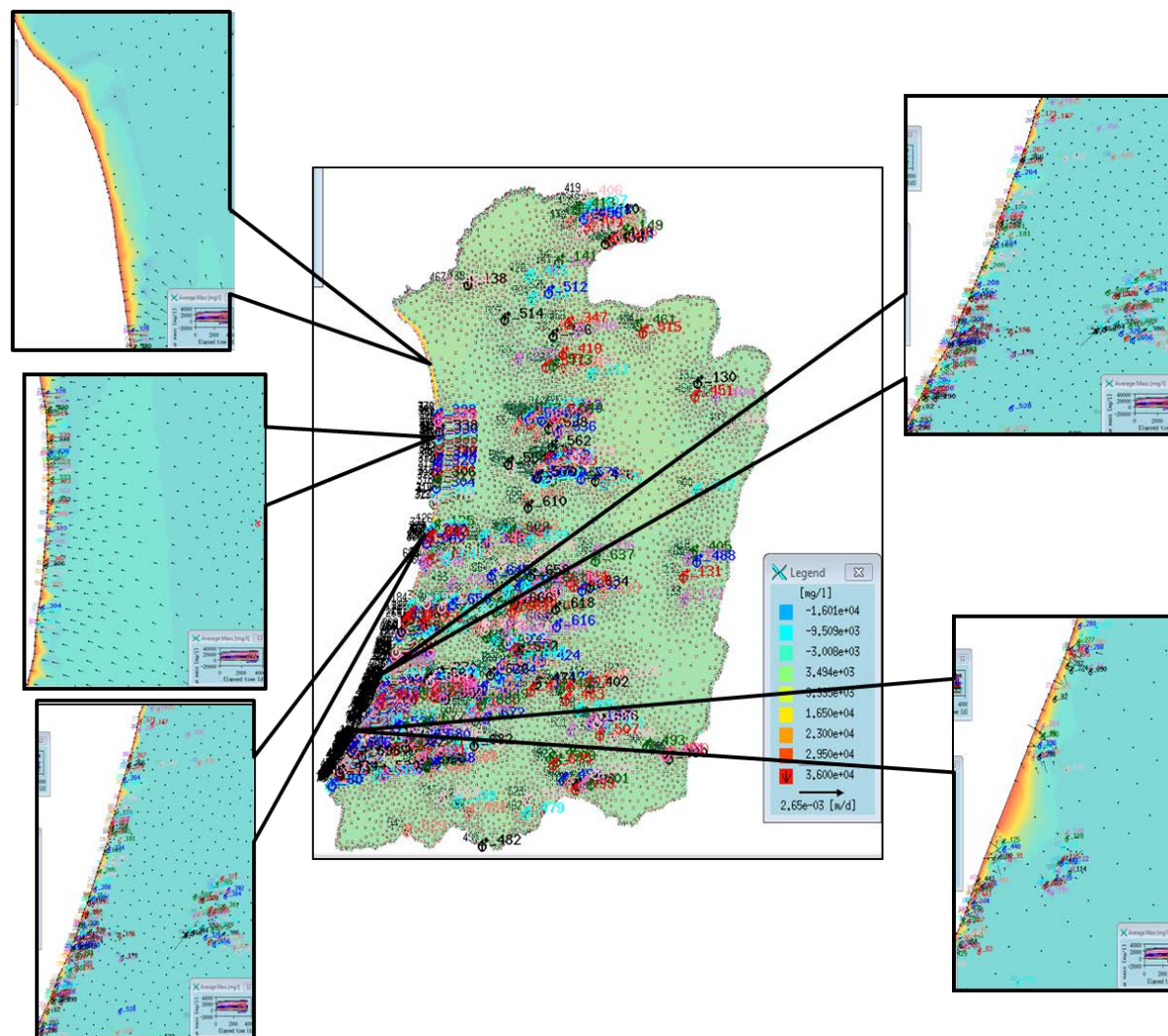


Figura 46.- Avance de cuña salina según la modelación en Feflow.

Elaboración Propia

Ya en la zona central de Tolú se muestra claramente el avance de la intrusión salina, al igual que al norte de Coveñas. Esta información respalda los estudios hidrogeoquímicos realizados tanto por Martínez en el 2009, como por el muestreo realizado por CARSUCRE en el 2011 (figura 38). La salinización se da sobretodo en la primera y segunda capa acuífera, y aún no hay evidencias de que el proceso de salinización se haya presentado en pozos profundos. Esta información es de suma importancia, ya que de hecho, la mayoría de los pozos con grandes caudales presentes en la zona son pozos profundos. Si aún se quisiera realizar nuevas concesiones de pozos debe ser tomado en consideración esta observación, para así no permitir que la contaminación de las capas superiores del acuífero siga avanzando.

Los pozos con mayores valores de salinidad se encontraron al sur del modelo, pero, estas condiciones de salinización son más exageradas que las presentadas actualmente en la región. Según los resultados de la modelación matemática, algunos pozos como 52 y 53 extraen agua salada, con concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) que alcanzan los 36000 mg/l, el cual es el valor de STD en agua de mar (figura 47). Claramente indicaron que no hay presencia de agua dulce, pero esto no es cierto, lo que quiere decir, que en esta zona específica se deben presentar flujos regionales de agua dulces (ya sea por los arroyos o por la posible conexión con el acuífero de Tolú Viejo), y que son estos los responsables de empujar la interfaz; además, que los resultados de los monitoreos hidrogeoquímicos actuales no muestran una intrusión a este grado, y de hecho permiten afirmar que se están presentando los primeros indicios de este proceso de contaminación pero en muy bajo grado. Además, la litología presente tierra adentro en esta zona, demostró que se trata de materiales permeables, que podrían favorecer el flujo de aguas subterráneas provenientes de las cercanías de los bordes sur y este del modelo.

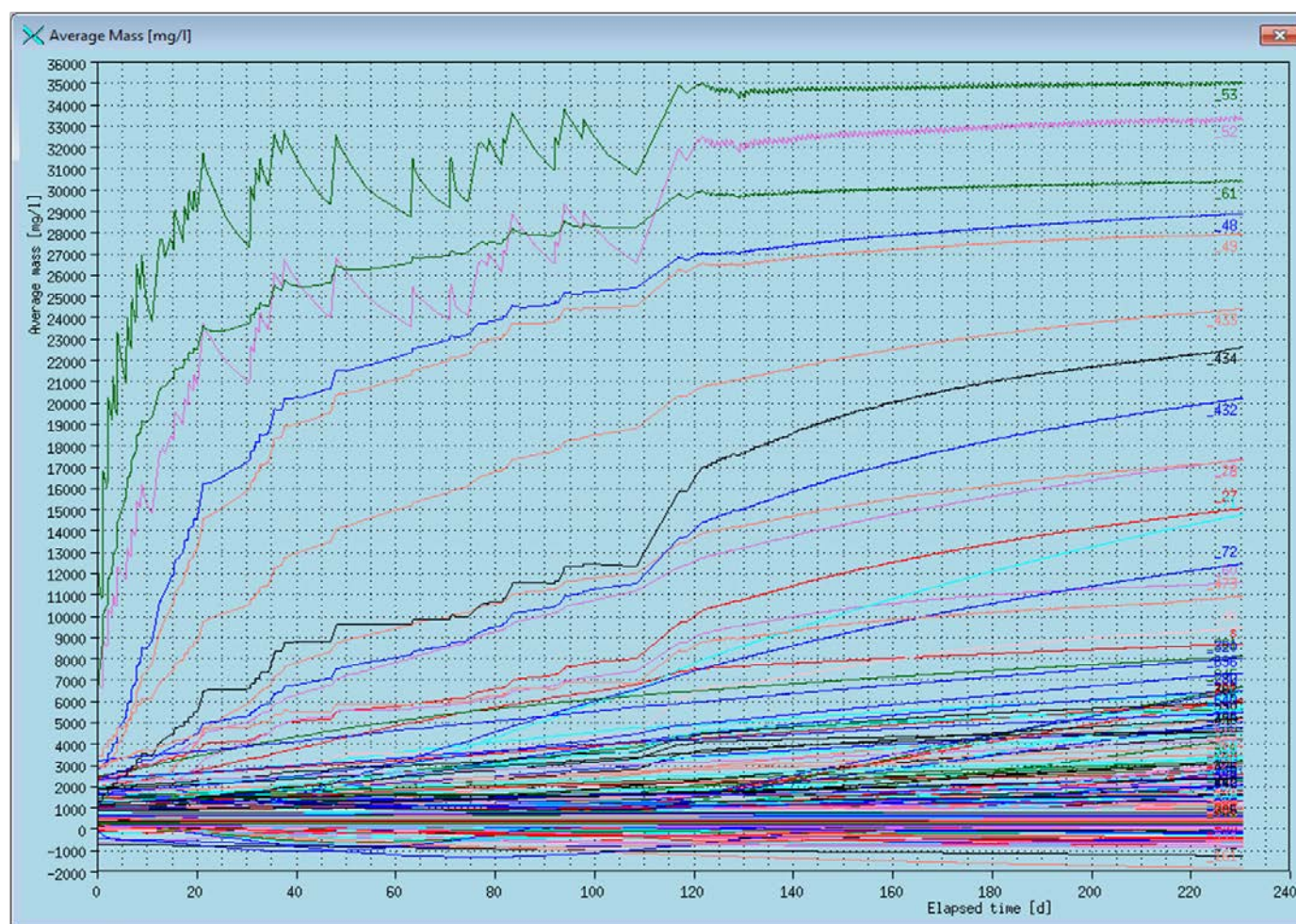


Figura 47.- Resultados de pozos salinizados en modelación de 230 días

Elaboración Propia

De hecho, los resultados obtenidos que indicaron intrusión, coinciden con los mismo resultados del estudio hidrogeoquímico del 2009 y 2011, los cuales se analizaron en esta investigación para conocer el tipo de reacción química presente en la costa. Esta información puede ser verificada observando la figura 48.

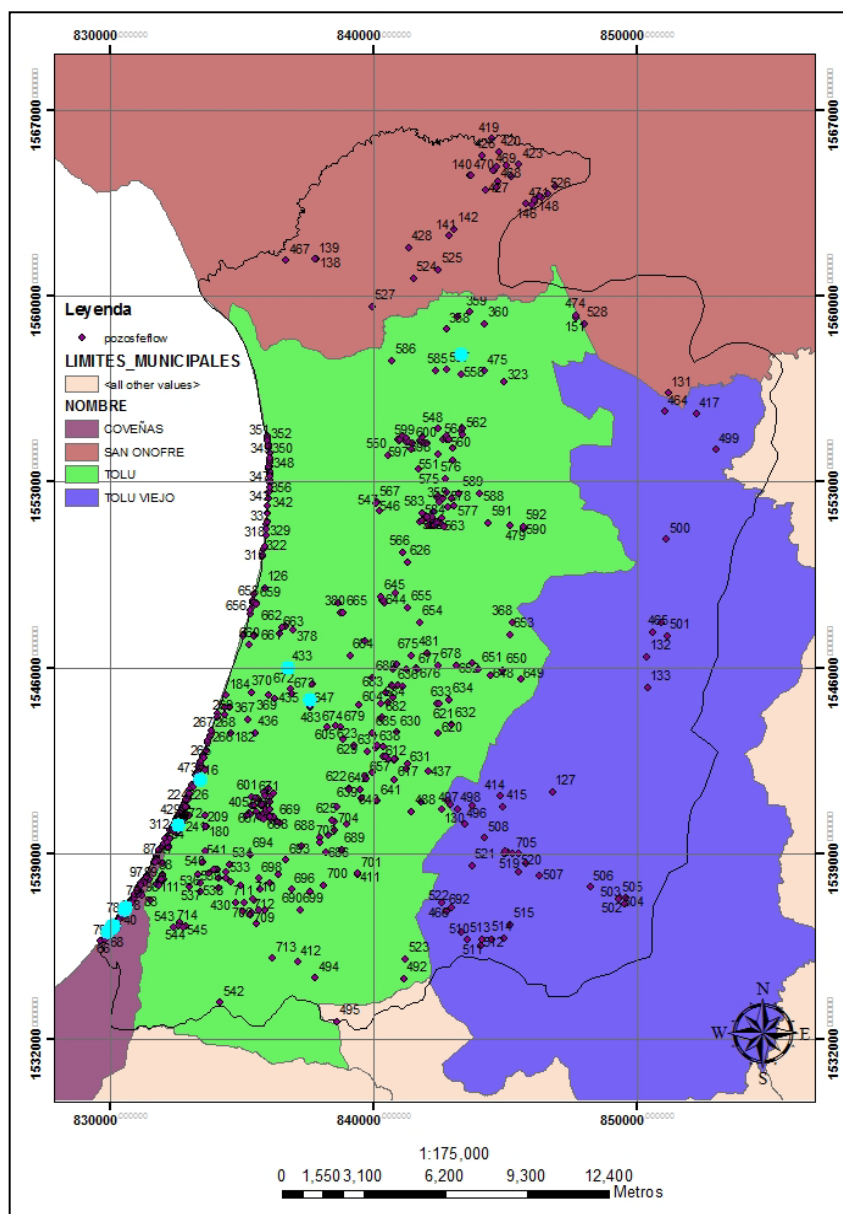


Figura 48.- Pozos salinizados en modelación con FEFLOW

Elaboración Propia

4.7.3) Puntos de Observación

Los puntos de observación usados pertenecen a una parte del conjunto de piezómetros de monitoreo de CARSUCRE. Todos ellos se encuentran ubicados en la zona de Tolú, donde se sospecha que está presente la intrusión salina.

Según la figura, los resultados obtenidos de la simulación matemática indicaron que en la ubicación de los puntos de observación, aún no se presenta evidencia del proceso de salinización. De hecho, todos los puntos midieron inicialmente valores mayores de salinidad, los cuales fueron descendiendo transcurrido el tiempo simulado (figura 49). Entre los puntos que obtuvieron los mayores valores de salinidad están 44-I-D-PZ-01, ubicado en la zona costera central de Tolú, y representa las condiciones de salinidades medidas en la capa del acuífero profundo. De haber transcurrido mayor tiempo de simulación, la tendencia de la gráfica demostraría que las salinidades seguirían disminuyendo hacia valores más acordes con la realidad, ya que según los datos iniciales de STD introducidos en las capas acuíferas profundas, en la zona costera los valores de STD están en el rango de los 1174 mg/l. según la modelación. El valor final obtenido en este punto llegó a valores por debajo del 1700 mg/l. Es de esperar que en este punto las salinidades no hayan aumentado, ya que se trata del acuífero profundo, y aún no se tiene evidencia alguna de que el proceso de intrusión se esté dando a esas profundidades.

El siguiente piezómetro que midió mayores salinidades es 44-I-D-PZ-13. Este punto se encuentra ubicado al sur del punto anterior. Igualmente este midió valores de salinidad de la capa profunda. La tendencia de salinidad medida parece ser similar al anterior. Este comportamiento es similar a los resultados arrojados por los puntos 44-I-D-PO-03, 43-IV-A-PZ-04, 44-I-B-PZ-

09, 43-IV-A-PZ-03, los cuales midieron valores relacionados a la capa profunda.

En el caso de los piezómetros 44-I-D-PZ-02, las salinidades obtenidas fueron en aumento. Este punto en particular midió valores de salinidad en la capa media acuífera, la cual se ha considerado que está comenzando a presentar problemas de aumento de STD. Este comportamiento se produjo también en 44-I-D-PZ-07, la cual midió valores de la misma capa. Los demás piezómetros analizados como puntos de observación, tienen una tendencia a aumentar los valores de salinidad, pero no tan drásticamente. La mayoría de ellos miden la capa superior y media, e indicaron que se estaba produciendo un aumento gradual de salinidad en estas capas, pero sin alcanzar valores superiores a los 3000 mg/l, valor que indicaría la presencia de agua de mar y es el máximo valor de STD a alcanzar en el agua dulce.

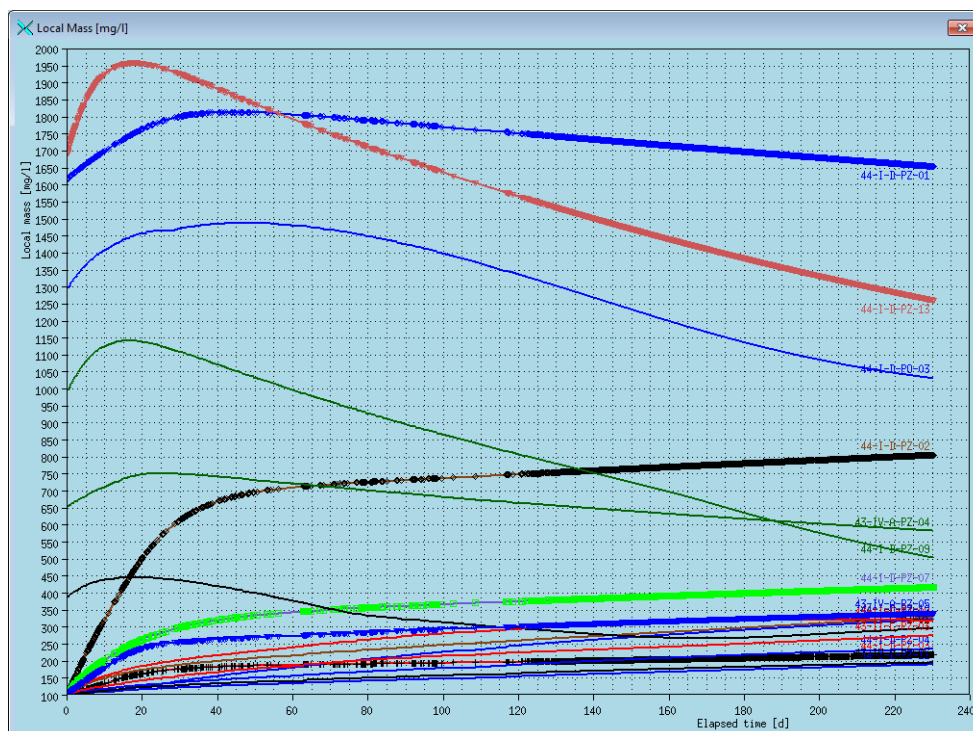


Figura 49.- Valores de STD medidos en los puntos de observación

Elaboración Propia

CONCLUSIONES

Balance Hídrico

1) En las tres estaciones meteorológicas analizadas se presentaron precipitaciones a lo largo de todo el año, pero con dos periodos de lluvias intensas entre los meses de Abril a Noviembre, siendo el mes de Octubre la época de mayores precipitaciones en la zona. La temporada seca es bien marcada en los meses de Diciembre a Marzo.

2) Las recarga producidas en la zona, se dan durante los meses lluviosos, y se presenta un breve periodo del uso de reserva en el mes de Diciembre, así como en el periodo del mes de Julio donde las precipitaciones descienden drásticamente. El poco almacenamiento producido llega a ser superado por los periodos de déficit, donde se registraron hasta 120 mm de escases del recurso, lo cual demuestra que las condiciones de recarga al acuífero por agua de lluvia son bastante bajas. Además, que las altas evapotranspiraciones en la zona, así como los tipos de suelos presentes, no permiten la rápida infiltración de las aguas hacia el acuífero. De manera general, la recarga calculada estuvo en el orden de los 240.5 mm/anuales.

3) La aplicación de la metodología de SCHOSINSKY en el 2006, permitió establecer tres zonas de recarga al acuífero de Morrosquillo respecto a los tipos de suelo presentes, estableciéndose que la zona de mayor aporte de recarga se presentó hacia el este, donde los suelos tienen mayor variabilidad granulométrica, y que a su vez, se encuentra la zona de recarga del acuífero. A pesar de las condiciones variables de los suelos, esta recarga llega sólo a los 0.003 mm/día. La zona central del acuífero es la que obtuvo las menores recargas totales, debido al tipo de suelo encontrado, el cual es mucho más fino. Y finalmente, hacia la zona costera las texturas arenosas favorecieron a una recarga mucho mayor a la zona media del acuífero, lo que beneficiaría al empuje de la intrusión salina. La recarga en general considerada estuvo en el orden de los 443 mm/anuales, siendo mayor a la esperada, lo que se

atribuyó a las suposiciones atribuidas en este proyecto (tipos de textura de suelo, infiltración)

Hidrogeoquímica

1) El análisis de las reacciones químicas de la interfaz mediante de la metodología de Manzano, a partir del modelo hidrogeoquímico elaborado por Martínez en el 2009, y el monitoreo realizado por CARSUCRE en el 2011, demostró que las zonas que realmente están siendo sometidas a un proceso gradual de contaminación por el avance de la intrusión salina hacia el acuífero de Morrosquillo están ubicadas hacia el centro y sur de Tolú, así como hacia el norte de Coveñas. Hacia el norte de Tolú, a pesar de que se presenta un gran porcentaje de salinidad en algunos puntos, no son indicativos de la intrusión, sino de un proceso de mezcla con agua fósil atrapada en los sedimentos de manglar o porque los pozos presentes están captando aguas de formaciones terciarias, las cuales por medio del cono de depresión generado por la extracción de agua dulce en la zona, pudiera estar impulsando el ascenso de estas aguas fósiles hacia el acuífero de Morrosquillo.

2) Otros puntos que presentaron ciertas cantidades de salinidad están relacionados a procesos químicos originados por la interacción con el sedimento presente en la zona de captación, e incluso si el pozo tiene gran profundidad pudiera estar captando aguas de formaciones terciarias.

Condiciones Geológicas del Acuífero de Morrosquillo

1) El acuífero de Morrosquillo está conformado por sedimentos cuaternarios de la formación Morrosquillo, caracterizada por gravas finas a medias con arenas, arcillas y limos depositados por ambientes fluvio-litorales que poco a poco llenaron la cuenca hasta la costa del golfo.

2) A nivel hidrogeológico el acuífero de Morrosquillo es un acuífero multicapa, el cual presenta tres capas permeables, separadas entre sí por dos acuitardos. La naturaleza de su capa superior es semiconfinante, ya que en la zona sur del mismo se consigue una capa de arcilla que lo confina, pero que en su parte centro oriental y norte tiene un comportamiento freático.

3) Los cortes geológicos permitieron observar el comportamiento del basamento geológico, el cual está constituido por formaciones terciarias que parecieran estar siendo sometidas a procesos estructurales, específicamente un anticlinal. Probablemente, la actividad estructural de la zona ha hecho que el basamento se pliegue y sea tan poco uniforme haciendo que en el sur del acuífero, estas formaciones asciendan y sirvan como barrera en caso de darse un proceso de avance de la cuña salina.

Características físicas: Permeabilidad y Coeficientes de almacenamiento

1) El acuífero de Morrosquillo podría considerarse como pobremente permeable. Esta característica física del material constituyente está relacionada a la variabilidad de los sedimentos depositados que conforman a la formación Morrosquillo y que en su mayoría presentan altos contenidos de finos. Aunque se dan algunas excepciones, donde las permeabilidades son buenas y pudieran atribuirse a paleocanales que formaron parte de los ambientes sedimentarios que rellenaron la cuenca. Las permeabilidades de las capas son variables, siendo más permeables en la capa media e inferior del acuífero, esto debido a la mayor presencia de sedimentos gruesos como los son las gravas. En el caso de la capa superior, la permeabilidad está sujeta al tipo de sedimento presente, siendo mayor hacia el este, disminuye en el centro y se vuelve un poco más permeable hacia la costa. Aunque esta característica del material va de la mano de la transmisividad del acuífero, se pudiera decir que ésta igualmente es variable, ya que los espesores de las

capas cambian, y aunque la permeabilidad pueda ser mala, la capa pudiera tener un gran espesor, dando así una alta transmisividad en ese punto, y viceversa.

2) El coeficiente almacenamiento del acuífero fue variable para el caso de la capa superior dada a su naturaleza semiconfinante.

Carga hidráulica

1) Los niveles de agua modelados mostraron que las aguas del acuífero presentan un comportamiento saltante en las zonas cercanas a la costa. Los niveles variaron desde los pocos metros hasta los 38 m de profundidad cercana al borde oriental del mismo.

2) Las líneas equipotenciales obtenidas mostraron ser paralelas a la costa y perpendiculares a los bordes norte y sur del modelo, los cuales fueron asumidos como impermeables. Por su parte, las líneas de flujo mostraron ser ortogonales a la costa, a excepción de las zonas donde los pozos se comportaron como saltantes, los cuales desvían las líneas de flujo hacia ellas.

Modelación matemática

1) La modelación matemática realizada mediante Feflow, permitió tener más detalle del comportamiento hidrogeológico de las aguas subterráneas en el sector de Morroquillo, Departamento Sucre de Colombia.

2) Se determinó que estas aguas están siendo sometidas a un proceso de contaminación gradual en la costa, debido al avance de la intrusión salina generada por la sobrevaloración de las aguas del acuífero. La lenta respuesta de recarga del mismo vs. la extracción excesiva del recurso en la zona costera, ha llevado a que el equilibrio presente entre el agua dulce y la

cuña del agua del mar Caribe se pierda, permitiendo así que poco a poco la salinidad de las aguas aumente y por ende, pierdan su condición de agua potable. Este comportamiento fue observado hacia la zona central y sur de Tolú, así como hacia el norte de Coveñas.

3) El proceso de contaminación salina no es constante en todas las capas del acuífero, lo que permitió concluir, que las condiciones de los materiales presentes en la costa, y por capa, no sean similares. Como tal, el aumento de salinidad de algunos pozos se da mayormente en la capa superior y media, y no se tiene evidencia que el avance de la intrusión salina se esté dando en la capa profunda.

4) De los resultados obtenidos al norte del acuífero, se puede decir que el avance de la cuña en la zona, está relacionada con la topografía presente, la cual permite que el agua de mar avance tierra adentro hacia el área dominada por ambientes costeros donde se desarrolla la vegetación de manglar.

5) En el caso de la variación de carga hidráulica obtenida mediante la modelación en Feflow permitió concluir, que las condiciones modeladas con solo la recarga por agua de lluvia no asemeja la realidad presente en las aguas del acuífero de Morrosquillo y de hecho, los resultados obtenidos favorecen la teoría planteada por Herrera y Gutiérrez en el 2011, los cuales a partir de un estudio isotópico de las aguas subterráneas, determinaron una posible conexión con otro acuífero adyacente llamado Tolú Viejo. Esto es respaldado en esta investigación ya que algunos pozos cercanos a las condiciones de frontera oriental que colindan con la Formación Tolú Viejo presentaron grandes descensos en sus niveles, indicando la ausencia de una entrada de agua al sistema que pudiera provenir de este acuífero vecino.

6) Además, el acuífero no sólo presenta recarga por otro acuífero cercano, sino que también se da una recarga parcial del mismo con algunas fuentes de agua superficiales sobretudo en épocas de lluvia. Estas fuentes son: arroyo Grande, arroyo San Antonio, arroyo Pavías y arroyo Pechelín. Esto fue evidenciado por el descenso de los niveles en algunos pozos cercanos a dichas fuentes. Y además esta observación favorece la interpretación realizada por Martínez en el 2009, en el modelo hidrogeoquímico de las aguas, el cual demostró la similitud química de las aguas de algunos pozos con las aguas de estos arroyos.

7) Las condiciones físicas modeladas en el acuífero parecen estar acorde con la realidad, a excepción de la zona nororiental del mismo, el cual presentó resultados fuera de lo normal (pozo saltante). Y se atribuye este comportamiento atípico a la interpolación generada por el programa, la cual asumió un valor de recarga muy por debajo del que debió tener, o debido a que la cantidad de agua que entró al sistema en este punto tuvo que ser menor al modelado.

8) Los puntos de observación usados durante la modelación matemática no mostraron a gran escala la presencia del avance de contaminación por agua de mar. Sólo algunos puntos comenzaron a ascender los valores de STD, demostrando así, que en esas zonas se pudieran estar dando las primeras evidencias de aumento de salinidad de las aguas, pero ninguno de los puntos mostró valores por encima de los 3000 mg/l de sólidos totales disueltos, los cuales estarían indicando la presencia de aguas mezcladas.

RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos en esta investigación hidrogeológica se dan las siguientes recomendaciones:

1) Realizar un estudio detallado de los tipos de suelo presentes en el área, para conocer mejor las condiciones de infiltración y recarga en el acuífero. Esta recomendación se hace, ya que los tipos de suelos usados en esta investigación para determinar la recarga por agua de lluvia son considerados como muy generales, y es bien conocido que los tipos de ambientes que depositaron estos sedimentos generaron mayor cantidad de suelos.

2) Generar balances hídricos diarios en el área del acuífero, ya que de esta forma se podrá tener mayor precisión del valor de recarga neta por agua de lluvia que ingresa al sistema.

3) Las concesiones de agua en la zona costera, específicamente hacia norte y sur de Tolú, así como hacia Coveñas, deberán ser limitadas sólo a pozos profundos que capten la capa del acuífero inferior, y éstas deberán extraer caudales bajos.

4) Introducir al modelo la mayor cantidad de pozos presentes en la zona para simular mejor las condiciones de extracción de agua dulce.

5) Modificar las condiciones de frontera del modelo que fueron asumidas como impermeables (norte y sur). Esto deberá ser realizado para conocer las condiciones de aporte que producen estos arroyos, que en la realidad permanecen con caudales a lo largo del año. Para ello, se hará necesario hacer un estudio usando trazadores, el cual permitirá determinar la cantidad de agua que pudiera entrar al sistema por medio del monitoreo de la curva

de paso del trazador en algunos puntos de observación que serán escogidos en la zona de interés.

6) Además, también se recomienda introducir otro tipo de frontera en el modelo, específicamente un borde de tipo de flujo a lo largo del arroyo Pechelín, el cual pareciera servir de aporte de recarga al acuífero en la zona de Tolú.

7) Modificar la frontera oriental del modelo, la cual fue asumida como carga hidráulica constante. Este cambio en la naturaleza del borde de frontera se sugiere, ya que a partir de los resultados obtenidos en este estudio, es evidente que existe una conexión gradual con el acuífero de Tolú Viejo, el cual se ubica en las inmediaciones de este borde. Para ello, se recomienda realizar un estudio con trazadores similar al planteado para las condiciones de frontera norte y sur; pero, la diferencia será, que el trazador deberá ser introducido al sistema por medio de los manantiales que se originan en épocas de lluvias, los cuales han sido de interés de monitoreo hidrogeoquímico para CARSUCRE.

8) Fortalecer la geología local del acuífero hacia la zona costera. Para ello, se recomienda realizar estudios geofísicos en la costa del golfo, ya que así se podrá conocer la geología de la zona de playa, lo que a su vez, ayudará a mejorar los resultados que se obtengan en la modelación, y así, la forma de la cuña podrá ser definida a mayor detalle. También, se propone usar cámaras sumergibles que permitan ubicar la posición de las zonas de filtro en los pozos.

9) Realizar mayor número de ensayos de bombeo en los pozos ubicados en la costa, especialmente hacia la zona de central y sur de Tolú y Coveñas,

de manera de conocer detalladamente las características físicas del acuífero, es decir, su variación de permeabilidad y coeficiente de almacenamiento.

10) Continuar los muestreos hidrogeoquímicos en la costa, ya que de esta forma podrán monitorear los aumentos graduales de agua salada en los pozos de la zona de interés.

11) Aumentar la red de monitoreo de piezómetros en la zona de la costa y límite oriental del acuífero, para así tener mayor detalle de los niveles de agua, además que podrán servir para monitorear no sólo la intrusión, sino también las recargas proveniente desde el acuífero de Tolú Viejo.

12) Los resultados obtenidos de esta modelación matemática podrán ser usados, para comenzar a generar un plan de protección de las zonas de recarga del acuífero, a pesar, que la recarga por lluvia hacia el mismo sea bastante pobre, pero, será de importancia para garantizar que ninguna actividad antrópica en la zona pudiera poner en riesgo la calidad de las aguas del acuífero. Además, que esta modelación será base para realizar nuevas modelaciones matemáticas en zonas que pudieran estar siendo sometidas a un proceso de contaminación gradual de las aguas del acuífero de Morroquillo. Entre estas zonas propuestas están el basurero municipal, cementerio y fuentes superficiales usadas para desechar los efluentes domésticos de las zonas urbanas.

13) Generar nuevas modelaciones matemáticas con mayores tiempos de simulación, y en donde se introduzcan variaciones de los niveles de agua en el tiempo, de manera de validar las condiciones de profundidad de agua en el modelo, lo que serviría de calibración del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anónimo, (s.f). Intrusión marina. Implicaciones hidrodinámicas. Determinación de la posición de la interfase. Proceso de mezcla de aguas. Procesos modificadores asociados. Métodos de estudio. Otros mecanismos de salinización. Algunos criterios para su diferenciación. [Documento en línea]. En www.agua.uji.es/pdf [Consultada: Junio 27, 2011,].
- Arias, F. 1999. El Proyecto de investigación, guía para su elaboración. [Documento en línea]. 3era. ed. Caracas. 96 pp. En: <http://www.slideshare.net/asdrubal1990/el-proyecto-de-investigacion-fidias-arias> [Consultada: Diciembre, 2010]
- Armas, F. 2010. Modelación y Simulación Hidrodinámica del Sistema Acuífero Zamora, en Michoacán, México. Tesis Pregrado. [Documento en línea]. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F, México. 114 pp. En: www.geologia-fefflow.unam.mx [Consultada: Enero, 2011]
- CARSUCRE (2005). Proyecto de protección integral de aguas subterráneas “PPIAS, Acuífero de Morroa, sector Sincelajo-Corozal-Morroa. [Documento en línea]. Corporación autónoma de Sucre (CARSUCRE). En www.carsucre.gov.co. [2010, Noviembre 26].
- CARSUCRE (2010). I Taller sobre el proyecto de protección Integral de aguas subterráneas – ppias – Acuífero Morrosquillo. [Documento en línea]. Corporación autónoma de Sucre (CARSUCRE). En www.carsucre.gov.co. [2010, Noviembre 26].

FEFLOW (s.f). Ejercicio Demostrativo [Documento en línea]. Wasy Software. Instituto de Planificación de Recursos Hídricos e Investigación de Sistemas SRL. En www.feflow.info. [Consultada: Enero 05, 2012].

Gutiérrez, G (2005). Diagnóstico ambiental del acuífero costero, Golfo de Morrosquillo, Zona litoral Tolú-Coveñas. Tesis de Maestría para optar al título de Magister Ambiental con énfasis en Sanitaria. Universidad Nacional de Colombia. 287 pp.

Herrera, H y Gutiérrez, G (2010). Contribución de los isótopos estables de ^{18}O y ^2H en el conocimiento del acuífero de Morrosquillo, Departamento de Sucre, Colombia. Eds. X Congreso de agua subterránea y desarrollo de los pueblos latinoamericanos (ALHSUD). Caracas, Venezuela.

Hurtado, J. 2008. Metodología de la Investigación. [Documento en línea]. Ediciones Quirón. Caracas Venezuela. 183pp. En: http://www.bvsst.org.ve/documentos/portada/LDD110/metodologias_investigacion.pdf. [Consultada: Diciembre, 2010]

Maldonado, J. (2000). Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia. [Documento en línea]. Ministerio del Medio Ambiente. En www.limcol.org.pdf. [Consultada Noviembre 12, 2010].

Manzano, M (2011). Hidroquímica de aguas subterráneas naturales. VI Curso Hispanoamericano de hidrología subterránea (VICHHS). Salto, Uruguay.

- Martínez, D (2009). Evaluación y modelación hidrogeoquímica de Acuífero de Morrosquillo (Sucre- Colombia). Tesis de Maestría. Universidad de Antioquía. Colombia. 104 pp.
- Mérida, L. 2002. La Evolución de la Intrusión Salina en el Acuífero Marplatense. Ejemplo de una Gestión Sustentable. [Documento en línea]. En: <http://www.alhsud.com/public/articulos/Merida.pdf>. [Consultada Junio 28, 2011].
- Mijares, A (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. Grupo Noriega editores, Mexico. 291 pp.
- Monerri, M y Doménech, P (s.f). Modelación de la calidad del agua. [Documento en línea]. En: <http://cmapserver.unavarra.es> [Consultada: Enero, 2012]
- Lundgren, L. (1999). Enviromental Geology. 2da. ed. New Jersey, Estados Unidos. 493 pp.
- Paredes, V. et.al (2010). Hidrogeoquímica en el acuífero costero del eje Bananero de Urabá. Universidad de Medellín, Medellín. Colombia. [Revista en línea] En: <http://www.redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/750/75017164004.pdf>. . [Junio, 28, 2011].
- República de Colombia (2002). Mapa hidrogeológico del departamento de Sucre, Plancha Nro. 2, Ministerio de minas y energía. Instituto de investigación e información geocientífica minero-ambiental y nuclear (INGEOMINAS). Escala: 1:250000.

Schosinsky, G (2006). Cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos. [Revista en línea]. En: www.ambientales.una.ac.cr. [Consultada: Febrero 10, 2012].

Schosinsky, G y Losilla, M (1999). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. [Revista en línea]. En: www.ambientales.una.ac. [Enero, 2012]

Silveira, L (2011). Hidráulica de acuíferos. VI Curso Hispanoamericano de hidrología subterránea (VICHHS). Salto, Uruguay.

Vélez, M. (2010). Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Medellín, Colombia.

Zamanillo, E (2011). Elementos de hidrología. VI Curso Hispanoamericano de hidrología subterránea (VICHHS). Salto, Uruguay.

ANEXOS

Anexo 1.-Información de Pozos empleados en la modelación con FEFLOW

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-IV-A-PP-101	830932	1537437	1	43.2
43-IV-A-PP-104	830901	1537414	2	43.2
43-IV-A-PP-105	830922	1537325	3	43.2
43-IV-A-PP-106	830879	1537249	4	43.2
43-IV-A-PP-107	830860	1537276	5	43.2
43-IV-A-PP-108	830846	1537254	6	43.2
43-IV-A-PP-109	830863	1537148	7	43.2
43-IV-A-PP-111	830759	1537128	8	43.2
43-IV-A-PP-112	830779	1537172	9	43.2
43-IV-A-PP-113	830738	1537122	10	43.2
43-IV-A-PP-114	830733	1537070	11	43.2
43-IV-A-PP-115	830777	1537050	12	43.2
43-IV-A-PP-117	830675	1537013	13	43.2
43-IV-A-PP-118	830668	1537010	14	43.2
43-IV-A-PP-119	830662	1536991	15	43.2
43-IV-A-PP-120	830805	1537230	16	43.2
43-IV-A-PP-121	830815	1537220	17	43.2
43-IV-A-PP-122	830762	1537205	18	43.2
43-IV-A-PP-123	830754	1537205	19	43.2
43-IV-A-PP-124	830782	1537189	20	43.2
43-IV-A-PP-125	830768	1537196	21	43.2
43-IV-A-PP-126	830710	1537104	22	43.2
43-IV-A-PP-127	830704	1537072	23	43.2
43-IV-A-PP-128	830688	1537041	24	43.2
43-IV-A-PP-129	830675	1536972	25	43.2
43-IV-A-PP-130	830660	1536956	26	43.2
43-IV-A-PP-131	830623	1536968	27	43.2
43-IV-A-PP-133	830603	1536944	28	43.2
43-IV-A-PP-136	830559	1536885	29	43.2
43-IV-A-PP-137	830588	1536891	30	43.2
43-IV-A-PP-138	830560	1536848	31	43.2
43-IV-A-PP-139	830526	1536829	32	43.2
43-IV-A-PP-140	830621	1536790	33	43.2
43-IV-A-PP-142	830469	1536690	34	43.2
43-IV-A-PP-143	830437	1536645	35	43.2

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-IV-A-PP-144	830442	1536677	36	43.2
43-IV-A-PP-145	830462	1536646	37	43.2
43-IV-A-PP-146	830472	1536600	38	17.28
43-IV-A-PP-147	830380	1536637	39	17.28
43-IV-A-PP-148	830425	1536631	40	17.28
43-IV-A-PP-149	830314	1536469	41	17.28
43-IV-A-PP-151	830298	1536437	42	17.28
43-IV-A-PP-152	830260	1536392	43	17.28
43-IV-A-PP-153	830275	1536416	44	17.28
43-IV-A-PP-154	830205	1536338	45	17.28
43-IV-A-PP-155	830136	1536261	46	17.28
43-IV-A-PP-156	830138	1536249	47	17.28
43-IV-A-PP-157	830046	1536164	48	17.28
43-IV-A-PP-158	830055	1536187	49	17.28
43-IV-A-PP-159	830109	1536076	50	17.28
43-IV-A-PP-160	830019	1536066	51	17.28
43-IV-A-PP-161	829926	1536030	52	17.28
43-IV-A-PP-162	829932	1536019	53	17.28
43-IV-A-PP-163	829865	1535828	54	17.28
43-IV-A-PP-164	829792	1535791	55	17.28
43-IV-A-PP-165	830322	1536482	56	17.28
43-IV-A-PP-166	830330	1536491	57	17.28
43-IV-A-PP-167	830270	1536327	58	43.2
43-IV-A-PP-168	830153	1536307	59	17.28
43-IV-A-PP-169	830144	1536289	60	17.28
43-IV-A-PP-170	830104	1536245	61	17.28
43-IV-A-PP-171	830072	1536117	62	17.28
43-IV-A-PP-173	829994	1536034	63	17.28
43-IV-A-PP-174	829874	1535894	64	17.28
43-IV-A-PP-175	829855	1535877	65	17.28
43-IV-A-PP-176	829767	1535763	66	17.28
43-IV-A-PP-177	829971	1536015	67	17.28
43-IV-A-PP-178	829920	1535968	68	17.28
43-IV-A-PP-179	830020	1536070	69	17.28
43-IV-A-PP-180	830051	1536102	70	17.28
43-IV-A-PP-181	830062	1536159	71	17.28
43-IV-A-PP-182	830092	1536197	72	17.28

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-IV-A-PP-183	830119	1536248	73	17.28
43-IV-A-PP-184	830302	1536289	74	17.28
43-IV-A-PP-185	830262	1536364	75	17.28
43-IV-A-PP-186	830283	1536428	76	17.28
43-IV-A-PP-187	830307	1536464	77	17.28
43-IV-A-PP-188	830339	1536503	78	17.28
43-IV-A-PP-189	829658	1535707	79	17.28
43-IV-A-PP-190	829821	1535759	80	17.28
43-IV-A-PP-383	831158	1537565	81	172.8
43-IV-A-PP-384	831894	1539067	82	43.2
43-IV-A-PP-388	831204	1537438	83	43.2
43-IV-A-PP-43	832223	1539267	84	86.4
43-IV-A-PP-44	831792	1538831	85	86.4
43-IV-A-PP-45	831771	1538797	86	86.4
43-IV-A-PP-46	831755	1538745	87	86.4
43-IV-A-PP-47	831769	1538705	88	86.4
43-IV-A-PP-48	831697	1538690	89	86.4
43-IV-A-PP-49	831388	1538039	90	86.4
43-IV-A-PP-50	831488	1538040	91	86.4
43-IV-A-PP-51	831350	1538043	92	43.2
43-IV-A-PP-52	831337	1538029	93	43.2
43-IV-A-PP-53	831316	1538002	94	43.2
43-IV-A-PP-54	831300	1537992	95	43.2
43-IV-A-PP-56	831248	1537860	96	43.2
43-IV-A-PP-58	831211	1537860	97	43.2
43-IV-A-PP-59	831221	1537849	98	43.2
43-IV-A-PP-60	831204	1537833	99	43.2
43-IV-A-PP-61	831839	1537830	100	43.2
43-IV-A-PP-62	831171	1537825	101	43.2
43-IV-A-PP-64	831146	1537789	102	43.2
43-IV-A-PP-65	831146	1537749	103	43.2
43-IV-A-PP-66	831147	1537745	104	43.2
43-IV-A-PP-67	831121	1537743	105	43.2
43-IV-A-PP-69	831087	1537689	106	43.2
43-IV-A-PP-70	831102	1537626	107	43.2
43-IV-A-PP-75	832011	1538199	108	86.4
43-IV-A-PP-76	832007	1538167	109	86.4

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-IV-A-PP-77	832007	1538611	110	86.4
43-IV-A-PP-78	831966	1538108	111	86.4
43-IV-A-PP-81	832058	1538018	112	86.4
43-IV-A-PP-82	832054	1538023	113	86.4
43-IV-A-PP-83	832035	1537955	114	86.4
43-IV-A-PP-84	831970	1538031	115	86.4
43-IV-A-PP-85	831935	1537959	116	86.4
43-IV-A-PP-86	831931	1538000	117	86.4
43-IV-A-PP-87	831916	1537963	118	86.4
43-IV-A-PP-88	831892	1537957	119	86.4
43-IV-A-PP-89	831907	1537895	120	86.4
43-IV-A-PP-90	831866	1537878	121	86.4
43-IV-A-PP-91	831821	1537869	122	86.4
43-IV-A-PP-93	831804	1537858	123	86.4
43-IV-A-PP-94	831872	1537812	124	86.4
43-IV-A-PP-95	831425	1538141	125	43.2
44-I-D-PP-158	835890	1549001	126	86.4
44-I-D-PP-01	846809	1541310	127	259.2
44-I-D-PP-74	842931	1540844	128	77.76
44-I-D-PP-75	842839	1540996	129	77.76
44-I-D-PP-76	842624	1540668	130	77.76
44-II-A-PP-01	851219	1556336	131	77.76
44-II-C-PP-02	850416	1546426	132	77.76
44-II-C-PP-03	850432	1545238	133	77.76
44-III-B-PP-03	845004	1539003	134	77.76
44-III-B-PP-08	845037	1539104	135	77.76
44-III-B-PP-25	845112	1539037	136	77.76
44-III-B-PP-26	844998	1539003	137	77.76
37-III-D-PP-12	837847	1561421	138	172.8
37-III-D-PP-13	837801	1561392	139	864
37-III-D-PP-15	843703	1564545	140	172.8
37-III-D-PP-18	842874	1562272	141	172.8
37-III-D-PP-19	843084	1562531	142	172.8
37-III-D-PP-20	844697	1564110	143	172.8
37-III-D-PP-25	846117	1563523	144	172.8
37-III-D-PP-26	846394	1563730	145	172.8
37-III-D-PP-27	846053	1563464	146	172.8

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
37-III-D-PP-28	846326	1563775	147	172.8
37-III-D-PP-29	846153	1563623	148	172.8
37-III-D-PP-31	846930	1564146	149	172.8
37-III-D-PP-34	846929	1564154	150	172.8
44-I-B-PP-77	847731	1559200	151	172.8
43-II-C-PP-01	832983	1541096	152	25.92
43-II-C-PP-02	832954	1541104	153	25.92
43-II-C-PP-03	832924	1541123	154	25.92
43-II-C-PP-05	832990	1541010	155	25.92
43-II-C-PP-06	832995	1541016	156	25.92
43-II-C-PP-07	832829	1540841	157	25.92
43-II-C-PP-08	832852	1540897	158	25.92
43-II-C-PP-09	832633	1540389	159	25.92
43-II-C-PP-10	832534	1540394	160	25.92
43-II-C-PP-100	833409	1542252	161	25.92
43-II-C-PP-101	833429	1542292	162	25.92
43-II-C-PP-102	833445	1542436	163	25.92
43-II-C-PP-105	833536	1542607	164	25.92
43-II-C-PP-106	833543	1542625	165	25.92
43-II-C-PP-108	833668	1542874	166	25.92
43-II-C-PP-109	833733	1543151	167	34.56
43-II-C-PP-11	832602	1540380	168	25.92
43-II-C-PP-111	833837	1543452	169	34.56
43-II-C-PP-112	833813	1543445	170	34.56
43-II-C-PP-115	834111	1544285	171	34.56
43-II-C-PP-116	832773	1540148	172	34.56
43-II-C-PP-119	832621	1540074	173	25.92
43-II-C-PP-12	832959	1541136	174	25.92
43-II-C-PP-121	832762	1540195	175	25.92
43-II-C-PP-123	832653	1540191	176	25.92
43-II-C-PP-124	832626	1540152	177	25.92
43-II-C-PP-125	833674	1540036	178	25.92
43-II-C-PP-126	832596	1540032	179	25.92
43-II-C-PP-127	833636	1540004	180	25.92
43-II-C-PP-128	833618	1542139	181	25.92
43-II-C-PP-129	834625	1543511	182	25.92
43-II-C-PP-13	832938	1541104	183	25.92

CódigoPozo SIGAS	X	Y	Codigo FEFLOW	caudal m3/d
43-II-C-PP-130	834435	1544950	184	25.92
43-II-C-PP-131	834545	1544498	185	25.92
43-II-C-PP-132	833613	1540428	186	25.92
43-II-C-PP-134	834394	1544237	187	25.92
43-II-C-PP-136	834389	1544523	188	25.92
43-II-C-PP-138	833256	1541953	189	25.92
43-II-C-PP-139	833316	1542104	190	25.92
43-II-C-PP-14	832959	1541098	191	25.92
43-II-C-PP-15	832944	1541068	192	25.92
43-II-C-PP-16	832910	1541028	193	25.92
43-II-C-PP-17	832889	1541031	194	25.92
43-II-C-PP-18	832738	1540567	195	25.92
43-II-C-PP-19	832709	1540589	196	25.92
43-II-C-PP-20	832708	1540595	197	25.92
43-II-C-PP-21	832709	1540596	198	25.92
43-II-C-PP-22	832728	1540628	199	25.92
43-II-C-PP-23	832752	1540617	200	25.92
43-II-C-PP-24	832830	1540830	201	25.92
43-II-C-PP-25	832832	1540812	202	25.92
43-II-C-PP-26	832800	1540815	203	25.92
43-II-C-PP-27	832738	1540704	204	25.92
43-II-C-PP-28	833140	1541573	205	25.92
43-II-C-PP-29	833153	1541508	206	25.92
43-II-C-PP-30	833053	1541391	207	25.92
43-II-C-PP-31	833031	1541264	208	25.92
43-II-C-PP-32	833617	1540420	209	25.92
43-II-C-PP-33	833035	1540420	210	25.92
43-II-C-PP-34	833037	1540420	211	25.92
43-II-C-PP-35	833037	1540422	212	25.92
43-II-C-PP-36	832602	1540380	213	25.92
43-II-C-PP-37	832701	1540629	214	25.92
43-II-C-PP-38	832688	1540512	215	25.92
43-II-C-PP-39	832678	1540503	216	25.92
43-II-C-PP-40	832645	1540374	217	25.92
43-II-C-PP-41	832635	1540350	218	25.92
43-II-C-PP-42	832635	1540362	219	25.92
43-II-C-PP-43	832623	1540359	220	25.92
43-II-C-PP-44	832616	1540371	221	25.92
43-II-C-PP-45	832574	1540307	222	25.92
43-II-C-PP-46	832559	1540279	223	25.92
43-II-C-PP-47	832936	1540776	224	25.92
43-II-C-PP-48	832484	1542410	225	25.92
43-II-C-PP-49	832881	1540748	226	25.92
43-II-C-PP-50	832908	1540496	227	25.92
43-II-C-PP-51	832907	1540475	228	25.92
43-II-C-PP-52	832913	1540428	229	25.92
43-II-C-PP-53	832871	1540410	230	25.92

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-II-C-PP-54	832864	1540392	231	25.92
43-II-C-PP-55	832837	1540346	232	25.92
43-II-C-PP-56	832837	1540337	233	25.92
43-II-C-PP-57	832834	1540315	234	25.92
43-II-C-PP-58	832843	1540293	235	25.92
43-II-C-PP-59	832819	1540330	236	25.92
43-II-C-PP-60	832817	1540318	237	25.92
43-II-C-PP-61	832793	1540299	238	25.92
43-II-C-PP-62	832785	1540286	239	25.92
43-II-C-PP-63	832781	1540266	240	25.92
43-II-C-PP-64	832773	1540221	241	25.92
43-II-C-PP-65	832716	1540270	242	25.92
43-II-C-PP-66	832720	1540370	243	25.92
43-II-C-PP-67	832716	1540326	244	25.92
43-II-C-PP-68	832698	1540311	245	25.92
43-II-C-PP-69	832670	1540308	246	25.92
43-II-C-PP-71	832536	1540279	247	25.92
43-II-C-PP-72	832500	1540193	248	25.92
43-II-C-PP-74	832543	1540234	249	25.92
43-II-C-PP-77	832469	1540134	250	25.92
43-II-C-PP-78	832502	1540192	251	25.92
43-II-C-PP-79	832421	1540012	252	25.92
43-II-C-PP-80	832393	1540013	253	25.92
43-II-C-PP-81	832462	1540055	254	25.92
43-II-C-PP-82	832469	1540087	255	25.92
43-II-C-PP-84	832661	1540254	256	25.92
43-II-C-PP-85	832657	1540256	257	25.92
43-II-C-PP-86	833405	1542275	258	25.92
43-II-C-PP-87	833451	1542365	259	25.92
43-II-C-PP-88	833469	1542479	260	25.92
43-II-C-PP-89	833499	1542506	261	25.92
43-II-C-PP-90	833514	1542278	262	25.92
43-II-C-PP-91	833523	1542695	263	25.92
43-II-C-PP-92	833574	1542599	264	25.92
43-II-C-PP-93	833731	1543241	265	25.92
43-II-C-PP-95	833793	1543410	266	34.56
43-II-C-PP-96	833850	1543500	267	34.56
43-II-C-PP-97	833872	1543640	268	34.56
43-II-C-PP-99	834085	1544136	269	34.56
43-IV-A-PP-06	832192	1539652	270	25.92
43-IV-A-PP-08	832300	1539875	271	25.92
43-IV-A-PP-09	832365	1539876	272	25.92
43-IV-A-PP-10	832046	1539386	273	25.92
43-IV-A-PP-11	831893	1539133	274	25.92
43-IV-A-PP-12	832048	1539250	275	25.92
43-IV-A-PP-14	832071	1539339	276	25.92
43-IV-A-PP-18	832169	1539618	277	25.92
43-IV-A-PP-19	832112	1539434	278	25.92

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-IV-A-PP-20	832199	1539571	279	25.92
43-IV-A-PP-21	832140	1539480	280	25.92
43-IV-A-PP-23	832125	1539538	281	25.92
43-IV-A-PP-24	832036	1539363	282	25.92
43-IV-A-PP-25	832013	1539281	283	86.4
43-IV-A-PP-27	832044	1539375	284	25.92
43-IV-A-PP-28	831787	1538891	285	86.4
43-IV-A-PP-29	832595	1539899	286	25.92
43-IV-A-PP-30	832511	1539761	287	25.92
43-IV-A-PP-31	832281	1539531	288	25.92
43-IV-A-PP-32	832192	1539389	289	25.92
43-IV-A-PP-33	832206	1539419	300	25.92
43-IV-A-PP-34	832225	1539245	301	25.92
43-IV-A-PP-345	834414	1538089	302	25.92
43-IV-A-PP-349	834099	1538398	303	25.92
43-IV-A-PP-35	831784	1538825	304	86.4
43-IV-A-PP-350	834068	1538388	305	259.2
43-IV-A-PP-351	834123	1538084	306	25.92
43-IV-A-PP-36	831759	1538770	307	86.4
43-IV-A-PP-37	831806	1538709	308	86.4
43-IV-A-PP-38	831753	1538692	309	86.4
43-IV-A-PP-39	832593	1539827	310	25.92
43-IV-A-PP-40	832606	1539914	311	25.92
43-IV-A-PP-41	832439	1539806	312	25.92
44-I-B-PP-01	835759	1550189	313	25.92
44-I-B-PP-03	835875	1550493	314	25.92
44-I-B-PP-04	835894	1550582	315	25.92
44-I-B-PP-05	835933	1551002	316	25.92
44-I-B-PP-08	835971	1551395	317	25.92
44-I-B-PP-09	835979	1551490	318	25.92
44-I-B-PP-10	835975	1551821	319	25.92
44-I-B-PP-107	842683	1554577	320	25.92
44-I-B-PP-108	842804	1554589	321	25.92
44-I-B-PP-11	835822	1550268	322	25.92
44-I-B-PP-112	844981	1556756	323	25.92
44-I-B-PP-113	843345	1554945	324	25.92
44-I-B-PP-115	843416	1555016	325	25.92
44-I-B-PP-116	836036	1554297	326	25.92
44-I-B-PP-118	836037	1552354	327	25.92
44-I-B-PP-119	836036	1553492	328	25.92
44-I-B-PP-12	835951	1551230	329	25.92
44-I-B-PP-120	836065	1554073	330	25.92
44-I-B-PP-121	836005	1552083	331	25.92
44-I-B-PP-13	835991	1552081	332	25.92
44-I-B-PP-16	836085	1552639	333	25.92
44-I-B-PP-20	836085	1552989	334	25.92
44-I-B-PP-22	836093	1553283	335	25.92
44-I-B-PP-24	836080	1553364	336	25.92

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
44-I-B-PP-25	836080	1553389	337	25.92
44-I-B-PP-26	836090	1553592	338	25.92
44-I-B-PP-27	835991	1554728	339	25.92
44-I-B-PP-31	835974	1554658	340	25.92
44-I-B-PP-32	836042	1554415	341	25.92
44-I-B-PP-33	836053	1552598	342	25.92
44-I-B-PP-34	836073	1552807	343	25.92
44-I-B-PP-35	836085	1553070	344	25.92
44-I-B-PP-36	836100	1553192	345	25.92
44-I-B-PP-37	836061	1553512	346	25.92
44-I-B-PP-38	836063	1553572	347	25.92
44-I-B-PP-39	836100	1553698	348	25.92
44-I-B-PP-40	836069	1553806	349	25.92
44-I-B-PP-42	836010	1554533	351	25.92
44-I-B-PP-43	836019	1554381	352	25.92
44-I-B-PP-49	842731	1551333	353	25.92
44-I-B-PP-50	842552	1551459	354	25.92
44-I-B-PP-57	842996	1552382	355	25.92
44-I-B-PP-76	836026	1552364	356	25.92
44-I-B-PP-79	843239	1559222	357	25.92
44-I-B-PP-80	842797	1558751	358	25.92
44-I-B-PP-81	843681	1559400	359	25.92
44-I-B-PP-82	844240	1558957	360	25.92
44-I-D-PP-02	839022	1540115	361	25.92
44-I-D-PP-09	835455	1548315	362	25.92
44-I-D-PP-118	841327	1542381	363	25.92
44-I-D-PP-136	838534	1540177	364	25.92
44-I-D-PP-141	840852	1548788	365	25.92
44-I-D-PP-145	840327	1548537	366	25.92
44-I-D-PP-148	835246	1544053	367	25.92
44-I-D-PP-157	845284	1547701	368	25.92
44-I-D-PP-161	836020	1544955	369	25.92
44-I-D-PP-166	835374	1545072	370	25.92
44-I-D-PP-17	835499	1548761	371	25.92
44-I-D-PP-18	835447	1548546	372	25.92
44-I-D-PP-20	835427	1548462	373	25.92
44-I-D-PP-21	835332	1548031	374	25.92
44-I-D-PP-23	835584	1548458	375	25.92
44-I-D-PP-26	835936	1541354	376	25.92
44-I-D-PP-27	835495	1547232	377	25.92
44-I-D-PP-30	836976	1547400	378	25.92
44-I-D-PP-31	838665	1548441	379	25.92
44-I-D-PP-33	838775	1548080	380	25.92
44-I-D-PP-36	835585	1540575	381	25.92
44-I-D-PP-37	836059	1541459	382	25.92
44-I-D-PP-38	835394	1540792	383	25.92
44-I-D-PP-39	835837	1540542	384	25.92
44-I-D-PP-41	836116	1540270	385	25.92

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
44-I-D-PP-42	835999	1540411	386	25.92
44-I-D-PP-43	835663	1540407	387	25.92
44-I-D-PP-45	835502	1540819	388	25.92
44-I-D-PP-46	835607	1541067	389	25.92
44-I-D-PP-47	835783	1540910	390	25.92
44-I-D-PP-48	835781	1540796	391	25.92
44-I-D-PP-49	836088	1540954	392	25.92
44-I-D-PP-50	835912	1541230	393	25.92
44-I-D-PP-51	835867	1541298	394	25.92
44-I-D-PP-52	836142	1541148	395	25.92
44-I-D-PP-53	836208	1540378	396	25.92
44-I-D-PP-54	836094	1540448	397	25.92
44-I-D-PP-58	835758	1540317	398	25.92
44-I-D-PP-60	835987	1540605	399	25.92
44-I-D-PP-61	835946	1540590	400	25.92
44-I-D-PP-62	835204	1540447	401	25.92
44-I-D-PP-64	835303	1540541	402	25.92
44-I-D-PP-65	836212	1541249	403	25.92
44-I-D-PP-66	835910	1541167	404	25.92
44-I-D-PP-68	835360	1540482	405	25.92
44-I-D-PP-69	835874	1540851	406	25.92
44-I-D-PP-70	835778	1540820	407	25.92
44-I-D-PP-71	835748	1540840	408	25.92
44-III-B-PP-11	835697	1537632	409	25.92
44-III-B-PP-15	836094	1537862	410	25.92
44-III-B-PP-19	839406	1538230	411	25.92
44-III-B-PP-33	837136	1534898	412	25.92
44-III-B-PP-38	835657	1536864	413	25.92
44-I-D-PP-138	844817	1541158	414	432
44-I-D-PP-140	844933	1540750	415	172.8
44-I-D-PP-73	843770	1540806	416	691.2
44-II-A-PP-02	852278	1555556	417	172.8
44-II-C-PP-04	850966	1547678	418	172.8
37-III-D-PP-01	844528	1565958	419	345.6
37-III-D-PP-02	844800	1565416	420	691.2
37-III-D-PP-03	845083	1564933	421	604.8
37-III-D-PP-04	845255	1564495	422	518.4
37-III-D-PP-05	845549	1564957	423	1728
37-III-D-PP-06	844744	1564315	424	604.8
37-III-D-PP-07	844619	1564736	425	604.8
37-III-D-PP-08	844127	1565295	426	604.8
37-III-D-PP-16	844276	1564008	427	172.8
37-III-D-PP-17	841353	1561826	428	172.8
43-II-C-PP-122	832701	1540204	429	172.8
43-IV-A-PP-01	834770	1537124	430	1728
43-IV-A-PP-04	833944	1538372	431	1728
44-I-B-PP-75	843351	1557802	432	345.6
44-I-D-PP-10	836801	1546006	433	864

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
44-I-D-PP-108	837636	1544802	434	1123.2
44-I-D-PP-116	836275	1544845	435	777.6
44-I-D-PP-137	835514	1543541	436	1728
44-I-D-PP-78	842099	1542077	437	172.8
44-I-D-PP-81	837716	1545405	438	1814.4
43-IV-A-PP-100	830951	1537462	439	69.12
43-IV-A-PP-102	830913	1537418	440	345.6
43-IV-A-PP-103	830933	1537337	441	345.6
43-IV-A-PP-110	830876	1537152	442	345.6
43-IV-A-PP-116	830676	1537016	443	345.6
43-IV-A-PP-132	830639	1536960	444	345.6
43-IV-A-PP-134	830583	1536913	445	345.6
43-IV-A-PP-135	830581	1536918	446	345.6
43-IV-A-PP-150	830214	1536447	447	345.6
43-IV-A-PP-365	831032	1537485	448	345.6
43-IV-A-PP-379	831100	1537527	449	69.12
43-IV-A-PP-381	831415	1538112	450	345.6
43-IV-A-PP-382	831432	1538097	451	345.6
43-IV-A-PP-55	831323	1537881	452	69.12
43-IV-A-PP-57	831192	1537887	453	345.6
43-IV-A-PP-63	831164	1537790	454	345.6
43-IV-A-PP-68	831075	1537672	455	345.6
43-IV-A-PP-72	831092	1537521	456	172.8
43-IV-A-PP-73	831076	1537535	457	345.6
43-IV-A-PP-79	831988	1537999	458	345.6
43-IV-A-PP-80	831960	1538007	459	345.6
43-IV-A-PP-96	830990	1537514	460	345.6
43-IV-A-PP-97	831037	1537478	461	345.6
43-IV-A-PP-98	831065	1537462	462	345.6
43-IV-A-PP-99	830957	1537480	463	345.6
43-IV-A-PP-103	830933	1537337	441	345.6
43-IV-A-PP-110	830876	1537152	442	345.6
43-IV-A-PP-116	830676	1537016	443	345.6
43-IV-A-PP-132	830639	1536960	444	345.6
43-IV-A-PP-134	830583	1536913	445	345.6
43-IV-A-PP-135	830581	1536918	446	345.6
43-IV-A-PP-150	830214	1536447	447	345.6
43-IV-A-PP-365	831032	1537485	448	345.6
43-IV-A-PP-379	831100	1537527	449	69.12
43-IV-A-PP-381	831415	1538112	450	345.6
43-IV-A-PP-382	831432	1538097	451	345.6
43-IV-A-PP-55	831323	1537881	452	69.12
43-IV-A-PP-57	831192	1537887	453	345.6
43-IV-A-PP-63	831164	1537790	454	345.6
43-IV-A-PP-68	831075	1537672	455	345.6
43-IV-A-PP-72	831092	1537521	456	172.8
43-IV-A-PP-73	831076	1537535	457	345.6

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-IV-A-PP-79	831988	1537999	458	345.6
43-IV-A-PP-80	831960	1538007	459	345.6
43-IV-A-PP-96	830990	1537514	460	345.6
43-IV-A-PP-97	831037	1537478	461	345.6
43-IV-A-PP-98	831065	1537462	462	345.6
43-IV-A-PP-99	830957	1537480	463	345.6
44-II-A-PP-05	851085	1555650	464	1209.6
44-II-C-PP-05	850614	1547323	465	86.4
44-III-B-PA-55	842624	1537128	466	86.4
37-III-D-PA-02	836691	1561337	467	864
37-III-D-PP-09	844718	1564887	468	86.4
37-III-D-PP-11	844548	1564745	469	86.4
37-III-D-PP-14	843711	1564545	470	172.8
37-III-D-PP-23	845831	1563480	471	432
43-II-C-PP-118	832617	1540096	472	172.8
43-II-C-PP-133	833442	1541795	473	172.8
44-I-B-PA-20	847700	1559295	474	172.8
44-I-B-PA-22	844233	1557173	475	172.8
44-I-B-PP-67	842277	1551865	476	172.8
44-I-B-PP-73	842428	1552427	477	172.8
44-I-B-PP-74	843020	1554257	478	172.8
44-I-B-PP-91	845226	1551344	479	172.8
44-I-D-PA-16	835469	1547210	480	86.4
44-I-D-PA-38	842064	1546559	481	86.4
44-I-D-PA-62	840795	1542517	482	86.4
44-I-D-PP-08	837630	1544500	483	172.8
44-I-D-PP-105	840409	1543016	484	172.8
44-I-D-PP-133	838654	1540743	485	172.8
44-I-D-PP-14	835330	1548036	486	172.8
44-I-D-PP-163	841832	1540924	487	1036.8
44-I-D-PP-164	841481	1540569	488	864
44-I-D-PP-40	836074	1540390	489	172.8
44-I-D-PP-91	840923	1546108	490	172.8
44-III-B-PP-09	836404	1538210	491	172.8
44-III-B-PP-47	841160	1534291	492	172.8
43-IV-A-PP-387	832901	1536258	493	77.76
44-III-B-PP-28	837822	1534303	494	216

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
44-III-B-PP-29	838625	1532660	495	216
44-I-D-PA-31	843518	1540094	496	43.2
44-I-D-PP-11	843202	1540663	497	43.2
44-I-D-PP-72	843201	1540671	498	43.2
44-II-A-PP-03	853013	1554216	499	43.2
44-II-A-PP-04	851142	1550831	500	43.2
44-II-C-PA-01	851169	1547213	501	43.2
44-III-B-PA-02	849614	1537325	502	43.2
44-III-B-PA-03	849574	1537094	503	43.2
44-III-B-PA-04	849385	1537313	504	43.2
44-III-B-PA-05	849337	1537276	505	43.2
44-III-B-PA-07	848244	1537727	506	43.2
44-III-B-PA-11	846332	1538143	507	43.2
44-III-B-PA-12	844248	1539583	508	43.2
44-III-B-PA-59	843377	1536017	509	43.2
44-III-B-PA-60	843606	1535741	510	43.2
44-III-B-PA-61	844159	1535739	511	43.2
44-III-B-PA-62	844083	1535527	512	43.2
44-III-B-PA-63	844526	1535752	513	43.2
44-III-B-PA-64	844970	1535795	514	43.2
44-III-B-PA-65	845231	1536316	515	43.2
44-III-B-PP-01	845794	1538614	516	43.2
44-III-B-PP-02	845104	1539034	517	43.2
44-III-B-PP-04	845041	1539075	518	43.2
44-III-B-PP-05	845533	1538976	519	43.2
44-III-B-PP-06	845510	1538301	520	43.2
44-III-B-PP-44	843765	1538527	521	43.2
44-III-B-PP-45	843008	1536971	522	43.2
44-III-B-PP-46	841249	1535014	523	43.2
37-III-D-PA-04	841531	1560676	524	518.4
37-III-D-PA-07	842486	1560995	525	518.4
37-III-D-PP-32	846630	1563840	526	518.4
44-I-B-PA-25	839957	1559599	527	518.4
44-I-B-PP-78	848019	1558946	528	518.4
43-IV-A-PA-220	834610	1537946	529	17.28
43-IV-A-PA-223	834981	1537814	530	17.28
43-IV-A-PA-225	833761	1538276	531	17.28

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
43-IV-A-PA-226	833757	1538275	532	17.28
43-IV-A-PP-346	834427	1538307	533	17.28
43-IV-A-PP-347	834552	1538577	534	17.28
43-IV-A-PP-353	834157	1537692	535	17.28
43-IV-A-PP-355	833455	1537543	536	17.28
43-IV-A-PP-356	833033	1537752	537	17.28
43-IV-A-PP-357	833428	1537879	538	17.28
43-IV-A-PP-359	833352	1538218	539	17.28
43-IV-A-PP-363	833624	1539075	540	17.28
43-IV-A-PP-364	833559	1538685	541	17.28
43-IV-A-PP-369	834196	1533374	542	17.28
43-IV-A-PP-370	832663	1536399	543	17.28
43-IV-A-PP-371	832614	1536275	544	17.28
43-IV-A-PP-372	832821	1536208	545	17.28
44-I-B-PA-10	840148	1552226	546	17.28
44-I-B-PA-11	840251	1551900	547	17.28
44-I-B-PA-14	842483	1554999	548	17.28
44-I-B-PA-15	843022	1553830	549	17.28
44-I-B-PA-16	840569	1554001	550	17.28
44-I-B-PA-18	842488	1554046	551	17.28
44-I-B-PA-19	841442	1554241	552	17.28
44-I-B-PP-100	841794	1554562	553	17.28
44-I-B-PP-101	841827	1554487	554	17.28
44-I-B-PP-102	841890	1554678	555	17.28
44-I-B-PP-103	841980	1554467	556	17.28
44-I-B-PP-105	842077	1554474	557	17.28
44-I-B-PP-106	843345	1557070	558	17.28
44-I-B-PP-109	842814	1554646	559	17.28
44-I-B-PP-110	842798	1554744	560	17.28
44-I-B-PP-111	842892	1554590	561	17.28
44-I-B-PP-114	843412	1554784	562	17.28
44-I-B-PP-45	842601	1551635	563	17.28
44-I-B-PP-46	842534	1552260	564	17.28
44-I-B-PP-47	842649	1552358	565	17.28
44-I-B-PP-52	841121	1550344	566	17.28
44-I-B-PP-53	840132	1552213	567	17.28
44-I-B-PP-54	842464	1552480	568	17.28

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
44-I-B-PP-55	842242	1551604	569	17.28
44-I-B-PP-56	842105	1551578	570	17.28
44-I-B-PP-58	842174	1551337	571	17.28
44-I-B-PP-59	842319	1551338	572	17.28
44-I-B-PP-60	842782	1552608	573	17.28
44-I-B-PP-61	842424	1551511	574	17.28
44-I-B-PP-62	841731	1553488	575	17.28
44-I-B-PP-63	842742	1553111	576	17.28
44-I-B-PP-64	843092	1552096	577	17.28
44-I-B-PP-65	842827	1552066	578	17.28
44-I-B-PP-66	842255	1551662	579	17.28
44-I-B-PP-68	842078	1551661	580	17.28
44-I-B-PP-69	842093	1551376	581	17.28
44-I-B-PP-70	841766	1551512	582	17.28
44-I-B-PP-71	841864	1551835	583	17.28
44-I-B-PP-72	841870	1551525	584	17.28
44-I-B-PP-83	842377	1557192	585	17.28
44-I-B-PP-84	840722	1557558	586	17.28
44-I-B-PP-85	842782	1557252	587	17.28
44-I-B-PP-86	844068	1552568	588	17.28
44-I-B-PP-87	843270	1552579	589	17.28
44-I-B-PP-88	845714	1551203	590	17.28
44-I-B-PP-89	844379	1551466	591	17.28
44-I-B-PP-90	845704	1551331	592	17.28
44-I-B-PP-92	840947	1554594	593	17.28
44-I-B-PP-93	841001	1554566	594	17.28
44-I-B-PP-94	841021	1554612	595	17.28
44-I-B-PP-95	841153	1554724	596	17.28
44-I-B-PP-96	841291	1554506	597	17.28
44-I-B-PP-97	841296	1554639	598	17.28
44-I-B-PP-98	841374	1554504	599	17.28
44-I-B-PP-99	841502	1554442	600	17.28
44-I-D-PA-22	835413	1541135	601	17.28
44-I-D-PA-24	835950	1540673	602	17.28
44-I-D-PA-25	836073	1540672	603	17.28
44-I-D-PA-35	839479	1544600	604	17.28
44-I-D-PA-36	838594	1543829	605	17.28

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
44-I-D-PA-37	841287	1545935	606	17.28
44-I-D-PA-39	840780	1545925	607	17.28
44-I-D-PA-40	840581	1544681	608	17.28
44-I-D-PA-41	840958	1545335	609	17.28
44-I-D-PA-43	840725	1545318	610	17.28
44-I-D-PA-47	840839	1542549	611	17.28
44-I-D-PA-48	840388	1542663	612	17.28
44-I-D-PA-49	839958	1542051	613	17.28
44-I-D-PA-55	840775	1545282	614	17.28
44-I-D-PA-58	840563	1542571	615	17.28
44-I-D-PA-59	839710	1541911	616	17.28
44-I-D-PA-61	840810	1541777	617	17.28
44-I-D-PA-66	840787	1542560	618	17.28
44-I-D-PA-67	840485	1542636	619	17.28
44-I-D-PA-69	842498	1543553	620	17.28
44-I-D-PA-71	842439	1544646	621	17.28
44-I-D-PA-80	839106	1541458	622	17.28
44-I-D-PA-81	839305	1543092	623	17.28
44-I-D-PA-82	840096	1542960	624	17.28
44-I-D-PA-83	838433	1540240	625	17.28
44-I-D-PA-87	841310	1549962	626	17.28
44-I-D-PA-88	843769	1546161	627	17.28
44-I-D-PP-03	835071	1547208	628	17.28
44-I-D-PP-100	838881	1543286	629	17.28
44-I-D-PP-106	840905	1543583	630	17.28
44-I-D-PP-119	841289	1542193	631	17.28
44-I-D-PP-120	842989	1543873	632	17.28
44-I-D-PP-121	842544	1544661	633	17.28
44-I-D-PP-122	842913	1544794	634	17.28
44-I-D-PP-123	840744	1544884	635	17.28
44-I-D-PP-124	841116	1545312	636	17.28
44-I-D-PP-125	839814	1542853	637	17.28
44-I-D-PP-126	840144	1543063	638	17.28
44-I-D-PP-128	839576	1541081	639	17.28
44-I-D-PP-132	839534	1541391	640	17.28
44-I-D-PP-134	840168	1540977	641	17.28
44-I-D-PP-135	839096	1541405	642	17.28

Código Pozo SIGAS	X	Y	Código FEFLOW	caudal m3/d
44-I-D-PP-142	840451	1548460	643	17.28
44-I-D-PP-143	840383	1548553	644	17.28
44-I-D-PP-144	840320	1548690	645	17.28
44-I-D-PP-146	839711	1547012	646	17.28
44-I-D-PP-150	837631	1544556	647	17.28
44-I-D-PP-151	844463	1545730	648	17.28
44-I-D-PP-152	845615	1545552	649	17.28
44-I-D-PP-153	844929	1545906	650	17.28
44-I-D-PP-154	844007	1545934	651	17.28
44-I-D-PP-155	843152	1546102	652	17.28
44-I-D-PP-156	845230	1547248	653	17.28
44-I-D-PP-159	841761	1547715	654	17.28
44-I-D-PP-160	841335	1548250	655	17.28
44-I-D-PP-165	835360	1548141	656	17.28
44-I-D-PP-167	839768	1541837	657	17.28
44-I-D-PP-19	835497	1548458	658	17.28
44-I-D-PP-24	835587	1548405	659	17.28
44-I-D-PP-25	835282	1546877	660	17.28
44-I-D-PP-28	836710	1547574	661	17.28
44-I-D-PP-29	836570	1547518	662	17.28
44-I-D-PP-32	836474	1547302	663	17.28
44-I-D-PP-34	839125	1546468	664	17.28
44-I-D-PP-35	838872	1548085	665	17.28
44-I-D-PP-55	836475	1540145	666	17.28
44-I-D-PP-56	835855	1540279	667	17.28
44-I-D-PP-57	835877	1540292	668	17.28
44-I-D-PP-59	836352	1540217	669	17.28
44-I-D-PP-63	835207	1540444	670	17.28
44-I-D-PP-67	835548	1541075	671	17.28
44-I-D-PP-79	836883	1545191	672	17.28
44-I-D-PP-80	836911	1544994	673	17.28
44-I-D-PP-83	838265	1543746	674	17.28
44-I-D-PP-86	841448	1546468	675	17.28
44-I-D-PP-87	841652	1546005	676	17.28
44-I-D-PP-89	841702	1545925	677	17.28
44-I-D-PP-90	842458	1546074	678	17.28
44-I-D-PP-92	838785	1543744	679	17.28
44-I-D-PP-93	839988	1545637	680	17.28
44-I-D-PP-94	840305	1544077	681	17.28

44-I-D-PP-95	840348	1544116	682	17.28
44-I-D-PP-96	840492	1545044	683	17.28
44-I-D-PP-97	840321	1544638	684	17.28
44-I-D-PP-98	839980	1543529	685	17.28
44-III-B-PA-17	838209	1539055	686	17.28
44-III-B-PA-18	837286	1539289	687	17.28
44-III-B-PA-19	837964	1539608	688	17.28
44-III-B-PA-21	838810	1539138	689	17.28
44-III-B-PA-25	837231	1536880	690	17.28
44-III-B-PA-34	835078	1536838	691	17.28
44-III-B-PA-56	842791	1536816	692	17.28
44-III-B-PP-10	836694	1538755	693	17.28
44-III-B-PP-12	835341	1538948	694	17.28
44-III-B-PP-13	837607	1537573	695	17.28
44-III-B-PP-14	836913	1537631	696	17.28
44-III-B-PP-16	836094	1537862	697	17.28
44-III-B-PP-17	835653	1538057	698	17.28
44-III-B-PP-18	837233	1536882	699	17.28
44-III-B-PP-20	838134	1537784	700	17.28
44-III-B-PP-21	839419	1538237	701	17.28
44-III-B-PP-22	838297	1539699	702	17.28
44-III-B-PP-23	837975	1539409	703	17.28
44-III-B-PP-24	838564	1539867	704	17.28
44-III-B-PP-27	845324	1538972	705	17.28
44-III-B-PP-30	835504	1537240	706	17.28
44-III-B-PP-31	835916	1536860	707	17.28
44-III-B-PP-32	835598	1536347	708	17.28
44-III-B-PP-34	835386	1536775	709	17.28
44-III-B-PP-35	835420	1537275	710	17.28
44-III-B-PP-36	835092	1537150	711	17.28
44-III-B-PP-37	835363	1536670	712	17.28
44-III-B-PP-41	836202	1535042	713	17.28
43-IV-A-PP-390	832452	1536239	714	864
43-IV-A-PP-71	831036	1537645	715	86.4
43-II-C-PP-140	833258	1541688	716	25.92
43-IV-A-PP-373	831559	1537237	717	172.8