

AGRADECIMIENTOS

INGEOMINAS, expresa sus agradecimientos a:

Los funcionarios de CORPOURABA, por su colaboración durante nuestras labores de campo.

A todo el gremio bananero de la zona, por su decidido apoyo para la realización de nuestras actividades en las fincas y en el suministro de información.

A las alcaldías de Necoclí, San Juan de Urabá, las juntas de acción comunal de Meyitos, Mulatos, Zapata y Damaquiel, por su gestión con la comunidad, por su colaboración y participación durante las visitas a la región.

A Serviminas y Pozos del Darién por facilitarnos información técnica.

Al Postgrado de Hidráulica de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Medellín, por sus valiosos aportes y colaboración en la ejecución del proyecto.

RESUMEN

INGEOMINAS, a solicitud de Corpourabá, realizó entre agosto de 1993 y agosto de 1995 una evaluación hidrogeológica en el Urabá antioqueño, el área se encuentra entre las poblaciones de Juradó al sur y Arboletes al norte, las estribaciones de la Serranía de Abibe al oriente y el río León al occidente, con una extensión arproximada de dos mil kilómetros cuadrados.

Esta evaluación se realizó con el objetivo de identificar y evaluar las unidades acuíferas presentes en la región y proporcionar a CORPOURABA las herramientas técnicas necesarias para el manejo y control del recurso.

Para tal proposito se realizaron diferentes actividades dentro de las que se cuentan cartografía geológica, prospección geoelectrica, inventario de puntos de agua, balance hídrico, hidrogeoquímica, pruebas de bombeo y monitoreo de niveles estáticos, entre otras.

A través de la compilación, análisis e interpretación de la información se determinaron y caracterizaron las diferentes unidades hidrogeológicas y se evaluo su vulnerabilidad a la contaminación.

1. INTRODUCCION

La Corporación Autónoma Regional del Urabá - CORPOURABA - consciente de las nuevas responsabilidades que le confiere la Ley 99 de 1993, la cual delega en las corporaciones autónomas regionales el manejo y administración de los recursos naturales renovables, viene apoyando y financiando estudios que le permitan ejercer una gestión óptima del recurso hídrico.

Por tal motivo contrató con INGEOMINAS la realización de la evaluación hidrogeológica regional del Urabá antioqueño, cuyos resultados se plantean en el presente informe.

1.1 ANTECEDENTES

En el Urabá antioqueño la utilización del agua subterránea ha tenido un rápido desarrollo en los últimos años, el cual está ligado al desarrollo del cultivo de banano que requiere de grandes volúmenes de agua en sus diferentes etapas de producción, esto ha generado la construcción de una gran cantidad de obras de captación que explotan el recurso, en muchos casos de forma antitécnica.

Sin embargo la explotación del agua subterránea no ha ido acompañada de políticas, ni de

normas de control y manejo que garanticen su protección y sostenibilidad; debido, en parte a que el conocimiento hidrogeológico que se tenía de la región era parcial y no se contaba con un modelo que permitiera describir el comportamiento de los sistemas acuíferos y analizar sus posibilidades de utilización y el riesgo de contaminación que pudieran presentar.

Los estudios de aguas subterráneas realizados en la zona son muy pocos y generalmente de carácter local. INGEOMINAS, en cooperación con TNO-DGV, realizó la prospección hidrogeológica en el noreste de Urabá, entre los municipios de Arboletes y San Juan de Urabá en 1985.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio consiste en identificar y evaluar, mediante la realización de estudios hidrogeológicos básicos, las unidades acuíferas presentes en la región, con el fin de dar a CORPOURABA las herramientas necesarias para el manejo y control del recurso hídrico subterráneo.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

La evaluación hidrogeológica regional del área se enfocó en un área aproximada de 2.000 Km², correspondiente a la zona plana; especialmente la que se encuentra entre el municipio de Turbo y la población de Juradó, por ser la de mayor desarrollo y la que posee la mayor cantidad de información disponible. En la zona montañosa aledaña se realizó un reconocimiento geológico e hidrológico con el fin de evaluar la recarga proveniente de la precipitación de los sistemas acuíferos que allí afloran.

Con el estudio se obtuvo un modelo hidrogeológico conceptual de la región en el que se identifican y caracterizan, en forma regional, los sistemas acuíferos presentes; con base en éste CORPOURABA podrá iniciar su programa de manejo y control del recurso hídrico subterráneo.

Dadas las circunstancias difíciles de orden público por las que ha atravesado la región durante la ejecución de este proyecto, la recopilación de datos de campo estuvo restringida en ciertas zonas, ya que el acceso a ellas era imposible; para estas zonas se extrapolaron los resultados, cuando fue posible, obtenidos en sitios cercanos.

La región comprendida entre Turbo y Necoclí fue la más crítica en cuanto a orden público, en ésta solo se pudo realizar el inventario de puntos de agua. En las partes altas de la serranía, en la cual se realizó el reconocimiento geológico, no se hicieron controles de campo

por la misma razón. La zona entre Currulao y Turbo presentó dificultades para realizar la nivelación topográfica y pruebas de bombeo, por similares razones.

1.5 METODOLOGIA

La metodología seguida en la realización del estudio fue la siguiente:

Evaluación Geológica: Para la realización de esta etapa se hizo una recopilación bibliográfica de los trabajos desarrollados anteriormente; la interpretación geológico-estructural del área en su conjunto se realizó con base en una fotointerpretación, procesamiento de imágenes de satélite y reconocimiento de campo, en el cual se levantaron columnas estratigráficas y se realizaron mediciones de elementos estructurales.

Los resultados de esta etapa se resumen en el mapa geológico de la región a escala 1:50.000.

Reconocimiento Hidrogeológico mediante inventario de puntos de agua: Se hizo un muestreo selectivo de pozos, aljibes y manantiales, buscando un cubrimiento espacial lo mas homogéneo posible (un punto por Km²). Dentro de este muestreo se analizaron en campo algunas propiedades físicas y químicas de las aguas, se determinaron caudales de explotación y se tomaron niveles estáticos; también se recopiló información litológica e hidráulica de pozos en las compañías que han perforado en la región.

La información recopilada durante esta etapa permitió identificar y caracterizar, de forma preliminar, los diferentes sistemas acuíferos presentes en el área así como diseñar y programar las siguientes etapas del proyecto.

Evaluación Geofísica: A través de la ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), se determinó la variación de la resistividad de las rocas en el subsuelo (aproximadamente hasta 250m de profundidad) y la identificación de las capas geoelectricas. La correlación de esta información con la obtenida en otras etapas permitió definir la distribución espacial de los acuíferos.

Evaluación Hidrogeoquímica: En esta fase se realizó un muestreo de aguas subterráneas, en una red seleccionada con base en el inventario de puntos de agua. Se realizaron los análisis físico-químicos correspondientes, se interpretaron los datos haciendo análisis geoestadístico y se correlacionaron con las demás características hidrogeológicas del área.

Evaluación Hidrológica: Se recopiló información hidrometeorológica en los archivos del Himat, hoy IDEAM; se adquirió la información agrológica del área. Se procesó y analizó esta información para realizar un balance de humedad del suelo que condujera al cálculo de la recarga potencial y real de los diferentes sistemas acuíferos.

Evaluación Hidrogeológica: Con base en la información recopilada en las diferentes etapas del proyecto, la realización de pruebas de bombeo (cuya interpretación y análisis definió las características hidráulicas básicas del acuífero) y las mediciones periódicas de niveles estáticos (que permitieron conocer el sistema de flujo regional) se planteó un modelo hidrogeológico conceptual de la región, el cual consta básicamente de los siguientes elementos:

- Distribución espacial de los acuíferos.
- Características litológicas y estructurales
- Características hidráulicas y sistema de flujo
- Caracterización hidroquímica
- Acciones externas (Recarga - Descarga)
- Evaluación de reservas
- Vulnerabilidad a la contaminación

Los resultados se resumen en el mapa hidrogeológico de la región que se presenta a escala 1:50.000.

1.6 DESCRIPCION GENERAL DEL AREA

El área del proyecto se encuentra ubicada al nor-occidente del departamento de Antioquia, cubriendo una extensión total aproximada de 6.300 km². Está enmarcada por las Serranías de Abibe y de las Palomas al oriente, el litoral del mar Caribe al norte, el Golfo de Urabá al occidente y el río León al sur (Figura No. 1.1).

Sus puntos extremos se localizan con las coordenadas geográficas 8°55'(punta Arboletes) y 7°30' de latitud Norte y 76°57' y 76°13' de longitud Oeste.

La zona plana, objeto principal del estudio, tiene alturas menores de 50 m.s.n.m. y una extensión aproximada de 2.000 km², el resto del área lo ocupan las cadenas de colinas pertenecientes a la Serranía de Abibe con alturas que no superan los 1.000 m.s.n.m. A la zona se llega por vía aérea o terrestre. Por vía aérea existen terminales en Chigorodó, Carepa, Turbo y Necoclí. Por vía terrestre mediante la Carretera al Mar, que conduce de Medellín a Arboletes, pasando por las poblaciones de Santafé de Antioquia, Cañasgordas, Dabeiba, Mutatá, Juradó, Chigorodó, Carepa, Apartadó, Turbo, Necoclí, Mulatos, Zapata, San Juan de Urabá y Arboletes. Esta se encuentra pavimentada casi en su totalidad hasta Turbo, de aquí en adelante está sin pavimentar pero en buenas condiciones.

figura 1.1

La zona comprendida entre los ríos Chigorodó y Turbo es predominantemente urbana, y es donde se ha concentrado no sólo la población sino los mercados de bienes de consumo y los servicios públicos. Apartadó actúa como centro regional debido a su dinamismo, ya que concentra gran parte de los establecimientos comerciales, industriales y de servicios. También es centro financiero, de comunicaciones y asiento de las actividades empresariales asociadas con la agroindustria bananera.

De acuerdo al último censo de población realizado en 1993, los municipios involucrados en el área de estudio tienen una población discriminada por cabecera municipal y rural como se observa en la Tabla No. 1.1

El sector más dinámico de la economía de la región es el primario, en el cual el subsector agropecuario se ha constituido en la actividad motriz del desarrollo económico, social y espacial. Los mayores índices de la producción se relacionan con la exportación de banano.

Existen en la región como principales establecimientos manufactureros, dos embotelladoras de gaseosas, una fábrica de cartón y una industria procesadora de alimentos lácteos. Los demás establecimientos están asociados a la producción empresarial agrícola, al procesamiento de especies forestales y al suministro de bienes de consumo perecederos, con destino al mercado regional.

TABLA No. 1.1

POBLACION URBANA Y RURAL DEL URABA ANTIOQUEÑO

MUNICIPIO	POBLACION		
	URBANA	RURAL	TOTAL
APARTADO	48.838	11.013	59.851
ARBOLETES	13.122	13.376	26.498
CAREPA	10.789	12.645	23.434
CHIGORODO	24.248	7.237	31.485
NECOCLI	8.642	25.484	34.126
TURBO	32.462	29.725	62.187
SAN JUAN DE URABA	7.857	7.262	15.119
SAN PEDRO DE URABA	10.213	15.669	25.882
TOTAL	156.171	122.411	278.582

Fuente DANE, Censo 1993

La pesca y las actividades relacionadas con ésta tienen gran importancia, no solo como fuente de empleo sino como fuente alimentaria de la población. Están localizadas en la costa nororiental, Turbo y Arboletes.

1.7 SERVICIOS PUBLICOS

1.7.1 Acueducto. Urabá es una de las regiones con más baja cobertura en servicios de

acueducto y alcantarillado en el país. En términos generales, el estado de las redes de acueducto es deficiente y donde se encuentra no posee tratamiento completo y potabilización.

El 49.5% de las viviendas de Urabá no cuentan con conexión interna de acueducto. El porcentaje de cobertura residencial en cabecera municipal, es menor del 70% en Arboletes, San Juan de Urabá, Necoclí y Apartadó. En Turbo y Chigorodó está entre el 70% y 80% y en Carepa está entre el 80% y 90% (I.G.A.C, 1990).

El acueducto de la cabecera municipal de Chigorodó es abastecido actualmente por dos pozos, con producciones de 30 y 60 l/s, con agua de buena calidad para el consumo humano, a excepción del hierro que debe ser tratado. La capacidad de los dos pozos (90 LPS) es insuficiente para cubrir la demanda actual de 116 l/s (A.C.P, 1995).

En Carepa, tanto la zona urbana como la rural se abastecen de agua subterránea. Para la zona urbana se cuenta actualmente con un pozo de 100 m de profundidad y una producción de 20 l/s. Para satisfacer la demanda actual se requieren 53 l/s. Los valores de dureza y cloruros están dentro de los rangos permisibles, pero las altas concentraciones de hierro deben ser tratadas.(A.C.P.,1995).

En Apartadó es ampliamente usada el agua subterránea, tanto en la zona urbana como

rural, no solo para el consumo humano sino para el agrícola. El sistema actual del acueducto de Apartadó tiene como fuente el río Apartadó, mediante una captación con capacidad para 500 l/s. En la época seca, el caudal mínimo disponible (135 l/s) es insuficiente para satisfacer la demanda actual de 234 l/s. (A.C.P, 1995).

Currulao tiene una amplia utilización de aguas subterráneas, principalmente de aljibes hacia la parte NW de la cabecera municipal. El acueducto en la cabecera municipal se abastece de dos pozos con producciones de 11 y 15 l/s, que son insuficientes para la demanda actual de 30 l/s. El agua es sometida a procesos de aireación y suavización por su alta dureza. (A.C.P.,1995).

En el corregimiento de El Tres, el acueducto de la población se abastece mediante un pozo con producción de 8 l/s, teniendo un requerimiento actual de 12 l/s. El agua no es sometida a ningún tratamiento antes de ser distribuida.(A.C.P.,1995).

El acueducto de Turbo es abastecido por agua del río del mismo nombre, con caudales captados de 40 a 50 l/s, complementado con un pozo de 110 m de profundidad y una capacidad de producción de 30 l/s, presentando problemas de salinización. La demanda actual es de 152 l/s.(A.C.P.,1995).

Arboletes se abastece con agua superficial mediante un bombeo de 42 l/s, el agua es tratada

con cloración.

San Pedro de Urabá utiliza también agua superficial para su acueducto, con capacidad de bombeo de 7 l/s y tratamiento por cloración.

1.7.2 Alcantarillado. El servicio de alcantarillado presenta grandes deficiencias, en este sentido la región de Urabá tiene una de las más bajas coberturas en Colombia. El alcantarillado urbano tiene cobertura menor del 20% en Necoclí y San Juan de Urabá; en Arboletes y Turbo entre el 20 y 50% y Apartadó, Carepa y Chigorodó entre el 51 y 80% (I.G.A.C., 1990).

En la región no existe ningún sistema de tratamiento de aguas residuales y la evacuación de aguas servidas de las cabeceras municipales cubiertas por alcantarillado, se hace en los cauces de los ríos o quebradas que atraviesan los centros urbanos.

1.7.3 Energía Eléctrica. El servicio de fluido eléctrico a la región se suministra por abastecimiento en bloque de las Empresas Públicas de Medellín desde 1980, mediante el sistema de transmisión Antioquia-Frontino-Apartadó, que integró estos municipios al sistema central de energía, y a la red de subtransmisión Apartadó-Turbo y Apartadó-Chigorodó. (I.G.A.C., 1990).

De la subestación de Apartadó parten líneas de 13.2 KV a Turbo y Chigorodó. Existe interconexión con Carepa, Currulao, El Tres y Necoclí. (I.G.A.C, 1990).

Los demás centros urbanos como Arboletes y San Pedro de Urabá reciben la energía de plantas DIESEL, administradas por Electrificadora de Antioquia, con funcionamiento no permanente por el alto costo y dificultades en la consecución de combustible.(I.G.A.C., 1990).

2. EVALUACION DE LA RECARGA PROVENIENTE DE LA PRECIPITACION

2.1 GENERALIDADES

Toda el área del estudio pertenece al piso térmico cálido (alturas hasta 1.000 m.s.n.m, temperatura media anual mayor de 24°C) pero con distinto grado de humedad, lo cual permite distinguir dos zonas con diferente tipo de clima, según la clasificación climática de Caldas-Lang (ESLAVA, et al, 1986).

La primera corresponde al clima cálido semihúmedo y se extiende desde la costa del mar Caribe hasta el municipio de Chigorodó aproximadamente. La segunda se localiza en el extremo sur del área y se caracteriza por tener muy altas precipitaciones, pertenece al clima cálido húmedo.

En general el área de estudio presenta una alta pluviosidad, especialmente en la parte central y sur, donde la precipitación anual aumenta en el sentido noreste-suroeste desde 2.200 mm hasta llegar a valores mayores de 3.800 mm. La zona más seca se localiza en las partes altas de las cuencas de los ríos San Juan y Mulatos, con valores de precipitación menores a los 1.600 mm/año.

El régimen de las lluvias es unimodal con un período seco durante los primeros meses del año (enero, febrero y marzo).

En el área de estudio, como en todas las tierras tropicales, las estaciones no son térmicas sino húmedas, por lo cual no se observa variación notoria de los parámetros meteorológicos durante el año.

La temperatura media anual para la zona plana presenta una ligera disminución en dirección norte-sur desde 27.2°C (estación Arboletes) hasta 26.4°C (estación Idema-Montecristo). Igualmente en las áreas montañosas la temperatura media disminuye y puede estimarse con base en un gradiente de 0.5°C por cada 100 m de elevación (LASSO, 1983).

La humedad relativa media registra valores muy altos, en promedio de 86%, con un pequeño incremento hacia el sur. Como se observa en los datos del anexo 1.

La disponibilidad del brillo solar oscila entre 5.4 horas/sol diarias en la estación Arboletes y 3.1 horas/sol en la estación Villa Arteaga y está relacionada directamente con la nubosidad, la cual permanece alta y prácticamente todos los días del año se clasifican como cubiertos.

Los vientos, durante el período comprendido entre los meses de diciembre y abril,

corresponden a los alisios del norte, presentando mayor velocidad. Durante los demás meses, el viento proviene del sur y en general es más suave.

En las zonas costeras del mar Caribe y el Golfo de Urabá se presentan los vientos más fuertes, ocasionando con frecuencia daños en la agricultura.

Con base en los datos de las mediciones directas de la evaporación se puede deducir que la evaporación anual disminuye de la costa hacia el interior y es inferior a la precipitación para toda la zona, con valores que oscilan entre 888.5 mm/año en Villa Arteaga y 1694.1 mm/año en Caribia (ver anexo 1).

2.2 METODOLOGÍA

El objetivo principal del análisis hidrometeorológico realizado para la zona de estudio es la estimación de la recarga potencial de los acuíferos, mediante la utilización del balance hídrico a nivel mensual. Por esta razón el análisis hidrometeorológico se orientó únicamente hacia los parámetros relacionados con el balance (precipitación, evapotranspiración y escorrentía).

La evaluación de la recarga se realizó empleando un modelo que contempla el balance

hídrico superficial y el balance de humedad del suelo.

En lo referente a la dinámica del agua en el suelo y el cálculo de la evapotranspiración real, el modelo en mención conserva los conceptos expuestos por PENMAN-GRINDLEY (SHAW, 1983).

El método determina la precipitación efectiva, que inicialmente debe satisfacer cualquier déficit de humedad del suelo para posteriormente convertirse en recarga bajo condiciones de saturación.

Además, el modelo calcula la evapotranspiración real, la cual puede ser igual a la evapotranspiración potencial, cuando hay disponibilidad hídrica y la planta puede extraer agua libremente del suelo o menor, cuando hay restricción por un estado deficitario.

Cada tipo de suelo tiene sus características físicas propias y de acuerdo con éstas, una diferente capacidad de almacenamiento, regulando así la cantidad de agua disponible para la recarga, razón por la cual la zonificación de los suelos se utilizó como criterio de discretización del área estudiada para realizar los balances de humedad del suelo.

Para la realización de los balances hídricos de superficie fue necesario determinar el

comportamiento espacio-temporal de los parámetros climatológicos, tales como la precipitación, la evapotranspiración potencial y la escorrentía directa, para así poder obtener los valores ponderados de estos parámetros en las zonas con diferentes tipos de suelo.

Con base en la recarga potencial, estimada para diferentes tipos de suelo, en el capítulo de Hidrogeología se estima la recarga real.

2.3 PRECIPITACION

2.3.1 Información utilizada. En el área de estudio y las zonas aledañas han funcionado aproximadamente 30 estaciones meteorológicas de variadas categorías, durante períodos variables y no homogéneos, instaladas y operadas por diferentes entidades.

En esta zona, al igual que en el resto del país, el período de observación, el sistema de medición, el procesamiento de los datos y la distribución de las estaciones han sido heterogéneas.

La mayoría de las estaciones se encuentran ubicadas en la parte sur del área, correspondiente a la zona bananera, que se ha desarrollado en la llanura aluvial de Mutatá-Turbo al oriente del río León (con alturas hasta 100 m.s.n.m.), además el litoral del mar

Caribe y el Golfo de Urabá cuentan con algunas estaciones meteorológicas, mientras que las partes montañosas hacia las divisorias de aguas carecen de éstas.

Dados los fines de este estudio y teniendo en cuenta la distribución espacial de los afloramientos de las formaciones geológicas de importancia hidrogeológica, se consideró que la red de estaciones meteorológicas descrita en el párrafo anterior es suficiente para cumplir con el objetivo propuesto, pero puede resultar limitante en el caso de los estudios específicos.

Para disponer de una información de precipitación comparable, se realizó un análisis preliminar de los registros de las estaciones pluviométricas existentes, eliminando las estaciones con registros de corta duración y datos sospechosos en su calidad, luego se analizó la posibilidad de homogeneizar las series seleccionadas.

Se eligió el período 1977-1989 para el cálculo de los parámetros característicos de precipitación, ya que la mayoría de las estaciones fueron instaladas en el año 1977 y la información adquirida en el HIMAT (hoy IDEAM) fue procesada hasta el año 1989.

La complementación y la extensión de las series analizadas se obtuvo mediante regresiones lineales a nivel mensual y el método de proporciones. Su depuración, verificación de la consistencia y homogeneidad se realizó aplicando el análisis de dobles masas, con el cual se

detectó irregularidad en los registros de algunas estaciones. Finalmente se seleccionaron 18 estaciones para el análisis estadístico de la precipitación.

Sus coordenadas, los períodos de registro y otras características se presentan en la Tabla No. 2.1 y su localización en la Plancha No. 2.1. Los registros de las estaciones en mención obtenidos del banco de datos del HIMAT, se pueden consultar en el Anexo No.1.

Utilizando la información de las series completadas y corregidas, se llevó a cabo la estimación de las principales características, que describen el comportamiento del parámetro en mención, y que permiten para cualquier punto del área estudiada obtener la información referente a esta variable meteorológica, como es: la precipitación media multianual, precipitación anual para los años húmedo y seco, la distribución de la precipitación durante el año.

2.3.2 Precipitación media multianual. Para su presentación espacial fue elaborado el mapa de isoyetas a escala 1:200.000 (Plancha No. 2.1.), con base en los valores de precipitación media multianual (1977-1989), resumidos en la Tabla No.2.2., utilizando la técnica Kriging de interpolación lineal, mediante el software GEOEAS.

Tabla 2.1, 2.2

¡Error! Marcador no definido.

La localización geográfica de la zona del estudio (extremo noroccidental del continente, sobre las costas del mar Caribe, en plena zona ecuatorial) en conjunto con la influencia que ejerce la Zona de Confluencia Intertropical, condicionan las propiedades físicas de la atmósfera que definen la distribución espacio-temporal de la precipitación.

La mayor parte del área (la zona central y la zona sur) se caracteriza por tener alta pluviosidad, presentando valores superiores a 2.200 mm/año. El aumento de la precipitación anual y de su gradiente se presentan en dirección noreste-suroeste. En el extremo sur del área la precipitación llega hasta 3.800 mm/año.

Así mismo se observa un ligero incremento en los valores de la precipitación anual registrados en las estaciones Arboletes y San Juan de Urabá, ubicadas en el norte del área. Este aumento es ocasionado por las circulaciones locales (las brisas de mar y tierra) y su encuentro con la barrera orográfica, aunque ésta sea de poca elevación (RANGEL,1982).

Los valores mínimos de la lluvia se registran en las estaciones El Carmelo y Pueblo Bello, enmarcando la zona seca en las partes altas de las cuencas de los ríos San Juan y Mulatos donde la precipitación disminuye hasta 1.600 mm/año.

2.3.3 Precipitación de los años húmedo y seco. Dado que la lluvia es un elemento

meteorológico de carácter aleatorio y varía tanto en el espacio como en el tiempo, conviene conocer su valor probable para los años tipo (húmedo y seco). Estos años se determinan a partir de las leyes estadísticas de distribución y normalmente las probabilidades correspondientes se definen según el objetivo del estudio.

A partir de las series completadas y homogeneizadas se efectuó el análisis estadístico de los totales anuales de la precipitación, obteniéndose los descriptores estadísticos de cada serie tales como la media (P), el coeficiente de variación (Cv) y la desviación estándar (σ) (Tabla No.2.2.), los cuales sirven como guía para seleccionar la función de distribución que más se ajuste a la muestra de datos.

El Cv es la medida de la variación relativa de una variable y si se tiene en cuenta que este parámetro es adimensional, puede ser utilizado como parámetro de regionalización, lo cual es muy útil en las áreas con información deficiente.

El análisis de la variabilidad de la precipitación da una idea sobre las fluctuaciones presentadas en las series con respecto a la media y constituye un factor importante para considerar la estabilidad de los promedios obtenidos.

Analizando la Tabla No.2.2. se puede notar, que la variabilidad de la precipitación anual en

el área es baja (C_v esta comprendido entre 0.09 y 0.22), lo cual indica que los promedios multianuales de este parámetro obtenidos con las series relativamente cortas (1977-1989), tienen un alto grado de confianza.

Las series analizadas fueron ajustadas a la ley de distribución log-normal. El ajuste y los valores de la precipitación anual de diferentes probabilidades se presentan en el Anexo No. 1. Se observa que la diferencia entre los valores de la precipitación anual se hace más notoria para las probabilidades o muy altas o muy bajas, por lo cual se determinaron las probabilidades del 10% y 90% de excedencia para los años húmedo y seco respectivamente.

Es decir, el año seco es aquel que presenta una probabilidad del 90% de ser excedida y el año húmedo es aquel que presenta una probabilidad del 10% de ser excedida. Los valores de precipitación anual de estos años se resumen en la Tabla No.2.2.

A partir de estos datos fueron elaborados los mapas de isoyetas para los años húmedo y seco (Planchas Nos.2.2. y 2.3.); en ellos se observa que la variación espacial de la precipitación es de carácter similar al mapa de isoyetas medias multianuales, con las diferencias desde luego, que aparecen en cuanto a los valores de precipitación según el tipo de año. Así por ejemplo los valores de la precipitación anual en el área para el año húmedo varían entre 2.000 y 4.400 mm/año y para el año seco entre 1.200 y 3.200 mm/año.

2.3.4 Distribución de la precipitación durante el año. Para los fines de este estudio la distribución de la precipitación durante el año es un aspecto muy importante, ya que ésta define en un alto grado la disponibilidad hídrica para la recarga de los acuíferos.

El análisis de este aspecto se adelantó elaborando gráficas que indican la distribución porcentual de las cantidades mensuales de precipitación durante el año (Figuras Nos. 2.1. a, b y c).

Los valores porcentuales mensuales calculados para las 18 estaciones analizadas se presentan en la Tabla No.2.3. El análisis de dicha información indica, que aún cuando ciertos detalles son diferentes y específicos en la variación de la precipitación dentro del año, para las estaciones en mención, las características esenciales de la distribución son semejantes para toda el área.

Este tipo de distribución es unimodal y se caracteriza por la presencia de un período de bajas precipitaciones y un período con lluvias abundantes.

figura 2.1 a, b, c y tabla 2.3

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

En la tabla 2.3 se observa que para toda la zona de estudio se destaca una marcada temporada de escasez de lluvias, que abarca el período de enero a marzo, durante el cual se precipita en promedio menos del 8% del total de la precipitación anual. El período húmedo se extiende de mayo a noviembre aportando más del 75% de la cantidad anual de lluvia. Normalmente los meses de abril y diciembre se consideran como períodos de transición, siendo el último de menor precipitación.

2.4 EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL

La evapotranspiración es uno de los componentes más importantes del balance hídrico y también el menos conocido. Representa la cantidad de agua saliente del área hacia la atmósfera por una combinación de la evaporación física y de la transpiración de la vegetación.

La evapotranspiración depende fundamentalmente de las condiciones climáticas dadas por las características físicas de la atmósfera, ubicada cerca al suelo.

Cuando el terreno está totalmente cubierto por vegetación bien desarrollada y tiene a su disposición toda el agua que requiere, la evapotranspiración real es igual a la tasa de evapotranspiración potencial (ETP).

La ETP es un parámetro físico medible y cuantificable; para su cálculo existen varios métodos empíricos, la mayoría ellos utilizan fórmulas que han sido obtenidas en condiciones climáticas diferentes a las tropicales, por lo que es necesario proceder a su evaluación para seleccionar el método más adecuado.

Una forma aproximada y rápida de obtener la evapotranspiración potencial es estimarla a partir de las mediciones de la evaporación (EV) en el tanque tipo A (Superficial), del cual se tiene la siguiente relación.

$$ETP = K * EV$$

Donde K es el "factor de tanque". Para éste tipo de tanques K tiene valores entre 0.6 y 0.82 (Silva, 1988) utilizándose el valor de 0.75, de tal manera que:

$$ETP = 0.75 EV$$

No obstante, este procedimiento debe considerarse como un paso preliminar, puesto que solamente se llegará a una evaluación mejor cuando se disponga de información directa y confiable de los lisímetros.

2.4.1 Información utilizada. El área estudiada cuenta con los registros de 14 estaciones climatológicas, sin embargo la información climatológica requerida para el cálculo de la ETP y suministrada por el HIMAT es deficiente e incompleta en la mayoría de los casos (ver

Tabla No.2.4. y Anexo No.1.). Además, los períodos de observación de los diferentes parámetros meteorológicos para la misma estación frecuentemente son distintos.

Teniendo en cuenta lo anterior y después de un análisis previo, se optó por utilizar únicamente los registros de las siguientes estaciones: Arboletes, Caribia, Apto. Gonzalo Mejía, Uniban, Idema-Montecristo y Villa Arteaga, considerando que la ubicación de éstas (Plancha No.2.1.) es representativa para el área de interés.

Debido a los problemas relacionados con la información climatológica adquirida, no se pudo hacer ningún tipo de tratamiento de datos, por lo tanto la ETP se calculó utilizando la información de diferentes períodos de registro, la cual se resume en la Tabla No.2.5.

Esto no afectó en grado significativo los resultados, ya que los factores meteorológicos que condicionan la ETP (principalmente radiación global, temperatura, déficit de saturación y viento), en estas tierras tropicales presentan variaciones anuales y mensuales de reducida amplitud.

2.4.2 Cálculo de la evapotranspiración potencial. La ETP fue calculada a nivel mensual utilizando las fórmulas de PENMAN (el método más completo y ampliamente utilizado en el mundo), CHRISTIANSEN (según las recomendaciones del HIMAT, 1985), THORNTHWAITE (el método más accesible para estimar la ETP) y GARCIA-LOPEZ

tabla 2.4, 2.5

¡Error! Marcador no definido.

(el método desarrollado con base de datos de las estaciones tropicales). Para la estación climatológica Uniban la ETP se calculó únicamente con las fórmulas de THORNTHWAITE y GARCIA-LOPEZ, ya que esta estación carece de los registros confiables de la velocidad de viento.

Los resultados de estos cálculos a nivel anual se presentan en la Tabla No.2.6. donde además se relacionan los valores anuales de la evaporación obtenidos de los registros directos.

Las fórmulas de PENMAN, THORNTHWAITE y GARCIA-LOPEZ dieron valores bastante altos, en comparación con los obtenidos a partir de los datos de evaporación, (numeral 2.4), indicando una sobre estimación de la ETP (ETP debe ser menor que la EV), mientras que los resultados obtenidos con la aplicación de la fórmula de CHRISTIANSEN para la mayoría de los casos conservan la relación existente entre la ETP y la EV, debido a lo cual se decidió utilizar estos últimos (ver tabla 2.6).

2.4.3. Variación de la ETP con la elevación. Para la realización de los balances hídricos se requiere la estimación de la ETP en diferentes sitios del área estudiada, por lo cual fue necesario convertir los resultados puntuales de la ETP a una forma global.

La ETP disminuye con la altura debido a las variaciones de los parámetros climatológicos.

tabla 2.6

Esta relación se determinó con base en los valores anuales de la ETP, calculados con la fórmula de CHIRSTIANSEN, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\text{ETP (mm)} = 1310.90 - 6.79 * H + 0.01 * H^2$$

donde :

H = elevación, m.s.n.m.

Empleando esta ecuación se puede estimar la ETP para las elevaciones menores de 150 m.s.n.m., puesto que en el área de estudio no se tienen datos climatológicos para las alturas mayores.

Del análisis de la Figura No. 2.2, la cual representa la curva generalizada de la relación entre la ETP anual y elevación, se destaca que el gradiente vertical de la ETP en el área de estudio es bastante alto y aumenta con la altura.

A pesar de que la relación encontrada es una aproximación válida, debe ser utilizada con precaución, teniendo en cuenta la limitación de la información utilizada en su obtención y en la medida que sea posible, debe ser actualizada.

figura 2.2

¡Error! Marcador no definido.

Para las alturas mayores de 150 m.s.n.m. la ETP puede ser estimada a partir de los datos de la evaporación como se muestra en el numeral 2.4.2 (ITAMAR y GUZMAN, 1977).

2.4.4 Variación de la ETP durante el año. La evaluación de la variación interanual de la ETP se realizó analizando los valores mensuales de este parámetro calculados únicamente con la fórmula CHRISTIANSEN (Anexo No.1., Tabla No.2.7 y Figura No. 2.3).

La fluctuación de la ETP durante el año es bastante uniforme, la máxima amplitud porcentual encontrada es de 4.3 % del total anual en la estación Idema-Montecristo. Se observa que generalmente los valores máximos se presentan durante el primer trimestre (el período más seco del año) y varían entre 11.0% y 9.3%. Los valores mínimos se presentan en el mes de septiembre para la estación Arboletes (7.2%) y en el mes de junio para el resto de estaciones (entre 6.8% y 7.2%). Como se observa en la Tabla No. 2.7 y la Figura No. 2.3.

2.4.5 Estimación de la ETP para los años húmedo y seco. Debido a que la información climatológica existente no permitió realizar los cálculos de la ETP para obtener una serie de varios años (ver numeral 2.4.1) y como resultado no se pudo realizar el análisis de frecuencias, para estimar la ETP de los años húmedo y seco, se tuvo en cuenta la baja variabilidad de este parámetro (ITAMAR y GUZMAN,1976).

TABLA 2.7, FIG 2.3

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

Tomando los valores extremos de dicha variabilidad para los años tipo, se determinó que en un año húmedo la ETP será mayor en un 14% que el promedio multianual y en un año seco, será menor en un 5.0% respecto de lo normal.

2.5 ESCORRENTIA

2.5.1 Hidrografía. El área del estudio esta conformada por las cuencas de los ríos San Juan, Mulatos y parte de la cuenca del río León (Plancha No. 2.4).

La cuenca del río San Juan perteneciente a la vertiente del Mar Caribe posee un área de 1.249 km² y una longitud del río de 109 km aproximadamente. Esta área constituye la esquina nororiental de la región y está delimitada al occidente por la Serranía de Belmonte que se desprende de la Serranía de Abibe en el Alto de Quimarí, cabecera de este río, el cual tiene los siguientes afluentes: quebrada Los Burros, Rosita, Arenosa, Zapindonga, Los Platos y San Juancito. Otros de menor importancia son: Damaquiel, Sabanilla e Iguaná.

La cuenca del río Mulatos pertenece a la vertiente del Mar Caribe y está conformada por la cuenca del río de su mismo nombre y un grupo de pequeñas subcuencas que desaguan directamente al Golfo de Urabá.

La longitud del río Mulatos es de 137 km aproximadamente y drena un área de 1.581 km²,

la cual está enmarcada al oriente por la Serranía de Belmonte y al occidente por la Serranía del Aguila. Durante su recorrido el río recibe los siguientes afluentes importantes: Congo, Tulapa, Meyo y Mulaticos.

A la vertiente del Golfo de Urabá confluyen los ríos de mayor importancia: Turbo, Caimán Nuevo, Caimán Viejo, Necoclí, Currulao y Guadualito.

El río León tiene una hoya con superficie aproximada de 2.250 km² y su longitud es de 83 kilómetros. Nace al norte de la población de Mutatá en las estribaciones suroccidentales de la serranía de Abibe. Sus principales afluentes se hayan en la margen derecha y son: Villa Arteaga, Juradó, Guapá, Chigorodó, Apartadó, Carepa, Zungo y Riogrande. Finalmente desemboca en la Bahía Colombia en el Golfo de Urabá.

La mayoría de los ríos pertenecientes a la zona de estudio provienen de la Serranía de Abibe y corren a través de estrechos valles aluviales. Posteriormente descienden a los abanicos y al plano aluvial, en donde su pendiente se hace mínima y desembocan en ríos principales como el río León o directamente en el mar.

Es importante anotar que en la época de mayor precipitación, en este último tramo, se presentan desbordamientos que afectan grandes extensiones, y que son cada vez más frecuentes a medida que avanza y se generaliza la tala de bosques en las cabeceras de los

ríos.

2.5.2 Información utilizada. El área del estudio cuenta con las series de registros de 17 estaciones hidrométricas, de los cuales 8 pertenecen a la cuenca del río León, 5 a la cuenca del río Mulatos y 4 a la del río San Juan. En la Tabla No. 2.8 aparece la lista de las estaciones existentes con algunas características morfométricas de las subcuencas y las fechas de instalación para cada una de las estaciones. Su localización se puede observar en la Plancha No. 2.4.

Las series de caudales a nivel mensual correspondientes a las estaciones en mención, suministradas por el HIMAT se presentan en el Anexo No.1.

Vale la pena anotar, que en muchos casos el régimen natural de las corrientes superficiales está influido por numerosas derivaciones difíciles de cuantificar, lo cual hace imposible obtener datos reales de los caudales. Debido a esta restricción la evaluación de la escorrentía dentro de este estudio se realizó con base en los registros de caudales existentes y sin corregir los efectos de captaciones.

Una vez analizada la información hidrológica disponible se detectó que las series de los caudales están más actualizadas (contienen la información hasta el año 1992) que las de tabla 2.8

¡Error! Marcador no definido.

precipitación. Sin embargo se consideró, para el análisis de la escorrentía, el período comprendido entre 1978 y 1989 (12 años), ya que el análisis hidrológico debe guardar una concordancia en la evaluación de la relación lluvia-caudal.

Las series analizadas presentaron datos faltantes e interrupciones en los registros, por lo tanto fueron completados por medio de regresiones a nivel mensual, utilizando los datos registrados en las estaciones ubicadas en una misma cuenca. En la Tabla No. 2.9 se muestra la diferencia entre el caudal histórico (promedio de los registros existentes) y el caudal medio multianual para el período de 12 años.

Los registros de aquellas estaciones que no tenían suficiente longitud en sus series, se utilizaron como apoyo para el análisis de la escorrentía.

2.5.3 Escorrentía media multianual y para los años tipo. Mediante el análisis estadístico y utilizando los datos de los caudales disponibles (12 estaciones), se determinaron los valores característicos de cada serie, tales como el caudal medio multianual, la desviación estandar (σ), el coeficiente de variación (C_v) y su error de estimación (σC_v) (Tabla No. 2.10).

Posteriormente, tomando los valores de los caudales medios multianuales de cada serie y utilizando la aplicación de la técnica Kriging de interpolación lineal (software tabla 2.9, 2.10

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

GEOPACK) se elaboró el mapa de escorrentía multianual a escala 1:200.000 (Plancha No. 2.4).

Analizando este mapa se puede observar, que en general la distribución espacial de la escorrentía es muy similar a la de precipitación: la escorrentía aumenta en el sentido noreste-suroeste.

Los valores mínimos de la escorrentía se presentan en la cuenca del río San Juan (200 mm/año) y los valores máximos en la parte sur del área en estudio llegando hasta 2.300 mm/año debido a la alta precipitación que se presenta en esta área.

Para estimar la escorrentía en los años húmedo y seco se planteó el siguiente procedimiento. Debido a que los valores del Cv calculados para las estaciones analizadas son bastante altos (llegan hasta 0.78) se calculó el error de estimación de este parámetro para cada estación, indicando que los errores son superiores a los admisibles (Klibashev K.P. y Goroshkov I.F., 1970), lo que significa que las series analizadas no tienen la suficiente longitud para estimar los Cv representativos y así realizar el ajuste de las series a las leyes de distribución de probabilidades.

Por lo anterior y teniendo en cuenta que los factores principales que generan la escorrentía son precipitación y evapotranspiración, para estimar los valores de la escorrentía de los años húmedo y seco se tomó la misma variabilidad de la precipitación.

2.5.4 Distribución estacional de la escorrentía. Se estudió la distribución estacional de la escorrentía utilizando las series completadas de los caudales medios mensuales, calculando los factores de distribución (relación entre el caudal medio mensual multianual y el caudal medio anual multianual) e incluidos en la Tabla No. 2.11. Su presentación gráfica para diferentes estaciones hidrométricas se puede observar en las Figuras Nos. 2.4 a,b y c.

La distribución estacional de la precipitación se refleja en el fenómeno de escorrentía, aunque este último tiene influencia de otros factores, como los parámetros físicos de la cuenca y las características del suelo.

Cuenca del río San Juan: En general el comportamiento de la escorrentía es unimodal a lo largo del año; el período húmedo en lo referente a la disponibilidad hídrica superficial (factor de distribución mayor de 1.0) se presenta durante los meses junio a noviembre con los caudales máximos en el mes de septiembre y el período seco se prolonga desde el mes de diciembre hasta mayo. Se observa una distorsión en la estación Hda. La Laja la cual

tabla 11, fig 2.4 a, b, c

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

presenta un valor del factor de distribución alto en el mes de mayo. (Ver Figura No. 2.4a).

Cuenca del río Mulatos: Las estaciones hidrométricas Pueblo Bello y Pueblo Nuevo ubicadas sobre el río Mulatos presentan el período seco en los meses diciembre a abril; durante el resto del año los caudales aumentan y disminuyen en forma irregular conservando los valores mayores del promedio anual. La estación El Tres refleja una distribución de los caudales que difiere de las estaciones anteriores: el período seco se prolonga hasta los 6 meses (de diciembre a mayo); además en el mes de julio se registra una pronunciada disminución del caudal. Los meses julio, octubre y noviembre presentan caudales bastante altos; durante agosto y septiembre la escorrentía es similar al promedio anual. (Ver Figura No. 2.4b).

Cuenca del río León: Las estaciones analizadas se encuentran ubicadas a lo largo de diferentes ríos que confluyen al río León y presentan la distribución bastante similar con un período seco durante los meses enero, febrero y marzo. En los meses de abril y diciembre se registran caudales muy cercanos al promedio anual, por lo tanto se consideran como meses de transición. Durante de los meses restantes los caudales superan el promedio anual. (Ver Figura No. 2.4c).

Vale la pena anotar que para las estaciones de la cuenca del río León la distribución de la

escorrentía es más uniforme, es decir las diferencias entre los valores de los caudales en los períodos húmedos y secos son menos significativos que para las estaciones ubicadas dentro de las cuencas de los ríos Mulatos y San Juan. Esto se debe probablemente a la escasa capacidad de almacenamiento de sus cuencas altas, originada en lo fuerte de sus pendientes y composición geológica.

2.5.5 Estimación de la escorrentía directa. La escorrentía registrada en las estaciones hidrométricas involucra varios procesos a través del tiempo: escorrentía directa (proveniente de la precipitación caída sobre la cuenca) y flujo base (aportes subterráneos), producidos por la subcuenca hasta el punto de control. Este último depende de la existencia o no de una relación hidráulica con los acuíferos y del tipo de ésta. Durante el recorrido, una corriente superficial puede variar su interrelación con los acuíferos y además, puede recibir aportes de diferentes acuíferos.

Con la información hidrológica disponible (distribución espacial de las estaciones, cuantificación de las captaciones superficiales) es imposible determinar con exactitud los aportes subterráneos que reciben las corrientes superficiales localizadas en la zona de estudio, ni el tipo de relación con los diferentes acuíferos que atraviesan, pero sí se puede hacer una estimación muy generalizada del flujo base.

Para separar la escorrentía directa de la escorrentía total evaluada en el numeral 2.5.3,

siendo la primera la que entra al balance hídrico de la superficie, se realizó el siguiente procedimiento.

Después de analizar la información de los caudales a nivel mensual se detectó que algunas corrientes desaparecen en los períodos secos del año, lo cual indica la ausencia de los aportes subterráneos; otras conservan su flujo base.

Teniendo en cuenta lo anterior, para las corrientes se calculó el flujo base como porcentaje del total mensual, considerando el caudal mínimo registrado (1978-1989) como aporte subterráneo continuo y constante (Tabla No. 2.12). Este procedimiento es aproximado, pero se considera válido teniendo en cuenta los objetivos del estudio.

En general los aportes subterráneos para las estaciones analizadas son bajos (menores del 10% del total mensual), a excepción de la estación El Carmelo-San Juan donde para los meses de enero, febrero y marzo el flujo base representa más del 10%. Asimismo el flujo base aumenta con el área de drenaje de la cuenca.

Utilizando estos resultados en combinación con otra información (localización de las áreas de interés, características físico-geográficas, suelos, etc.), se puede estimar el flujo base

tabla 2.12

en áreas donde existen condiciones similares para la generación de escorrentía y sin mediciones hidrológicas directas.

2.6 SUELOS

2.6.1 Generalidades. La cantidad de agua procedente de la precipitación que puede llegar a los acuíferos, esta controlada por su paso a través del suelo.

La velocidad de movimiento del agua en el suelo y la cantidad de ésta depende de la permeabilidad del suelo, de su capacidad de retención y almacenamiento del agua, las cuales están influenciadas primordialmente por las propiedades físicas del suelo (textura, estructura, porosidad, drenaje, etc) (LOPEZ.D.,1990).

Las relaciones agua-suelo pueden dividirse en dos categorías principales:

- Suelo como transmisor de agua.
- Retención y almacenamiento de agua en el suelo.

Es así, que en los suelos de texturas arenosa y franco arenosa la velocidad de infiltración es alta, produciendo un déficit de agua para las plantas, pues son suelos que retienen poca agua y drenan fácilmente. Por el contrario, en los suelos de textura arcillosa el movimiento

del agua está más restringido, produciendo generalmente encharcamientos. Los suelos con altos porcentajes de limos ofrecen dificultades para el movimiento del agua, pues estas partículas taponan los poros e impiden su paso.

La estructura del suelo también afecta la velocidad de infiltración del agua en forma directa.

Los suelos con altos porcentajes de arena o arcilla, carecen de estructura. Estos suelos presentan dificultades a las plantas para el crecimiento y sostenimiento normal de las raíces por ser demasiado sueltos (arenosos) o demasiado compactos (arcillosos); por lo cual los suelos arenosos son más permeables con la velocidad de penetración vertical del agua, mayor que en los suelos arcillosos y limosos.

Cuando en un suelo los espacios porosos son pequeños como es el caso de los suelos de texturas finas, el agua se almacena en ellos debido a las fuerzas de tensión superficial, trayendo como consecuencia una baja infiltración, produciendo encharcamientos; cuando los espacios porosos son muy grandes - (suelos de texturas arenosa y franco arenosa), el agua del suelo es susceptible de mayor movimiento.

La humedad aprovechable es muy baja para los suelos arenosos y media para los suelos arcillosos y limosos. Esto indica que las plantas pueden tener déficit de agua en la mayor

parte del tiempo en los suelos arenosos, deficiencia que puede no presentarse en los suelos con nivel freático alto.

Resumiendo lo anterior, es evidente que para cada tipo de suelo la cantidad de agua infiltrada sea diferente aún bajo condiciones hidrometeorológicas similares.

2.6.2 Los suelos del área de estudio. Las diferentes clases de rocas, clima y relieve en el área, han dado lugar a la formación de suelos distintos, que presentan características físicas, químicas y mineralógicas bastante heterogéneas.

Dentro de la zona se pueden distinguir los suelos de planicie marina, de planicie aluvial, de piedemonte, de las colinas y de cordillera (IGAC, 1979,1980 y 1982).

Los suelos de planicie marina se ubican en zonas relativamente estrechas, generalmente paralelas a la costa hacia norte del Golfo de Urabá y en la costa del mar Caribe.

Estos suelos tienen origen de la sedimentación marina, con o sin influencia de los ríos. Son suelos arenosos mezclados con arcilla, superficiales a muy superficiales (25 - 50 cm), comúnmente mal drenados, limitados en su profundidad por inundaciones y nivel freático, son de baja fertilidad.

En las marismas los suelos son aún menos desarrollados, con altos contenidos de sales y formados a partir de depósitos orgánicos en diferentes grados de descomposición.

Dentro de los suelos de planicie aluvial se agrupan los suelos de las planicies aluviales de los ríos provenientes de la Serranía de Abibe, de algunas terrazas y de los valles intramontanos.

En la parte más baja de la llanura aluvial de la cuenca del río León se encuentran suelos mal drenados y sujetos a inundaciones periódicas; en esta zona se localiza una red de ciénagas generalmente interconectadas, que configuran un gran cuerpo de agua inmóvil.

Estos suelos son esencialmente sedimentarios de origen marino y coluvio-aluvial poco evolucionados; en general son superficiales (hasta 50 cm) y limitados por el nivel freático. Se componen de materiales finos que alternan con materiales orgánicos.

En las terrazas formadas principalmente por los ríos San Juan, Mulatos y León se desarrollaron los suelos derivados de los depósitos de una antigua llanura aluvial. Los suelos son superficiales a muy superficiales, con texturas por lo general gruesas sobre finas (capas de arcilla), el drenaje natural varía de moderadamente bien drenado en las zonas más altas a muy pobremente drenado o casi pantanoso en las zonas más bajas, son de baja fertilidad.

Los suelos de los valles intramontanos de los diferentes ríos de la Serranía de Abibe son derivados de aluviones recientes, por lo general son moderadamente profundos (50 - 90 cm). Estos suelos son bien a imperfectamente drenados, de texturas finas sobre medias, de moderada fertilidad.

Dentro de los suelos de piedemonte se incluyen los suelos formados por abanicos aluviales coalescentes, ubicados en las estribaciones de la Serranía de Abibe y en la costa del mar Caribe. En esta unidad se agrupan suelos muy variables: profundos a superficiales (hasta 150 cm), limitados por factores físicos y químicos (nivel freático y salinidad en el subsuelo), moderado a pobremente drenado, pueden presentar inundaciones o encharcamientos, texturas finas a medias, fertilidad moderada a baja.

En la zona del estudio los suelos de las colinas se han formado a partir de materiales sedimentarios del Terciario (areniscas, arcillolitas y conglomerados).

En el norte del área (municipios de Arboletes y Necoclí) son suelos moderadamente profundos (hasta 90 cm), limitados por las texturas arcillosas que se encuentran en todo el perfil, bien drenados, en épocas secas se presentan en la superficie grietas, de fertilidad moderada a baja.

Hacia los municipios de Turbo, Chigorodó y Mutatá estos suelos presentan texturas más gruesas con gravillas en los horizontes inferiores.

Los suelos de cordillera están ampliamente distribuidos en la zona del estudio, cubriendo gran parte de las laderas de la Serranía de Abibe. Son suelos derivados de arcillolitas y areniscas, moderadamente profundos a superficiales, bien drenados, de texturas finas y de moderada fertilidad.

En el extremo sur del área se localizan suelos desarrollados a partir de rocas ígneas, diabasas y dioritas principalmente. Son moderadamente profundos a superficiales limitados por factores físicos y químicos (contactos rocosos y presencia del aluminio), bien drenados, de texturas finas y de baja fertilidad.

Teniendo en cuenta la gran variedad de los suelos y el carácter regional del presente estudio, se realizó la rezonificación del área con base en los estudios sobre los suelos del departamento de Antioquia, publicados por el IGAC (1979, 1980 y 1982) y tomando como principal criterio las características texturales de los diferentes tipos de suelos.

Todos los suelos, presentes en el área se clasificaron en tres grupos, según el contenido predominante de las fracciones de arena (A), arcilla (Ar) o limo (L), ya que este factor en un alto grado influye sobre el almacenamiento y movimiento del agua en el suelo.

Se observó que los suelos arcillosos presentes en el área son bastante similares entre sí, con respecto a los espesores y al porcentaje de contenido de arcilla, sin embargo los suelos arenosos y limosos presentan variación en estos parámetros, por lo cual estos últimos se dividieron en subgrupos.

Como resultado de este análisis fue elaborado el mapa de rezonificación de suelos (Plancha No. 2.5) donde se observa la distribución espacial de los suelos según el grupo arenoso, arcilloso o limoso. Se destaca que en el área predominan los suelos de texturas arcillosas.

Las constantes físicas (capacidad de campo y punto de marchitez), para realización de los balances hídricos, de cada grupo se estimaron con base de los datos de retención de humedad, publicados por el IGAC (LOPEZ.D., 1990) y se presentan en la Tabla No. 2.13.

2.6.3 Uso de los suelos. Según el IGAC (1982,1992), los suelos del área del estudio se encuentran utilizados para diferentes cultivos (entre ellos tierras en pastos), y sólo algunas áreas de la Serranía de Abibe de relieve quebrado y de difícil acceso conservan la vegetación original.

Debido a su conformación físico-química los suelos son aptos principalmente para los pastos, los cuales ocupan la gran parte del territorio cubriendo las laderas de la Serranía y

las colinas de las zonas norte y central.

tabla 2.13

En la parte sureste del área, en las tierras bajas de la llanura aluvial del río León se encuentra la zona de ciénagas y pantanos sin uso agropecuario.

Hacia el sur del municipio de Turbo se localiza la zona del mayor desarrollo agropecuario con los cultivos transitorios y semipermanentes (banano, maíz y/o sorgo, hortalizas).

2.7 BALANCES HIDRICOS Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Como se determinó en el numeral 2.6.2, en el área del estudio se encontraron diferentes grupos y subgrupos de suelo: arenoso (A1, A2 y A3), arcilloso (Ar) y limoso (L1 y L2). Para cada uno de ellos en los sitios de afloramiento de los acuíferos se realizaron balances hídricos para los años tipo (en total 18), tomando como base el mapa de rezonificación de los suelos a escala 1:200.000 (Plancha No. 2.5).

Se calcularon los valores ponderados de la precipitación (años tipo) y escorrentía total (año medio) para cada subgrupo, correlacionando los mapas de isoyetas e isoescorrentía con el mapa de rezonificación de suelos. Los valores de escorrentía total para los años húmedo y seco se estimaron aplicando la misma variabilidad de la precipitación. El flujo base se determinó correlacionando las estaciones hidrométricas adyacentes a cada suelo.

La evapotranspiración potencial para el año medio se estimó utilizando la relación encontrada entre este parámetro y la elevación media de cada subgrupo de suelo; los valores de este para los años húmedo y seco se determinaron según el numeral 2.4.5.

La distribución a nivel mensual, de los parámetros mencionados se realizó teniendo en cuenta las distribuciones encontradas para las estaciones hidrometeorológicas localizadas o adyacentes a cada suelo.

El coeficiente del cultivo (el que regula la evapotranspiración), utilizado en el modelo del balance de humedad del suelo se tomó igual a 1.0, ya que no se conoce la zonificación real del área por cultivos y se considera como el valor más alto que puede presentarse.

En el Anexo No. 1 se presentan los resultados de los balances, realizados a nivel mensual y en la Tabla No. 2.14 se resumen los valores de la recarga potencial, proveniente de la precipitación para los suelos en consideración.

Los resultados de los balances muestran que a pesar de un déficit hídrico a nivel anual ($Esc. + ETP > P$) en el área de estudio para el año medio (excepto el suelo A3), se presenta la recarga en varios meses del año, notándose una diferencia entre los suelos, la cual depende de la disponibilidad de agua una vez se satisfacen las necesidades de

tabla 2.14

humedad de suelo y la evapotranspiración real sea igual a la potencial. Por ésta razón, la recarga no siempre ocurre en los mismos meses del año para diferentes suelos.

La variación espacial de los parámetros climatológicos y de la escorrentía, hace que la recarga en el mismo grupo de suelo (arenoso, arcilloso o limoso) en diferentes zonas sea distinta.

Para el suelo arenoso la mayor recarga se presenta en la parte sur del departamento (A3), donde la oferta hídrica es muy alta. En la parte central del área para el suelo A2 la disponibilidad hídrica es mayor que para el suelo A1, el cual se localiza al norte, sin embargo los resultados del balance muestran la recarga superior para A1, debido a que las características físicas de estos suelos son diferentes (la capacidad de campo para A1 es menor).

Debido a la baja capacidad de almacenamiento de agua, en el suelo arenoso (A1 y A2) se presenta un déficit de humedad que llega hasta el punto de marchitez permanente en los meses más secos (febrero, marzo y abril). Sin embargo por la misma razón, el aumento de la precipitación produce muy rápida recuperación del déficit de humedad, permitiendo la infiltración profunda en el período húmedo del año.

En el suelo A3 el déficit de humedad no alcanza el punto de marchitez debido a la situación geográfica (altura media 100 m.s.n.m.) altura en la cual disminuye notoriamente la evapotranspiración.

El suelo arcilloso tiene la más alta capacidad de campo de los suelos presentes en la zona (Tabla No. 2.13), lo cual disminuye la recarga. Para este suelo ésta ocurre igualmente en el período húmedo (junio-noviembre), mientras que en el resto del año se mantiene el déficit de la humedad en el suelo sin alcanzar el punto de marchitez.

En el suelo limoso, al igual que en el arcilloso la recarga se dificulta debido a la capacidad de almacenamiento del agua; es así que en el suelo L1 se produce la recarga mayor que en el L2 (la capacidad de campo para L1 es menor que para L2) a pesar que la disponibilidad hídrica para L2 es mayor. La recarga ocurre entre los meses de mayo a septiembre para estos suelos.

Para los años húmedo y seco, como era de esperarse, los valores de la recarga para todos grupos de suelos resultan mayores o menores respectivamente, aunque en el año húmedo siempre se llega al punto de marchitez en los suelos A1 y A2, debido a que los períodos secos son muy fuertes.

Vale la pena anotar que este aumento o disminución de la recarga no es directamente proporcional para todos los grupos de suelo, pues la variabilidad de los parámetros climatológicos y de la esorrentía a través del tiempo no es uniforme en toda la zona del estudio.

La recarga potencial, estimada en este capítulo, es la cantidad de agua que pueda ingresar al almacenamiento del acuífero. No obstante, en realidad en la zona no saturada existen pérdidas adicionales (evaporación, flujo subsuperficial, etc.), muy difíciles de cuantificar, lo cual hace que la recarga real sea menor a la potencial.

3. GEOLOGIA

3.1 INTRODUCCION

3.1.1 Generalidades. El área de estudio se encuentra localizada en el Golfo de Urabá, en la parte occidental de la Serranía de Abibe al NW del departamento de Antioquia haciendo parte del terreno Sinú-San Jacinto (DUQUE-CARO, 1984).

En el área afloran rocas sedimentarias marinas del Oligoceno al Plioceno constituidas principalmente por arcillolitas y areniscas, y depósitos aluviales de edad Cuaternaria (ROJAS, 1966; HAFFER, 1967).

Los trabajos anteriormente realizados en el área son escasos, entre los cuales se tienen: ROJAS, (1966); HAFFER, (1965 y 1967) y DUQUE CARO, (1972, 1973, 1975, 1979 y 1984).

Debido a la poca información existente y al desconocimiento de las unidades estratigráficas dentro del área de investigación, en el presente trabajo se utiliza una nomenclatura provisional así:

Unidades Geológicas Terciarias (Unidad T1 y Unidad T2), y Unidades Geológicas

Cuaternarias.

3.1.2 Metodología de Trabajo. El método de trabajo utilizado en la realización del presente trabajo corresponde a las siguientes etapas:

- a. Recopilación y análisis de la información existente.**
- b. Interpretación fotogeológica.** Esta se realizó con base en las fotografías de los vuelos que se presentan en la Figura No. 3.1
- c. Interpretación monoscópica de la imagen de satélite Landsat TM (row 55, path 10), sector suroccidental.**

Para la interpretación monoscópica de la imagen de satélite se seleccionaron las bandas con base en un análisis estadístico y visual de cada banda (TM2, TM4, TM5 y TM7); se realizaron composiciones de falso color. Las mejores fueron TM4 (canal rojo) TM5 (canal verde) y TM7 (canal azul).

Para analizar cambios sutiles en la vegetación se elaboraron varios índices y combinación de bandas; a partir del estudio visual de los productos monocromáticos se seleccionó la sustracción TM5 - TM2, como la correlación que

Figura 3.1

¡Error! Marcador no definido.

suministró mas información con relación a los cambios de vegetación. Esta última combinación sustituyó la banda TM5 y se obtuvieron excelentes resultados visuales con relación a la textura de la imagen.

Para analizar estructuras se aplicó un filtro HDXXX a la combinación TM5 - TM2 y un filtro HIXXX a la banda TMX, cuyo resultado final fue la composición de falso color que se utilizó en la interpretación del área.

- d. **Elaboración del mapa preliminar a escala 1:50.000.**

- e. **Controles de campo. Estos controles fueron restringidos, debido a lo inaccesible del área (por orden público). Estos se realizaron en las siguientes transversas:**

Parte norte de Urabá:

- **Necolí-Arboletes**
- **Necolí-Laguna de La Marimonda**

Sector de Turbo:

- **Corregimiento El Dos-Cabeceras río Turbo**
- **Corregimiento El Tres-El Alto**
- **Currulao-Nueva Antioquia**

Sector de Apartadó:

- Río Grande
- Apartadó-San José de Apartadó
- Río Apartadó

Sector de Carepa:

- Carepa-El Roble

Sector de Chigorodó:

- Chigorodó-Cabeceras río Chigorodó

- f. **Elaboración del mapa final escala 1:50.000 y cortes.**
- g. **Informe.**

3.2 EVALUACION GEOLOGICA

Los resultados de la evaluación geológica se presentan en las Planchas Nos. 3.1 a 3.5, Mapa Geológico a escala 1:50.000. Los cortes se presentan en bolsillo.

3.2.1 Marco Geológico Regional. Duque-Caro (1984), divide el margen suroriental de la cuenca de Colombia en el Caribe (región noroccidental de Colombia), en dos elementos tectónicos mayores, una región estable o de plataforma, que suprayace a una corteza continental no plegada y otra inestable o geosinclinal que suprayace corteza oceánica plegada.

La región inestable o geosinclinal comprende la porción de corteza adyacente a la plataforma, dividida por el mismo autor, en tres elementos estructurales distintos, el Cinturón Fragmentado de San Jacinto, el Cinturón de Sinú y el Bloque Chocó, cada uno con rasgos geotectónicos distintos (Figura No.3.2).

Estos elementos estructurales representan eventos geológicos definidos desde el punto de vista del ambiente de depósito y edad de la actividad tectónica.

3.2.1.1 Cinturón de San Jacinto. Está localizado adyacente a la plataforma y comprende tres unidades estructurales, topográficamente no muy prominentes, que de sur a norte se han denominado anticlinorios de San Jerónimo, San Jacinto y Luruaco, con dirección general N20E, en una longitud de 360 Km y un ancho de 6 Km aproximadamente.

Los fenómenos estructurales y tectónicos observados dentro del cinturón fragmentado de

San Jacinto, sugieren que éste ha sido principalmente el resultado de una interacción

Figura 3.2

existente entre la corteza oceánica del Caribe suroccidental y de la corteza continental del norte de Suramérica a través de fuerzas tensionales y compresionales a lo largo de la plataforma, especialmente durante la orogenia pre-Andina (Eoceno medio), que levantó, plegó y modeló este cinturón (DUQUE-CARO,1980).

3.2.1.2 Cinturón Sinú. Al occidente y paralelo al cinturón de San Jacinto se encuentra el cinturón Sinú, con más de 500 Km de longitud y hasta 125 km de ancho. Su tendencia estructural general es paralela al cinturón de San Jacinto, en su extremidad meridional, pero voltea hacia el nordeste en el área de Cartagena-Barranquilla siguiendo la línea de costa y corta la dirección N20E, más antigua (Eoceno medio) del cinturón de San Jacinto (DUQUE-CARO, 1980).

Estructuralmente este cinturón es muy característico, ya que está formado por anticlinales estrechos muy pronunciados, separados entre sí por sinclinales amplios y suaves. El rumbo general de los ejes de los anticlinales es más o menos paralelo a las márgenes oriental y occidental del cinturón. En general este cinturón presenta un patrón radial relacionada con las estructuras anticlinales y diapirismo de lodo (DUQUE-CARO, Figura 1980) y se encuentra complicada por fallas normales y de cabalgamiento. El área objeto de este informe, esta enmarcado dentro de este cinturón.

3.2.1.3 Bloque Chocó. Hacia la costa Pacífica Colombiana y límites con la República de Panamá y paralelo a la Cordillera Occidental se encuentra el Bloque Chocó.

Estructuralmente este bloque está caracterizado por estructuras sinclinales alargadas que conforman una depresión de dirección norte nordeste (DUQUE-CARO, 1980; ETAYO et al, 1983).

3.2.2 Unidades Geológicas Terciarias. Dentro del Terciario, no se ha diferenciado las distintas unidades; solamente se ha separado las de ambiente de formación netamente marino (unidad T1) de las de ambiente netamente continental (unidad T2), siendo más joven la segunda. La unidad T2 se ha dividido en tres conjuntos A, B y C, debido a su importancia hidrogeológica, marcada por el contenido de gravas.

3.2.2.1 Unidad T1. La unidad T1 agrupa las rocas de edad Terciaria de las formaciones La Risa, Ciénaga de Oro o Areniscas del Pavo, Floresanto o Porquero y Tubara o Pajuil (Haffer 1967), con edades que oscilan entre el Eoceno Superior y el Mioceno Medio (Figura 3.3). El ambiente de depósito de estas formaciones, de acuerdo a su litología y su contenido fosilífero (foraminíferos) es marino (HAFFER 1967, ROJAS, 1966). En el presente informe en esta unidad no fueron identificadas las formaciones mencionadas arriba, debido a lo inaccesible del área.

figura 3.3,

¡Error! Marcador no definido.

En la región mapeada, de la base al techo, se observa la siguiente sucesión (ver Figura No. 3.4):

Una secuencia de capas delgadas de arenisca, de color amarillo anaranjado oscuro (10 YR 6/6), constituidas por cuarzo, feldespato, fragmentos de roca volcánica y sedimentaria, moscovita, circón y minerales opacos; con matriz arcillosa y ocasionalmente con cemento calcáreo. Los granos son de tamaño de medio a grueso, ligeramente conglomeráticos, subangulares de baja esfericidad y selección de moderada a pobre, el contacto entre ellos es de tangente a completo.

Se presentan zonas lenticulares de conglomerados que contienen guijarros de chert negro, cuarzo, rocas ígneas volcánicas y sedimentarias interestratificados con las capas de arenisca.

Por encima de esta secuencia se observa un paquete de lodolitas de color gris, masivas (esporádicamente se observan nódulos calcáreos arenosos) con intercalaciones de capas delgadas de arenisca de color amarillo grisáceo (10 YR 7/4) a amarillo marrón pálido (10 YR 6/2), de grano fino a muy fino.

Luego se encuentra una alternancia de areniscas, arcillolitas y lentes de arenisca conglomerática, con predominio de las primeras.

figura 3.4

¡Error! Marcador no definido.

Las areniscas son de color gris azulado claro (5 B 7/1) a marrón claro (5 YR 5/6) constituidas por cuarzo, feldespato, fragmentos de roca volcánica y sedimentaria, moscovita, circón y minerales opacos en una matriz limo arcillosa, ocasionalmente presentan cemento calcáreo.

Son de grano fino a muy grueso, ligera y ocasionalmente conglomeráticas, subangulares de baja esfericidad y selección de moderada a pobre; los contactos entre granos son de tangentes a completos.

Las arcillolitas son de color gris verdoso y marrón rojizo, plásticas, blandas, con laminación incipiente en capas de 1 a 2 m. de espesor.

Los conglomerados se presentan en forma de lentes; presentan gránulos y guijos de cuarzo, chert, roca volcánica y sedimentaria, en una matriz arenosa, de grano medio a grueso.

Hacia techo de la secuencia se observa una serie de lodolitas de color gris (Figura No.3.5), masivas (con presencia esporádica de nódulos calcáreos arenosos) intercalada con capas delgadas de arenisca de color amarillo grisáceo (10 YR 7/4) a amarillo marrón pálido (10 YR 6/2), de grano fino a muy fino.

El espesor de esta unidad, es variable, en el río Turbo alcanza 4310 m, y en el carretable Turbo-El Alto-Valencia (Córdoba) alcanza los 9000 m.

El contacto inferior de la unidad no aflora en la región de estudio. El contacto superior con la unidad T2, es fallado, a través de la falla de Apartadó.

Figura No. 3.5. Lodolitas de la Unidad T1.

3.2.2.2 Unidad T2. La unidad T2 agrupa parte de las rocas de la formación Corpa

¡Error! Marcador no definido.

(HAFFER,1965 y 1967) de edad Plioceno Superior al Holoceno.

En este informe esta unidad, se dividirá en 3 conjuntos, distinguibles por su litología, pero haciendo parte de la misma unidad.

En la región mapeada, de la base al techo, se observa la siguiente sucesión (ver Figura No. 3.6):

Conjunto A: Esta conformado por areniscas de color amarillo grisáceo (5Y7/2), de tamaño de grano fino a medio, compuestas por cuarzo, feldespato y fragmentos de roca volcánica y sedimentaria, en una matriz arcillosa, con empaquetamiento tangente a puntual. Los clastos son angulosos a subredondeados de baja esfericidad y mala selección. Se presentan en capas de 10 a 20 cm de espesor continuas paralelas, estratificadas con capas de lodolitas (Figura No. 3.7) de color gris azulado claro (5B5/1), friables que se presentan en capas de 5 a 10 cm. El espesor de este conjunto en el sector de Carepa - El Roble alcanza los 165 m.

Conjunto B: Conformado por capas de arenisca y conglomerado (Figura No.3.8). Las areniscas son de color amarillo grisáceo (5Y7/2), de grano fino a medio, conformadas por cuarzo, feldespato (plagioclasa) y fragmentos de roca volcánica y sedimentaria,

Figura 3.6

¡Error! Marcador no definido.

subangulares, de baja esfericidad y moderada selección, con empaquetamiento tangente a puntual, en una matriz arcillosa. Se presentan en capas discontinuas no paralelas, de 1 a 15 metros de espesor, con estratificación cruzada hacia el tope de las capas. Presentan láminas delgadas de lodolitas.

Figura No.3.7 Aspecto del Conjunto A.

¡Error! Marcador no definido.

Las capas de conglomerados están conformadas por gránulos y guijos de cuarzo, chert y roca volcánica (basaltos), en una matriz arenosa de color amarillo grisáceo (5Y7/2), de grano medio a grueso.

El espesor de este conjunto en el sector de Carepa es de 210 m.

Figura No. 3.8. Aspecto del Conjunto B.

Conjunto C: Conformado por lodolitas de color gris azulado (5B5/1), con capas discontinuas no paralelas, de espesor 1 a 2 m. de espesor, intercaladas con capas discontinuas de conglomerados (Figura No.3.9), con guijo de cuarzo, chert y roca volcánica en una matriz arenosa, de grano medio a grueso. Los guijos son subangulares a subredondeados con empaquetamiento puntual a flotante. El espesor de este conjunto en el sector de El Tres - El Alto es 115 m.

Figura No.3.9 Aspecto del Conjunto C.

Obsérvese los conglomerados al fondo de la fotografía.

Esta unidad aflora en el flanco más occidental de la Serranía de Abibe, formando las colinas bajas que se observan a lo largo de la carretera Juradó - Turbo (Figura No.3.10). Los afloramientos de esta unidad son muy pocos, siendo la mejor exposición la que se encuentra a lo largo de la carretera El Tres - El Alto, pero no permite levantar una columna estratigráfica por encontrarse demasiados sectores cubiertos.

Figura No.3.10 Aspecto de la Unidad T2.

Fotografía tomada desde avión.

Las características litológicas de la unidad T2 sugieren un ambiente de depositación de tipo continental, con corrientes sinuosas de períodos de media a alta energía (depositación de la fracción conglomerática) y períodos de tranquilidad (depositación de la fracción arenarcillosa).

Por la abundancia relativa de guijos de roca volcánica y sedimentaria en los conglomerados, puede asegurarse que las rocas volcánicas y sedimentarias que se encuentran en el eje de la Serranía de Abibe estaban expuestas a erosión, durante la sedimentación de la unidad T2.

El contacto inferior de esta unidad es de tipo fallado (Falla de Apartadó), con la Unidad T1.

El contacto superior es discordante, con los sedimentos Cuaternarios de la llanura aluvial Mutatá-Turbo.

3.2.2.3 Unidades Geológicas Cuaternarias. El Cuaternario en la región de estudio está representado por terrazas aluviales relacionadas a los ríos Chigorodó, Carepa, Apartadó, Grande y Currulao y los pequeños abanicos aluviales de los ríos El Tres y Turbo y la gran llanura aluvial de Mutata - Turbo.

Las terrazas aluviales se encuentran entre la carretera y el piedemonte de la Serranía de Abibe y en algunos lugares como en el ríos Carepa y Chigorodó alcanzan hasta 3 niveles distintos. Son de poca altura y extensión y en su mayoría recubiertas por sembrados de banano, lo que dificulta su cartografía.

El primer nivel (Figura No. 3.11), de poca altura, tiene un espesor de 1.5 m., está conformado por gravas dentro en una matriz areno - arcillosa, de baja consolidación; seguido hacia el tope de un nivel de arenas, de color marrón, grano grueso, ligeramente conglomerática y de poca consolidación.

Figura No. 3.11. Primer nivel de Terraza.

El segundo nivel (Figura No. 3.12), está conformado, de la base al techo de un nivel limo arcilloso, de 1.8 m. de espesor, muy friable; seguido de un material arenoso conglomerático de 1.5 m. de espesor de poca consolidación.

Figura No. 3.12. Segundo Nivel de Terraza.

El tercer nivel (Figura No. 3.13), similar al anterior; conformado, de la base al techo de un nivel limo arcilloso, de 1.6 m. de espesor, muy friable; seguido de un material arenoso conglomerático de 1.9 m. de espesor de poca consolidación.

Figura No. 3.13. Tercer Nivel de Terraza.

En la zona norte del área se extienden franjas de depósitos aluviales recientes no consolidados que se encuentran desde el piedemonte hasta la costa y a lo largo del río Mulatos; los espesores varían entre 10 y 80m habiéndose detectado los mayores en la llanura aluvial de este mismo río.

3.2.2.3.1 La llanura aluvial de Mutatá - Turbo. Presenta gran cantidad de áreas planas o ligeramente inclinadas. Sobre ella se ha dado el mayor desarrollo agropecuario de la región, especialmente de banano, donde se han construido gran cantidad de pozos de agua.

Su composición litológica es muy variada y caótica, y depende de la procedencia de los sedimentos. Superficialmente se observan niveles de 1 a 2 m de arena de grano grueso, seguida de niveles de 1 a 2 m de arena de grano grueso, seguida de niveles de arcilla, localmente consolidadas, de 1 a 2 m de espesor. Esta llanura se encuentra cubriendo discordantemente la unidad terciaria T2, con espesores entre 10 y 45 m.

3.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El área se caracteriza por presentar fallas y plegamientos de carácter regional y diaclasas de carácter local.

3.3.1 Fallas. Es el mayor rasgo estructural presente en la zona, se destacan las fallas de cabalgamiento, que se presentan con tendencias de sur a norte, básicamente en el costado occidental.

3.3.1.1 Falla de Apartadó. Es regional, de tipo inverso con ángulo bajo; dirección N-S a N30°W; buza hacia el oriente.

Hacia el norte de Turbo, es truncada por fallas menores; hacia el sur su trazo continua por fuera de la zona de estudio. Pone en contacto la Unidad T2 (de origen continental) con la Unidad T1 (de origen marino).

3.3.1.2 Falla El Dos. Falla Normal, de dirección N80W, de ángulo moderado hacia el norte. Se encuentra truncada por las fallas de Apartadó y San José.

3.3.1.3 Falla El Aguila. Es regional, de carácter inverso con ángulo alto y dirección N30°W; buza hacia el oriente. Su trazo se manifiesta desde el río Guadualito hasta el norte del municipio de Necoclí.

3.3.2 Diaclasas. Se encuentran generalmente concentradas cerca a las fallas, lo cual indica que están relacionadas genéticamente al fallamiento, aunque no necesariamente sean contemporáneos con él, ya que debilitamientos direccionales producidos por el fallamiento o por el plegamiento, pueden ser la causa del diaclasamiento millones de años más tarde (Billings, 1972).

3.3.3 Pliegues. El área de trabajo se caracteriza por presentar sinclinales largos y anticlinales amplios y estrechos. Hacia el norte estas estructuras están generalmente afectadas por estructuras dómicas de volcanes de lodo dando la impresión que el plegamiento se hubiera formado por este tipo de eventos. Dentro de la zona se destacan:

3.3.3.1 Anticlinal de Chigorodó. Esta estructura se encuentra en la parte sur del área; al oriente de Chigorodó. Es aparentemente simétrica, presenta una dirección N25°W en la parte más sur del pliegue y N10°E en la parte norte. El buzamiento promedio del flanco occidental es de 40°, mientras que el oriental es de 35°. El flanco occidental se halla cubierto por los sedimentos cuaternarios, donde tiende a suavizarse.

El núcleo de la estructura esta conformado por los estratos de la Unidad T2, alcanzando una longitud superior a los 40 Km.

Hacia el norte se encuentra afectado por la falla de Apartadó. En la Unidad T1, aflorante al norte del área se desarrolla un anticlinal denominado San José, pero bien podría corresponder a la prolongación norte del anticlinal antes descrito.

3.3.3.2 Sinclinal de Chigorodó. Estructura orientada paralelamente al anticlinal del mismo nombre y desarrollada al oriente. Presenta una longitud mayor de 30 Km; su núcleo se halla conformado por los estratos de la unidad T2 y está parcialmente cubierto por sedimentos cuaternarios. El flanco oriental de esta estructura se encuentra afectado por la Falla de Apartadó.

Al norte se ha desarrollado el sinclinal de San José, sobre la Unidad T1, que podría corresponder al sinclinal de Chigorodó, en su extremo norte.

3.3.3.3 Anticlinal El Caimán. Se encuentra hacia el norte del municipio de Turbo, presenta una dirección N-S. Es un anticlinal tumbado al oeste, simétrico, con buzamiento en sus flancos de 70° a 80°. Se ha desarrollado en la Unidad T1. Tiene una longitud de más de 12 Km y un ancho de 5 Km.

Se encuentra afectado en el norte por pequeñas fallas de dirección NE y SE; hacia el sur lo trunca la Falla de Apartadó.

3.3.3.4 Sinclinal El Caimán. Se encuentra hacia el oriente del anticlinal El Caimán. Tiene dirección N20°W a N-S en la parte norte. El asimétrico con buzamientos en el flanco occidental de 40° a 70° y en el flanco oriental de 50° a 80°. Se ha desarrollado sobre los estratos de la Unidad T1. Esta estructura esta cortada por la falla El Dos hacia el sur.

3.3.3.5 Sinclinal de Tulapa. Es un sinclinal amplio. Con una dirección N10°W a N-S. Es simétrico con buzamiento de sus flancos entre 15° a 30°. El flanco oriental está afectado por la falla El Aguila y al sur se encuentra truncado por la falla El Dos.

3.3.3.6 Plegamientos menores de El Tres. Al este del caserío El Tres se presentan una serie subestructuras con dirección N30°W y buzamientos entre 40° a 60°. Su longitud no sobrepasa los 5 Km.

3.4 GEOLOGIA HISTORICA

La caracterización litológica y estructural del terreno Sinú- San Jacinto es explicada como resultado de la interacción existente entre las cortezas oceánicas del Caribe (Cuenca de Colombia) y continental del norte de Suramérica , por lo menos desde el cretáceo tardío y que ha tenido una migración sucesiva hacia el occidente.

Este terreno fue el resultado de dos períodos de acrecimiento progresivo, de deformación y

emergencia durante la orogenia Pre-Andina (Eoceno Medio) para el Cinturón San Jacinto y durante la Orogenia Andina para el Cinturón Sinú (Duque -Caro, H, 1984,1980)

El acrecimiento de ambos cinturones tuvo una historia similar (pero no sincrónica) de eventos tectónicos y sedimentarios que involucraron lo siguiente:

a. Depósito de sedimentos pelágicos y hemipelágicos en ambientes marinos profundos.

b. Enterramiento profundo de los depósitos anteriores bajo turbiditas

c. Deformación por intrusiones diapíricas de los depósitos pelágicos dentro de las turbiditas, que condujo al desarrollo de estructuras anticlinales estrechos con altas pendientes, y sinclinales amplios.

d. Enterramiento posterior bajo los nuevos sedimentos del margen continental, acumulados en ambientes progresivamente más someros como resultado de la sedimentación y el levantamiento.

e. Emergencia parcial en conjunto con el depósito de sedimentos fluvio-lacustres.

4. RECONOCIMIENTO HIDROGEOLOGICO PRELIMINAR MEDIANTE

INVENTARIO SELECTIVO DE PUNTOS DE AGUA

4.1 OBJETIVO

El principal objetivo de esta actividad es realizar una caracterización hidrogeológica preliminar; en aspectos tales como sistema de flujo, características hidráulicas de la zona, unidades acuíferas captadas, descarga y calidad química del agua, entre otros; a través de la recopilación y análisis de la información de los puntos de agua.

A partir de esta caracterización se programaron las demás fases del proyecto.

4.2 METODOLOGIA

El reconocimiento se inicia con una visita selectiva a los puntos de agua, pozos, aljibes y manantiales, buscando un cubrimiento espacial lo mas homogéneo posible (un punto por Km²) para la recopilación de información en campo. Esta información se recogió utilizando los formatos del Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos, que contiene básicamente los siguientes aspectos:

- **Tipo de captación y características generales de ellas.**
- **Información geológica y geomorfológica.**
- **Uso del agua y sistema de aprovechamiento.**
- **Mediciones in situ.**
- **Información técnica de pozos.**

Estos datos se almacenaron y procesaron en bases de datos para realizar un posterior análisis dentro del que se incluye:

- **Elaboración de mapas, cortes, correlaciones litológicas entre pozos, análisis de pruebas de bombeo, etc.**
- **Análisis de datos de descarga, condiciones de explotación, utilización del recurso, entre otros.**
- **Análisis de la calidad del agua.**

Con base en estos resultados se realizaron las siguientes actividades:

- **Diseño de la red de puntos para realizar la nivelación topográfica y la toma de**

niveles estáticos, con los cuales elaborar los mapas piezométricos.

- **Diseño de la red de muestreo hidroquímico**
- **Selección de puntos para realizar ensayos de acuíferos.**

Toda la información generada se utilizó para complementar la información geológica, geofísica, hidráulica, e hidroquímica del proyecto.

4.3 INFORMACION RECOPIADA

La fase de campo del Inventario se realizó en tres épocas: la zona Turbo - Apartadó, en el mes de octubre de 1993; la zona Apartadó - Juradó, en el mes de marzo de 1994 y la zona Turbo - Necoclí - Arboletes, en el mes de agosto de 1994.

Los datos que corresponden a las características generales recopiladas sobre cada punto de agua son: localización, tipo de captación, código de identificación, nombre del predio, propietario, aspectos generales de construcción.

La localización se determinó con base en la técnica del G.P.S, (Sistema de Posicionamiento Multisatelital), que suministra coordenadas polares, las cuales se convirtieron a

coordenadas planas.

El código de identificación consta de dos partes, la primera corresponde al número de la plancha a escala 1:25.000, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, I.G.A.C, y al número consecutivo del inventario en cada una de ellas. La segunda corresponde al nombre del predio donde se encuentra el punto.

Las medidas in situ corresponden a la toma de algunos parámetros físicos y químicos; los parámetros físicos son: nivel estático y caudales de explotación. Los parámetros químicos corresponden a temperatura, conductividad, pH y concentración de cloruros en el agua.

También se recopiló información técnica de pozos: registro litológico, diseño, análisis químicos, pruebas de bombeo. Esta información fue obtenida, en su mayor parte, con las compañías de perforación que han trabajado en la zona.

En total se recolectó información de 777 puntos, de los cuales 47 corresponden a manantiales, 362 a aljibes y 368 a pozos.

Todos los puntos inventariados se encuentran localizados en las Planchas Nos. 4.1 a 4.3, y el resumen de la información recopilada se encuentra en el Anexo No. 2 y en archivos digitales.

4.4 RESULTADOS DEL INVENTARIO

4.4.1 Características Generales de los Puntos.

4.4.1.1 Pozos. Los pozos corresponden al 47.4 % del total de puntos inventariados, los cuales se encuentran ubicados en su gran mayoría, entre los municipios de Turbo y Chigorodó (Planchas Nos. 4.1 y 4.2). Estos pozos captan las unidades terciarias T2C y T2B; tienen profundidades entre 22 y 300 metros. La profundidad del 72% de ellos se encuentra entre 60 y 100 m.

La Tabla 4.1 resume el tipo de información recopilada y los puntos de los cuales se obtuvo.

Es de aclarar que los registros litológicos carecen de descripciones detalladas acerca de la granulometría y mineralogía de las rocas, por lo tanto su utilización tiene limitaciones. Con esta información se complementaron algunos aspectos de la geología y la geofísica, y fue importante en la identificación de las unidades acuíferas en profundidad.

Las pruebas de bombeo realizadas por compañías particulares se analizaron y se utilizaron para complementar la caracterización hidráulica de la región.

tabla 4.1

¡Error! Marcador no definido.

Los datos de cloruros y conductividad tomados durante el inventario fueron tenidos en cuenta en la hidroquímica para complementar la información obtenida con el muestreo y análisis físico-químico.

A partir de la evaluación de la información de los pozos, se diseñó la red de puntos con los cuales realizar los mapas piezométricos. Las medidas de niveles estáticos para ellos se realizaron durante los meses de marzo (época seca) agosto y noviembre (época húmeda) de 1994 (Tabla 4.2). Esta información fue complementada con los niveles tomados en el inventario de puntos de agua.

4.4.1.2 Aljibes. Los aljibes corresponden al 46.6 % de puntos inventariados, con profundidades entre 1 y 10 m, captan los depósitos y terrazas aluviales cuaternarias.

4.4.1.3 Manantiales. Corresponden al 6.0 % del total de puntos inventariados, se encuentran ubicados en su gran mayoría, en la parte norte del área, entre Turbo y Arboletes, en el Cuaternario y asociados a fracturas de la Unidad T1. Entre las poblaciones de Mulatos y Damaquiel, se observaron manantiales o pequeños embalses naturales con presencia de aceite, como en la finca La Esperanza, Figura 4.1, que podrían asociarse a resumaderos de hidrocarburos.

Tabla 4.2,

Figura 4.1. Aceite en agua de manantiales, Finca La Esperanza

En la zona al sur de Apartadó, los manantiales se encuentran ubicados en los afloramientos de la unidad T2C.

4.4.2 Uso del Agua. La principal utilización de los aljibes es para el abastecimiento doméstico y ganadería, en algunos casos.

El uso de los manantiales es para abastecimiento doméstico. A excepción de la población de Mulatos, donde el manantial de la quebrada María Ramos se utiliza para abastecimiento de agua dulce de toda la comunidad (Figura 4.2).

Figura 4.2. Manantial en la Q. María Ramos

La utilización de los pozos se da en gran medida por la actividad agroindustrial, especialmente en el proceso de lavado y empacado del banano, y es por lo tanto la que presenta la mayor demanda del recurso en la zona; en orden de importancia continua el abastecimiento público, el abastecimiento doméstico, la actividad industrial y por último el

riego y la ganadería.

La tabla 4.3 resume el porcentaje de uso de los pozos por actividad, y su estimación de consumo en metros cúbicos diarios. Para los cálculos de porcentaje de utilización, caudales de explotación promedios, uso diario y volumen diario extraído por pozo, se tomaron los datos del inventario de puntos de agua. El cálculo de la descarga diaria por actividad se realizó tomando el número de pozos inventariados dedicados a cada actividad. Para la actividad bananera se tomaron 350 puntos para este cálculo, considerando que de las 411 fincas bananeras existentes en la zona, el 85% de ellas utilizan agua subterránea. Este dato fue suministrado por AUGURA (comunicación verbal).

Los pozos utilizados para abastecimiento doméstico tienen caudales de explotación promedios de 1.91 m³/h y un tiempo de utilización de 3.12 Horas.

Para el abastecimiento público, se ha calculado un caudal promedio de 41.87 m³/h, con un tiempo de utilización de 12.74 Horas diarias.

Para la actividad agrícola, la utilización de los pozos es entre 8 y 12 horas diarias, durante 3 días en época seca y 6 días en época húmeda, con un caudal promedio de 9.0 m³/h. El agua es almacenada en reservorios, en algunas ocasiones, o pasa directamente a los tanques de lavado del banano de donde se vierte a los canales de desagüe, sin recirculación ni

reutilización (Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6).

tabla 4.3

Figuras 4.3. Reservorio Finca Triganá

Figura 4.4. Tanque de Lavado de Banano, Finca Américas

¡Error! Marcador no definido.

Figura 4.5. Tanque de lavado de Banano, Finca La Primera

En la actividad industrial se ha calculado el caudal de explotación de 27.72 m³/h y un tiempo de utilización de los pozos de 20.33 horas diarias. Las industrias mas representativas

¡Error! Marcador no definido.

son las de bebidas.

Figura 4.6. Vertimiento de las aguas a los canales, Finca Madelandia

En la Ganadería se tienen promedios de utilización de los pozos de 4 horas diarias y un

¡Error! Marcador no definido.

caudal de 14.4 m³/h.

En la Irrigación se tienen promedios de utilización de los pozos de 8.8 horas diarias y un caudal de 20.5 m³/h.

El principal problema que presenta el agua de los pozos, es el alto contenido de hierro, el cual es removido generalmente por métodos de aireación (Figuras 4.7, 4.8 y 4.9).

Figura 4.7. Sistema de Aireación. Finca Nuevos Tiempos

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

Figura 4.8 . Sistema de Aireación. Finca El Retiro

¡Error! Marcador no definido.

Figura 4.9. Sistema de Aireación. Finca La Primera

¡Error! Marcador no definido.

5. PROSPECCION GEOELECTRICA

5.1 GENERALIDADES

Como parte del Contrato CORPOURABA - INGEOMINAS, para la evaluación del agua subterránea en la región de Urabá, se realizó la prospección geoelectrónica. Dicha prospección fue realizada en la parte plana del área, en dos zonas divididas de la siguiente manera:

ZONA SUR: Corresponde a la parte plana del área del proyecto, entre Turbo y el Río Juradó y que comprende las localidades de Apartadó, Nuevo Colonia, Currulao, Guadualito, El Tres, Turbo, Churidó, Zungó, Carepa, Chigorodó y Barranquillita, donde fueron realizados 157 sondeos eléctricos verticales (S.E.V.).

ZONA NORTE: Corresponde a la parte plana del área del proyecto, entre el Municipio de Necoclí y el Municipio de Arboletes, donde se realizaron 31 sondeos eléctricos verticales (S.E.V.).

Los sondeos realizados se denominan utilizando un número de 1 a 157 en el sur y de 1 a 31

en el norte, tanto en el mapa de localización (Planchas 7.7 y 4.3), como en el anexo, los diagramas y el texto. La localización de los SEV, los cortes geoelectricos y los mapas de isopacas e isobatas se presentan en planchas a escala 1:100.000. Al final del texto se encuentran 18 diagramas de correlación, los cuales muestran las interfases que delimitan diferentes capas geoelectricas y permiten visualizar la continuidad y variaciones de las mismas entre sondeos. La interpretación matemática de los sondeos se presenta en el anexo 3.

5.2 OBJETIVOS

5.2.1 Objetivo General. Contribuir en la evaluación del potencial de agua subterránea en el área de estudio.

5.2.2 Objetivos específicos.

-Determinar la variación de la resistividad en el subsuelo.

-Distinguir unidades potencialmente acuíferas.

5.3 METODOLOGIA

La metodología empleada para la ejecución del presente trabajo, se basa en la aplicación del método geoelectrico e incluye:

- a. Compilación de información existentes.**
- b. Ejecución de 188 sondeos eléctricos verticales.**
- c. Procesamiento de los datos de campo.**
- d. Interpretación y correlación de los resultados.**

5.3.1 Método Geoelectrico. El método utilizado para el presente trabajo ha sido el de resistividad, mediante la realización de sondeos eléctricos verticales. Este método consiste en la medición de contrastes en la resistividad eléctrica del terreno bajo el punto sondeado a fin de determinar las profundidades a las que yacen unidades con diferente valor de resistividad, partiendo de la interpretación de una curva observada de resistividades aparentes.

En este trabajo se empleó el arreglo Schlumberger, el cual consiste en un dispositivo simétrico (Figura No. 5.1), en el que la distancia entre electrodos de medición de voltaje MN es muy pequeña, máximo una quinta parte de la distancia L.

figura 5.1

¡Error! Marcador no definido.

El valor de la resistividad eléctrica de una porción del terreno en determinado emplazamiento se obtiene así: se mide en el miliamperímetro la corriente I que corre por el terreno entre los electrodos de corriente y al mismo tiempo se mide con el potenciómetro el voltaje V entre los electrodos de potencial.

Con base en la ley de Ohm ($R=V/I$) se calcula el valor de la resistividad del material o terreno comprendido entre los electrodos de corriente, influido por los distintos horizontes geoelectricos que atraviesa el flujo del corriente. Este valor corresponde a la resistividad aparente y viene dado por la fórmula:

$$RA = K (V/I) \text{ En donde:}$$

K - Factor geométrico en m.

V - Diferencia de potencial en milivoltios

I - Intensidad de corriente en miliamperios

RA - Resistividad aparente en Ohm.m.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada sondeo se representan por medio de una curva en función de las distancias entre electrodos.

Los valores de R.A. se grafican en un papel bilogarítmico en el eje de las ordenadas, contra el valor de cada distancia media entre electrodos de corriente ($L/2$) en el eje de las abscisas.

La curva que resulta se denomina "Curva del Sondeo".

La curva del sondeo con los valores observados en campo se compara con curvas teóricas calculadas a partir de modelos, ya sea acudiendo a catálogos con series de ábacos o también con ayuda de calculadora electrónica o computador, los cuales permiten calcular la curva teórica a partir de cualquier modelo planteado y así obtener la interpretación matemática del sondeo.

5.4 ESTUDIOS ANTERIORES

Un estudio hidrogeológico fue realizado en 1986 en fincas bananeras afiliadas a PROBAN, los resultados incluyen la detección de la cuña marina y de 2 niveles acuíferos: uno superior correspondiente a un acuífero libre, cuya profundidad base se reporta menor de 20 m. y un nivel inferior correspondiente a un acuífero confinado a semiconfinado, hasta profundidades mayores de 100 m.

En el año de 1986, la firma Integral (Muñoz 88) llevó a cabo un estudio mediante contrato con Banacol para la evaluación de acuíferos en la zona bananera de Urabá, cuya segunda etapa incluye la prospección geoelectrica. Para esto se efectuaron 12 SEV en un área localizada al norte de la zona bananera en el corregimiento de Currulao en terrenos de

fincas bananeras de EXPOBAN. Con el estudio de identificación cinco (5) capas geoelectricas, se destacan como acuíferos potenciales la unidad basamental y la suprayacente, lo mismo que un nivel acuífero contaminado con agua salada.

De otra parte, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, publicó en 1983 el Mapa Gravimétrico de Anomalías Simples de Bouguer a escala 1:1.500.000 con una densidad adoptada de 2.67 gr/cm, referido al elipsoide internacional y con intervalos de contornos de 10 miligales. Allí se muestran dos anomalías:

- Una positiva, a partir del municipio de Carepa hacia el Sur.
- Una negativa, desde la región anterior hacia el Norte y noreste.

Esto demuestra la presencia, a una relativa poca profundidad, de rocas ígneas en el subsuelo del área sur y una cuenca de rocas sedimentarias hacia el noreste. Esto es congruente con la geología regional en la que hacia el sur del área de estudio, entre Mutatá y Pegadó afloran vulcanitas básicas del Cretáceo de acuerdo con el mapa geológico de Colombia a escala 1:1.500.000 publicado por INGEOMINAS en 1988, y de Mutatá hacia Necolí y Arboletes afloran turbiditas del Terciario.

Por lo anterior, es de esperarse que para la zona plana, entre Turbo y Juradó, los

sedimentos o rocas sedimentarias que cubren a un basamento ígneo tengan un espesor relativamente reducido y los potenciales acuíferos estén condicionados a esta circunstancia.

Para la zona norte se tiene que el área fue incluida en el estudio hidrogeológico ejecutado por el INGEOMINAS a través del convenio bilateral entre los gobiernos de Colombia y Holanda denominados: "Agua Potable en los Departamentos de Atlántico, Bolívar, Córdoba y Sucre y Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento en Chocó y Noreste de Urabá", por Pablo Caro y Otros (1985). Dentro de los resultados de este estudio se tienen la identificación y caracterización de las unidades potencialmente acuíferas, con base en los valores de resistividad eléctrica obtenidos y la cartografía geológica existente.

5.5 EVALUACION GEOELECTRICA DE LA ZONA SUR

5.5.1. Tipos de Curva. De acuerdo a la forma de las curvas de los SEV y a los rangos de valores de resistividad aparente (RA) es posible reconocer tipos de curvas y dividir las curvas en grupos, los cuales a su vez pueden representar condiciones geológicas a macrogeológicas diferentes (Overmeerem, 1987). En el presente estudio, las curvas de los SEV muestran rangos de RA con valores que van de 1 a 100 Ohm.m. y se tienen variaciones según las cuales se han obtenido 5 tipos de curva (Figuras Nos. 5.2a, b, c, d y e).

El primer tipo de curva se caracteriza por tener un mínimo de resistividad aparente con valores cercanos a los 10 Ohm.m. en medio de pendientes relativamente suaves con un cambio negativo de pendiente hacia mayor profundidad. Este tipo de curva está representado por el sondeo 136 (Figura No. 5.2a).

figura 52 a, b, c, d, e

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

El segundo tipo de curva se diferencia del primero en que el mínimo de RA llegue hasta valores menores, notoriamente bajos con pendientes más inclinadas. Este tipo de curva está representado por el SEV 146 (Figura No. 5.2b).

El tercer tipo de curva está representado por el sondeo 137. Este tipo de curva es similar al primero, sin embargo se caracteriza por tener un rango restringido de RA y termina con una leve pendiente positiva (Figura No. 5.2c).

El cuarto tipo de curva también se asemeja al primero, pero en este caso, sus valores de RA de la curva son mayores. El sondeo 73 representa este tipo de curva (Figura No. 5.2d).

La característica del quinto tipo de curva es el rango de valores de RA relativamente altos, a semejanza del anterior, y sobretodo terminar en profundidad con tendencia a un valor de resistividad del basamento geoelectrico mayor que todos los anteriores. El sondeo 127 representa este tipo de curva (Figura No. 5.2e).

La Tabla 5.1 presenta los sondeos eléctricos verticales y su correspondiente tipo de curva

5.5.2 Interpretación. Partiendo de la interpretación matemática, las capas geoelectricas de los SEV representativos de cada tipo de curva se correlacionan hidrogeológicamente

TABLA 5.1
SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES Y TIPOS DE CURVA ZONA SUR

S.E.V	TIPO DE CURVA	S.E.V.	TIPO DE CURVA	S.E.V	TIPO DE CURVA						
1	1	27	1	53	2	79	1	105	1	135	1
2	2	28	1	54	2	80	4	106	1	136	1
3	2	29	3	55	2	81	4	107	1	137	3
4	3	30	1	56	2	82	4	108	1	138	1
5	2	31	1	57	1	83	1	109	1	139	1
6	2	32	1	58	2	84	1	110	1	140	1
7	1	33	1	59	2	85	1	111	1	141	1
8	1	34	1	60	2	86	1	112	4	142	1
9	1	35	1	61	2	87	1	113	4	143	2
10	4	36	1	62	3	88	1	114	4	144	1
11	1	37	1	63	1	89	4	115	4	145	2
12	1	38	1	64	1	90	1	116	4	146	2
13	1	39	3	65	2	91	4	117	4	147	1
14	1	40	1	66	2	92	2	118	4	148	1
15	1	41	1	67	4	93	1	119	4	149	2
16	1	42	1	68	4	94	2	120	2	150	2
17	1	43	3	69	1	95	1	121	4	151	3
18	4	44	1	70	1	96	1	122	4	152	1
19	4	45	1	71	1	97	1	123	4	153	1
20	4	46	2	72	4	98	1	124	5	154	1
21	1	47	2	73	4	99	1	125	4	155	2
22	1	48	3	74	1	100	4	126	5	156	1
23	1	49	3	75	4	101	4	127	5	157	1
24	2	50	1	76	4	102	1	128	5		
25	2	51	2	77	4	103	1	129	5		
26	1	52	2	78	4	104	1	134	1		

¡Error! Marcador no definido.

teniendo en cuenta no solamente rangos generales de resistividad (Overmeerem, 1987) sino también, información del proyecto sobre:

- Rasgos geológicos conocidos, según los cuales se asume la presencia de unidades litológicas que puedan conformar el terreno.
- Rangos de resistividad obtenidos durante estudios anteriores en el área, los cuales correlacionan diversas litologías y calidades de agua con la resistividad.

Los resultados de esta interpretación , para cada tipo de curva se presentan en la Tabla 5.2

5.5.3 Correlación de Unidades Geoeléctricas. Ocho diagramas de correlación (Figuras Nos. 5.2 al 5.9, en bolsillo) fueron elaborados con el fin de observar la continuidad y variaciones de las diferentes capas geoeléctricas de sondeo a sondeo. Uno de los diagramas se extiende a lo largo del área subparalelo a la dirección sur - norte y el resto va transversal, en sentido subparalelo a la dirección oeste este.

En todos estos diagramas se pueden apreciar las siguientes unidades:

- Una unidad superficial, hasta profundidades de un poco más de 20 m, permeable,

algo arcillosa, con valores entre 7 - 28 Ohm.m.

TABLA 5.2
CORRELACION HIDROGEOLOGICA DE LAS CURVAS ZONA SUR

tipo de curva	SEV	PROFUNDIDAD TECHO (m)	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (Ohm.m)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	136		1	25	Capa superficial arcillosa
		1	12.5	22.5	Area arcillosa saturada con
		13.5	35	8	Arcilla
		48.5	28	19	Areniscas conglomeráticas y
		76.5		10	Arcilla
2	146		1	20	Capa superficial arcillosa
		1	5	23	Arena arcillosa saturada con
		6	12	7	Arcilla
		18	42	2.5	Sedimentos sin diferenciar
		60	67	23	Areniscas conglomeráticas y
		127		8	Arcilla
3	137		0.8	20	Capa superficial arcillosa
		0.8	9.5	23	Arena arcillosa saturada con
		10.3	160	11.8	Arcilla
		170.3		14	Intercalaciones de arena y
4	73		1	20	Capa superficial
		1	2	47	Gravas y arena saturada con
		3	13	14	Arcilla
		16	103	48	Areniscas conglomeráticas
		119		11	Arcilla
5	127		0.7	28	Terraplén y pavimento
		0.7	3	10	Arcilla
		3.7	30	15	Arena bastante arcillosa
		33.7	80	25	Areniscas conglomeráticas y
		113.7		32	Gravas y arena saturadas con

- Una unidad intermedia que, según sus resistividades, es principalmente arcillosa e impermeable e infrayace a la anterior, con valores entre 1 - 15 Ohm.m.

- **Una unidad inferior, con resistividades relativamente mayores debido a la presencia de niveles de arena y/o grava saturadas, confinada por la anterior, con valores entre 13 - 45 Ohm.m.**
- **El basamento geoelectrico que infrayace la unidad anterior con resistividades relativamente menores. Corresponde a una capa arcillosa e impermeable, con valores de 5 - 12 Ohm.m Esta sucesión de capas de mayor y menor permeabilidad pierde su continuidad en la parte norte debido a la presencia posiblemente de la cuña marina.**

La unidad confinada muestra dos variaciones importantes en su resistividad: el valor más bajo (de 13 Ohm.m) en el tramo que infrayace la cuña marina, lo cual sugiere la posibilidad de contaminación por agua marina y el valor más alto, notoriamente mayor que el resto (30 Ohm.m) se explica con un cambio litológico ya que la unidad toma este valor, extendiéndose considerablemente.

En los diagramas en sentido E-O, se observa como la secuencia se interrumpe al occidente

debido a la aparición de valores bajos, continuando hacia el oriente hasta aflorar principalmente en la parte sur.

5.5.4 Mapas de Isorresistividad. Los mapas de áreas de igual valor de resistividad eléctrica han sido elaborados para profundidades de 10, 30, 100 y 200 m con intervalos que permiten diferenciar áreas con características hidrogeológicas inferidas de acuerdo con rangos de resistividad similares a los adoptados anteriormente. Estos mapas se basan en los datos de los sondeos eléctricos verticales medidos en el área.

De este modo:

- **Valores de resistividad menores de 4 Ohm.m identifican unidades saturadas con agua salada, sin diferenciar en lo que respecta a su litología.**

- **Valores de resistividad en el rango de 15 a 45 Ohm.m reflejan el carácter arenoso de la unidad, aumentando de acuerdo con el aumento en el tamaño de grano o bien la menor proporción del contenido arcilloso.**

- **El rango intermedio entre los anteriores (5 a 15 Ohm.m) corresponde a unidades arcillosas no acuíferas, a excepción de algunas intercalaciones arenosas de menor**

importancia que disminuyen un poco la proporción de arcilla para los mayores valores dentro del rango.

5.5.4.1 Mapa de isorresistividad a 10 m de profundidad (Figura No. 5.10). A esta profundidad se tienen valores de resistividad menores de 4 Ohm.m en la parte noroccidental del área estudiada, lo cual muestra la influencia extendida de agua salada, interpretada como la zona intruida posiblemente por la cuña marina. Esta zona se encuentra entre la línea de costa y la isolínea de 4 Ohm.m., se aprecia separadamente en la localidad del Congo y en un tramo mayor comprendido por localidades como Puerto Cesar, Casanova y Nueva Colonia.

Alrededor de la isolínea de 4 Ohm.m. la resistividad aumenta levemente en una franja subparalela a la costa hasta 15 Ohm.m.

5.5.4.2 Mapa de isorresistividad a 30 m de profundidad (Figura No. 5.11). Aquí se observa que, a esta profundidad, el área en la cual se detecta alguna influencia posiblemente marina, se amplía, involucrando localidades tales como Turbo, Guadualito y Nueva Colonia; también se amplía la franja subparalela a la costa, abarcando la localidad de Maderas del Darién. Esta región muestra una isolínea de resistividad de 4 Ohm.m como indicio de la influencia arriba mencionada. Hacia la parte suroriental del área, entre Carepa y Juradó se

presentan isolíneas iguales o mayores a 16 Ohm.m,

Figura 5.10, 5.11. Isorres a 30m

¡Error! Marcador no definido.

lo cual enmarca una región con buenas probabilidades acuíferas, desde el punto de vista geoelectrico.

5.5.4.3 Mapa de isorresistividad a 100 m de profundidad (Figura No. 5.13). En este mapa, constituido de manera similar a los anteriores, se muestra una distribución de isolíneas de resistividad que van desde 8 Ohm.m en la parte más norte, hasta 16 Ohm.m en la zona central y suroccidental. De allí hacia el oriente se muestran curvas entre 16 y 48 Ohm.m que indican la existencia de materiales con buena probabilidad acuifera, principalmente en la zona sur entre Apartadó, Carepa, Chigorodó y Barranquillita. Hacia el noroeste no se manifiesta claramente alguna influencia marina a dicha profundidad.

5.5.4.4 Mapa de isorresistividad a 200 m de profundidad (Figura No. 5.14). Este mapa muestra líneas de contornos entre 6 y 14 Ohm.m principalmente, lo cual permite deducir que esa profundidad de 200 m con respecto al terreno, las posibilidades acuíferas son más bajas que en los casos anteriores. Tampoco es clara la influencia marina hacia el sector que circunda el golfo de Urabá.

5.5.5 Mapa de Isopacas de la Unidad Acuifera Superior o Sedimentos Acuiferos del Cuaternario (Plancha 7.6). Para su elaboración se tomaron los datos de los 157 SEV realizados y se empleó el método gráfico de triangulación (Castany, 1976). Se trazaron

isolíneas cada 5 m de espesor obteniéndose los siguientes resultados.

Figura No. 5.12 Isorres a 100m, figura 5.13

¡Error! Marcador no definido.

1. Espesores mayores de 15 m.

Especialmente al sur del área, en la cuenca del río León y en menor proporción en la cuenca de los ríos Chigorodó, Carepa, Currulao, Guadualito y Turbo en sus respectivas áreas de salida hacia la llanura aluvial. De esta manera los espesores van disminuyendo a medida que el curso de los ríos avanza hacia el Golfo así: para el río León, de sur a norte y para los demás ríos mencionados, de este a oeste.

2. Espesores entre 5 y 15 m:

Principalmente en el municipio de Apartadó y al norte en los municipios de Turbo y Guadualito.

3. Espesores menores de 5 m:

Se concentran hacia el sector del golfo propiamente dicho, así como en cercanía a la zona montañosa en forma paralela al contacto entre los sedimentos de Cuaternario y las rocas del Terciario. También hacia la parte occidental del área como en Nueva Colonia, Maderas del Darién y occidente de las bananeras.

5.5.6 Mapas de Contornos de la Unidad Acuífera Inferior. Esta unidad está constituida por intercalaciones de arcillolitas y areniscas conglomeráticas, con predominancia de esta últimas, por lo tanto se utilizará la definición de arenisca conglomerática para describirla.

5.5.6.1 Mapa de isóbatas del techo (Plancha 7.7). Para la elaboración de este mapa, que muestra la variación de la profundidad a la cual se encuentra el techo de una unidad de arenisca conglomerática, se tuvo en cuenta la información de registros litológicos de 107 pozos, obtenidos durante el inventario de puntos de agua; a estos datos se sumaron los 157 de los SEV para un total de 264 puntos. A los datos se les dio un tratamiento geoestadístico. Para ello se analizó la correlación de ellos y se ajustaron a un modelo lineal; La correlación fue buena tanto para los datos tanto de los pozos como de los SEV en conjunto. Posteriormente se aplicó el Kriging, como método de interpolación, a través del programa denominado GEOPACK, para finalmente trazar el mapa de contornos con el programa SURFER for WINDOWS.

Se trazaron isolíneas cada 5 metros y el resultado general es una tendencia de profundización tanto de sur a norte como de oriente a occidente dando un indicio de una cuenca sedimentaria con cabeceo hacia el norte, lo cual permitiría deducir que la dirección de flujo de aguas subterráneas se espera que sea tanto al sentido sur-norte como sentido este - oeste, es decir en dirección hacia el Golfo de Urabá.

Las profundidades a las cuales se encuentra el techo de dicha arenisca conglomerática van desde unos 20 m en el sector de Barranquillita, en la parte sur del área, hasta 75 m entre

Turbo y Apartadó, en la parte norte del área y entre 0 m, en el contacto geológico

aflorante en la parte oriental del área, hasta 45 y 75 m en las partes suroccidental y noroccidental, respectivamente.

Es de anotar que las profundidades seleccionadas de los SEV fueron aquellas en donde se encontraba la 3a. unidad geoelectrica (15 - 45 Ohm.m).

5.5.6.2 Mapa de isópacas (plancha 7.8). Para su realización se tomaron los datos de los 157 SEV y algunos de los pozos perforados en el área. Se elaboró en forma manual empleando el método gráfico de triangulación (Castany, 1976) para la construcción de mapas de contornos.

Se trazaron isolíneas cada 20 m de espesor obteniéndose como resultados los siguientes:

1. Espesores mayores de 100 m.

En la parte sur del área:

- En una franja con dirección NE-SW, desde Carepa y Chigorodó, hasta el sector occidental de Barranquillita al este del río León, constituyéndose en una cuenca**

sinclinal paralela al anticlinal de Chigorodó aflorante al oriente, es una de las zonas de mayor interés hidrogeológico en la región.

En la parte norte del área:

- Al oeste de Currulao y oriente de Turbo, distribuido de manera irregular, no tan definida direccionalmente como en la parte sur del área.

2. Espesores entre 40 y 100 m.

En el centro y sur del área:

- A manera de franjas NE-SW, en el sector de las bananeras y al oeste del corregimiento de Carepa. Así mismo, el oeste, oriente y sur del municipio de Apartadó, como también al oriente de Barranquillita. Estos constituyen pliegues menores, suaves, en esa dirección.

En la parte norte del área:

- En Turbo, Currulao y oeste de Currulao de manera irregular.

3. Espesores menores de 40 m.

En la parte sur del área:

- En franjas paralelas al anticlinal de Chigorodó, pero al noroccidente de este municipio, constituyéndose en una especie de altos estructurales en profundidad que conforman el subsuelo de la zona plana. De acuerdo con esto, estas áreas serían de menor interés hidrogeológico comparado con los que presentan un mayor espesor.

En la parte norte del área:

- En una dirección aproximada NW-SE, desde Turbo hacia Apartadó, paralela a la Falla de Apartadó, interrumpiendo así la forma de plegamiento existente de Apartadó hacia el sur.

5.6 EVALUACION GEOELECTRICA DE LA ZONA NORTE

5.6.1 Generalidades. En la zona norte se realizaron 31 Sondeos Eléctricos Verticales a fin de evaluar el potencial acuífero de los depósitos cuaternarios, de acuerdo con el estudio geológico realizado previamente. Los sondeos se efectuaron con un AB/2 máximo de 190,3 m.

5.6.1.1 Sondeos Realizados. Se realizaron aquí 31 Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.) con una abertura de electrodos de AB/2 de 190,3 m. Los sitios estudiados están localizados

aproximadamente en las siguientes coordenadas, tomadas de las planchas en escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Plancha 5.1).

Con estos sondeos se elaboraron nueve (9) cortes geoelectricos, a lo largo de la zona, de los cuales se hará una breve descripción.

5.6.2. Interpretación. Esta serie de sondeos se agruparon en curvas de cuatro tipos (Figuras Nos. 5.15 a, b, c y d) a saber:

Primer Tipo

Los sondeos de este grupo son: el 2, 4, 5, 9, 12, 13, 16, 19, 21, 23 y 25. Se inicia el S.E.V. con un valor dado de resistividad entre 3 y 18, excepto los sondeos 19 y 25 los cuales superan los 700 Ohmios*m y se comportan así proporcionalmente; luego desciende en uno varios escalones (entre 0,7 y 4 Ohmios*m), para finalmente alcanzar un valor intermedio entre los dos extremos (2.5 a 6 Ohmios*m).

La curva del sondeo 13 es la que caracteriza este comportamiento, (Figura No.5.15a) el cual está localizado a unos 300 m de la vía principal, sobre la desviación a los corregimientos de

Belén y Siete Vueltas, ubicados al sur del Uvero. Sus coordenadas son: X = 1'458.068; Y = 1'059.443.

Figura 5.15 a,b,c,d

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

Segundo Tipo

Los sondeos de este grupo son: el 1, 3, 8, 10, 14, 20, 22, 24, 26, y 31. Este tipo de curva se inicia en valores de resistividad medios entre 10 y 30 a excepción de los sondeos 22 y 24 cuyo punto de inicio es alrededor de los 100 Ohmios*m. Paulatinamente descienden a valores menores (en algunos casos con altibajos entre 2 y 25 Ohmios*m) hasta conseguir valores bajos (0,7 a 7 Ohmios*m).

El sondeo 20 representa este grupo (Figura 5.15b) y se localiza en la finca La Lucha al oeste de la ciénaga La Marimonda; dista unos 12.000 m de Necoclí, sobre la vía que conduce a el cerro el Aguila; sus coordenadas son: X = 1'438.422; Y = 1'028.318.

Tercer Tipo

Los sondeos 6, 7, 15, 17, 28 y 29 presentan las características de este tipo de curva. Ella se inicia con resistividades bajas (7 a 25 Ohmios*m), a excepción del sondeo 7 realizado sobre el volcán de lodo de Arboletes, el cual mantiene este comportamiento pero desplazado una década abajo posteriormente se eleva a valores máximos (entre 25 y 300 Ohmios*m) excepto el sondeo 6, para finalizar en resistividades intermedias (de 7 a 50 Ohmios*m).

El sondeo 15 el que caracteriza este grupo (Figura 5.15c). Se localizó en la localidad del Uvero, a unos 150 m de la línea de costa en coordenadas $X = 1'458.751$; $Y = 1'055.178$.

Cuarto Tipo

Los sondeos 11, 18, 27 y 30 presentan las características de este tipo de curva. Se caracteriza porque se inicia en valores de resistividad medios (entre 4 y 10 Ohmios*m) y seguidamente va alternándose entre valores más altos o más bajos, para finalizar en resistividades mayores a las del inicio (de 9 a 35 Ohmio*m). El sondeo 30 el que representa al grupo (Figura 5.15d); éste se localiza en las coordenadas $X = 1'434.232$; $Y = 1'043.704$, a 300 m del río Mulatos, sobre la vía que conduce al corregimiento de Meyitos.

La correlación hidrogeológica de los cuatro tipos de curvas se presentan en la Tabla 5.3.

5.6.3 Resultados. La observación de los sondeos nos permite establecer que, además de la clasificación por tipos o formas de sondeos estos se pueden agrupar de acuerdo con los valores finales de resistividad, los cuales se correlacionan con el tipo de roca así:

TABLA 5.3

CORRELACION HIDROGEOLOGICA DE LAS CURVAS ZONA NORTE

TIPO DE CURVA	SEV	RESISTIVIDAD (Ohmios*m)	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD DE LA BASE (m)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	13	5.0	1.6	1.6	Suelos limo-arcillosos
		2.4	4.4	6.0	Arcillas
		1.1	7.0	13.0	Limos saturados con aguas salobres
		3.8	-	-	Arcillolitas
2	20	13.2	0.7	0.7	Suelos areno-limosos
		2.7	4.8	5.5	Arcillas
		4.4	38	43.5	Lodolitas y areniscas
		1.35	-	-	Arcillolitas
3	15	7.3	2.7	2.7	Suelos limo-arcillosos
		14	11	13.7	Limos saturados
		24	65	78.7	Arenas saturadas
		7.7	-	-	Lodolitas y areniscas
4	30	9.6	5.5	5.5	Suelos limo-arcillosos secos
		55	7	10.5	Gravas y arenas saturadas (depósitos recientes)
		16	22	32.5	Arenas limosas saturadas (depósitos recientes)
		65	50	82.5	Gravas y arenas saturadas (depósitos antiguos)
		20	---	---	Limos arenosos (depósitos antiguos)

A) RESISTIVIDADES MUY BAJAS (0,6 - 2,0):

(Aguas saladas y fuentes diapíricas).

Sondeos: 1, 3, 7, 10, 20 y 22

y

RESISTIVIDADES BAJAS (2,0 - 4,0):

(Arcillolitas predominantes).

Sondeos: 2, 4, 5, 6, 9, 21, 23 y 31

Ejemplos de este tipo de sondeos se tienen principalmente en los alrededores de Arboletes, San Juan de Urabá y Damaquiel, donde los depósitos cuaternarios que conforman la

terraza marina entre Arboletes y San Juan constituyen una franja estrecha.

Un caso particular de muy bajas resistividades se presenta en el sondeo 7, localizado sobre el volcán de lodo de Arboletes, donde se observan dos capas de muy bajas resistividades, tanto encima de los primeros 31 m, como debajo de los 90; esto lleva a pensar en que existirían dos zonas viscosas: la superficial, que se evidencia en el cráter y una posible fuente profunda en la parte inferior.

En los cortes 9 y 10 (Figura No. 5.16, en bolsillo) se aprecia la carencia de capas saturadas con aguas de calidad aceptable presentándose en las capas inferiores bajas a muy bajas resistividades.

Otra zona de bajas resistividades se presenta al norte de Necoclí en el corte 11 (Figura No. 5.17, en bolsillo), realizado con dirección noroeste, compuesto por los sondeos 20, 21, 22 y 23, el cual corta de manera sesgada las estructuras geológicas regionales y su buzamiento aparente.

B) RESISTIVIDADES MEDIAS (4,0 - 12,0):

(Lodolitas y areniscas calcáreas).

Sondeos: 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 26 y 27 y excepcionalmente el sondeo

11.

Se localizan estos sondeos sobre la franja que va desde San Juan de Urabá hasta la localidad de Mulatos, donde la llanura costera se amplía; así mismo entre las ciénagas de Marimonda y el Salado.

Los cortes 14, 15, 16 y 17 (Figura Nos 5.20 al 5.22, en bolsillo) nos muestran esquemáticamente como se distribuyen las resistividades entre Damaquiel y San Juan de Urabá; allí se presenta una capa acuífera con agua de buena calidad, a juzgar por los valores de resistividad (alrededor de 24 Ohmios*m) y que alcanza su mayor espesor en la localidad del Uvero (sondeos 15, y 12); es notoria la ausencia de la cuña marina, debido a la baja explotación actual del acuífero, sobre la cual deberá establecerse el debido control.

En el corte 13, (Figura No. 5.19 en bolsillo) se observa el contraste de resistividades entre las rocas terciarias (resistividades bajas) y los depósitos cuaternarios, los cuales se profundizan hacia el oeste, cerca a Mulatos. En este sector de costa se tienen acuíferos potenciales con aguas de buena calidad.

Finalmente, este tipo de resistividades medias se consiguieron en la zona occidental del área

de estudio entre las ciénagas de Marimonda y el Salado (Corte 12, Figura No. 5.18, en bolsillo). Cabe anotar aquí que por las condiciones físicas del sitio los sondeos se realizaron con una dirección transversal a las estructuras geológicas regionales; de esta manera, bajo el sondeo 24 se observó la posibilidad de tener dos capas acuíferas aisladas, las cuales no se manifiesta en ninguno de los sondeos adyacentes; las profundidades han sido estimadas entre 12,4 y 15.2 m, la primera y entre 30,0 y 53,2 m la segunda.

C) RESISTIVIDADES ALTAS (20 - 50):

(Depósitos Aluviales Antiguos y Recientes).

Sondeos: 28, 29 y 30

Conforman estos sondeos, junto con el número 31, el corte 18 (Figura No.5.23, en bolsillo), ubicado entre las localidades de Piedrecitas y Meyitos. En este corte se observa entre los sondeos 30 y 31 el contraste entre las rocas Terciarias y los depósitos Cuaternarios, donde se presenta una notable discontinuidad en los valores de resistividad, la cual se podría asociar con el fallamiento planteado en el mapa geológico; se presume así de la existencia de una discontinuidad litológica o fallamiento por tracción pues se tiene una "cuenca" profunda que ha sido rellenada con la sedimentación de los ríos que drenan la zona. En el corte se infiere además la existencia de capas acuíferas de gran espesor y buena calidad.

6. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA

6.1 INTRODUCCION

El estudio de hidrogeoquímica realizado dentro del marco del proyecto " Evaluación de Aguas Subterráneas en la Región de Urabá en el Departamento de Antioquia" tiene como objetivo conocer la variación espacial de la calidad físico-química del agua subterránea, los procesos que la condicionan y sus posibilidades de uso, tanto para consumo humano como para riego.

6.1.1 Generalidades. La composición química del agua subterránea la determinan una serie de complejos procesos químicos y biológicos que ocurren cuando el agua de precipitación circula a través del suelo, zonas no saturada y saturada del acuífero; siendo afectada por el tiempo de residencia del agua, la litología y mineralogía del material acuífero, el sistema de flujo y la presencia cercana del agua salina (en zonas costeras).

Intrusión marina. Los acuíferos cercanos a estuarios y a líneas de costa están sujetos a la intrusión marina, que puede suceder por condiciones de flujo natural o por flujo inducido por la explotación del agua.

Como parámetros indicadores de intrusión marina se emplea la relación Cl/HCO_3 y Mg/Ca que tienen valores muy característicos en aguas marinas y continentales, como los presentados en la Tabla 6.2 (Custodio et al, 1976).

TABLA 6.1. VALORES DE LAS RELACIONES Cl/HCO_3 y Mg/Ca INDICADORAS DE CONTAMINACION MARINA

PARAMETRO	AGUAS MARINAS	AGUAS CONTINENTALES
Cl/HCO_3	20- 50	0.1- 5.0
Ca/Mg	5.0	0.3- 1.5

Depositación atmosférica. Las contribuciones o entradas atmosféricas tales como el agua lluvia (deposición húmeda) y los aerosoles marinos (deposición seca) determinan un porcentaje importante de las sustancias solubles encontradas en muchas aguas subterráneas. A modo de ilustración se presenta en la Tabla 6.2 la concentración del agua lluvia en una zona costera y de los aerosoles marinos (Tomado de Schuiling, 1983).

En la Tabla 6.2, puede observarse que los aerosoles marinos presentan mayor cantidad de Cl y Na , y pueden representar un importante aporte a las aguas subterráneas. A su vez éstas iones, como los demás en solución, pueden aumentar su concentración en el agua

subterránea por procesos de evapotranspiración.

TABLA 6.2. COMPOSICION AGUA LLUVIA Y AEROSOLES MARINOS

PARAMETRO	AGUA LLUVIA CONCENTRACION MEDIA, mg/L	AEROSOLES MARINOS CONCENTRACION, ppm
Ca	0.65	0.2
Mg	0.5	0.7
Na	0.3	5.6
K	0.57	0.2
HCO ₃	-	0.1
SO ₄	-	1.4
Cl	5.6	9.9

Condiciones oxidantes o reductoras del medio. La solubilidad del hierro en el agua depende del pH y del caracter oxidante o reductor del medio (potencial redox), en términos generales si $2.2 < \text{pH} < 7.7$, la movilidad del Fe depende de las condiciones redox del medio.

El hierro en el agua en un medio reductor se encuentra en solución en forma de sales ferrosas (como Fe⁺⁺) que al entrar en contacto con el oxígeno disuelto en el agua (condiciones oxidantes) pasan a sales férricas (como Fe⁺⁺⁺) y precipitan en forma de hidróxido férrico, siendo esta precipitación instantánea cuando el pH es superior a 7.7. Estos estados del Fe se rigen por unos equilibrios

representados en las siguientes ecuaciones: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$

6.2 METODOLOGIA DE TRABAJO

6.2.1 Recolección de Muestras. En la toma de las muestras de agua se consideraron los siguientes aspectos:

- En pozos: la muestra se recogió en la boca del pozo después de un tiempo mínimo de 5 minutos de iniciado el bombeo, evitando cualquier tipo de alteración.
- En aljibes: la muestra se tomó con un muestreador que evita su aireación, el cual se bajó aproximadamente 5 cm por debajo del nivel estático.
- En manantiales: la muestra se recogió de la superficie, evitando la introducción de material extraño.
- Aguas superficiales: Las muestras recolectadas son puntuales, tratando de obtener una muestra representativa del cuerpo de agua a caracterizar.

6.2.2 Preservación de muestras. En la preservación de las muestras de agua para el análisis

físico-químico se tienen en cuenta las siguientes recomendaciones de entidades como American Water Works Association, Environmental Protection Agency (EPA) y United States Geological Survey (USGS):

- Tomar dos litros de agua sin aditivos y mantener refrigerado para medir turbiedad, color, alcalinidad, dureza, cloruros y sulfatos.
- Filtrar 500 ml de muestra a través de una membrana de 0.45 micras y preservar adicionando 5.0 ml de HNO₃ concentrado, para el análisis de metales en solución.

6.2.3 Determinaciones de campo. A cada una de las muestras en el sitio de muestreo se les hicieron las siguientes mediciones: Temperatura (°C), pH potenciométrico y conductividad (uSiemens/cm).

Al finalizar cada jornada de muestro se determinó a cada una de las muestras color, turbiedad, alcalinidad, cloruros y dureza total, en un laboratorio portátil.

6.2.4 Análisis de laboratorio. El análisis físico-químico se completó en el Laboratorio de Química Ambiental del INGEOMINAS. Los métodos analíticos empleados y su límite de detección se resumen en la Tabla 6.3.

A partir de los resultados analíticos se calculó el porcentaje de error del balance iónico, mediante la base de datos de química que maneja el Programa Geobase. Si éste porcentaje es mayor del 5% se repiten en el laboratorio aquellos parámetros que se presume están ocasionando el error, y se continua con el proceso hasta tanto el error sea inferior o igual al 5% , descartando aquellos análisis que no cumplan con ésta norma de calidad de resultados.

TABLA 6.3. METODOS ANALITICOS UTILIZADOS Y SU LIMITE DE DETECCION

PARAMETRO	METODO DE ANALISIS	LIMITE DE DETECCION
pH	Potenciometría	0.1- 0.01 (sensibilidad)
Conductividad	Instrumental	1-5 umhos/cm (depende equipo)
Color	Colorimetría	5
Turbiedad	Turbidimetría	1 (según equipo)
Dureza Total	Complejometría.EDTA	10 ppm
Alcalinidad	Titulación.Naranja de metilo	10 ppm
Solidos en Solución	Gravimetría	25 mg/L
Cloruros	Volumetría.AgNO ₃	5 ppm
Sulfatos	Turbidimetría	5 ppm
Calcio	EDTA Absorción Atómica	4 ppm 1 ppm
Magnesio	EDTA Absorción Atómica	4 ppm 1 ppm
Hierro	Absorción Atómica	0.1 ppm
Potasio	Absorción Atómica	0.5 ppm

6.2.5 Procesamiento y análisis de los datos. Una vez obtenidos los resultados de laboratorio fueron separados los datos por unidades hidrogeológicas, y se les aplicó el siguiente análisis estadístico:

- **Análisis univariado para cada parámetro determinado, con el fin de conocer el comportamiento y distribución espacial de cada variable.**
- **Análisis multivariado, con el fin de establecer grupos o asociaciones de parámetros (variables) con comportamientos y distribución espacial similares.**

Posteriormente se correlacionaron los resultados obtenidos con los métodos estadísticos y las características hidrogeológicas de la región, con el fin de identificar los procesos hidrogeoquímicos que rigen las aguas subterráneas y conocer su comportamiento espacial.

Finalmente se hizo la clasificación geoquímica y para diversos usos, así como el cálculo de los parámetros indicadores de intrusión marina.

6.3 INFORMACIÓN RECOPIADA

La selección de las captaciones de agua a muestrear se hizo con base en la información de calidad química tomada en el inventario de puntos de agua, la distribución espacial y el tipo

de captación. El muestreo se realizó entre el 10 de octubre y el 16 de noviembre de 1994.

En total se recolectaron y analizaron 248 muestras de agua subterránea de los cuales 124 correspondieron a aljibes (con profundidades entre 1 y 9.9m); 114 a pozos (profundidades entre 25 y 250m) y con variaciones del nivel estático entre 0.25 y 15.9 m., 4 a manantiales, 4 muestras de agua residual de la industria bananera, 1 muestra de agua lluvia tomada en Apartadó aproximadamente a 10 Km del Golfo y 1 muestra de agua de mar en Necoclí.

La distribución espacial del muestreo estuvo limitada por la densidad de puntos de agua disponibles; por esto en la parte norte solo se tomaron 10 muestras, mientras que el resto correspondieron a la zona entre las poblaciones de Turbo y Juradó.

Por lo anterior, la discusión de resultados se plantea solamente a partir de las muestras analizadas en el sector sur. Las tomadas en los aljibes son representativas de los Depósitos Aluviales Cuaternarios (Llanura Aluvial Mutatá-Turbo) y las de los pozos corresponden a los Conjuntos B y C de la Unidad T2.

Es importante anotar que las muestras tomadas en los pozos corresponden a una mezcla de aguas de diferentes horizontes acuíferos de la Unidad T2 (dependiendo su diseño y los horizontes captados), por esto, los resultados que se exponen a continuación deben tomarse

como una generalización de esta unidad.

Los resultados analíticos de las muestras de agua se presentan en el Anexo 4.

6.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis de los datos hidroquímicos se procesaron en forma independiente los resultados obtenidos de las muestras de los aljibes y de los pozos.

El procesamiento e interpretación de la información se llevo a cabo mediante el uso del software estadístico SPSS/PC versión 5; algunos programas de análisis geoestadístico tales como el GEOEAS y GEOPACK, y el programa para contorno automático SURFER for Windows Versión 5.0.

El análisis se realizó mediante el uso de técnicas estadísticas univariadas y multivariadas, las cuales combinadas con herramientas geoestadísticas permitieron describir adecuadamente el comportamiento de las variables de interés en el área de estudio.

Inicialmente se estudio la distribución individual de cada uno de los elementos seleccionados, utilizando el método estadístico univariado y posteriormente se aplicó el método multivariado de análisis factorial R-Mode, con el fin de agrupar los elementos

seleccionados en una serie de asociaciones o factores que pueden explicar la variación total de los datos.

De los diferentes modelos de factores generados por éste método, se escogió aquel que explicó el mayor porcentaje de la varianza de las variables y en el cual se pudo identificar los diferentes procesos que están afectando el comportamiento de las variables de estudio.

Una vez caracterizados los diferentes factores en el modelo seleccionado, se generaron mapas de cada uno de ellos.

6.4.1 Análisis Estadístico Univariado. Este análisis univariado permitió observar y explicar algunas características en el comportamiento de los datos hidroquímicos, tales como el tipo de distribución de los datos, los valores anómalos, valor máximo normal (threshold), valor máximo anormal etc, así como determinar el tipo de transformación que se debe elaborar en los datos para que satisfagan los requerimientos de los métodos de análisis multivariados que se aplicaron posteriormente en ellos (Tukey, J.W. 1977).

El uso de técnicas estadísticas descriptivas simples tales como la media, la mediana, la desviación estándar, valores máximos y mínimos, rango, etc. y de herramientas gráficas como los diagramas de cajas "Boxplot", permitieron resumir las características principales de los datos.

Para la determinación de los valores máximo normal y los valores anómalos, se utilizaron los diagramas de cajas, el cual es un gráfico que resume la información principal de la distribución de los datos; en él se despliegan las estadísticas principales tales como: la mediana, el percentil del 25%, el percentil del 75% y los valores que están muy alejados del resto o valores extremos (valores anómalos).

En la figura No. 6.1 se presenta un esquema de este gráfico. El límite inferior de la caja es el percentil del 25% y el límite superior es el percentil del 75%; estos percentiles (llamados algunas veces Tukey's Hinges), se calculan un poco diferente de los percentiles ordinarios.

Estos diagramas son particularmente útiles para comparar la distribución de los valores en diferentes grupos y para la definición de los "thresholds" ya que se basan en estadísticas cuyos valores no son afectados muy fuertemente por valores erráticos en los datos.

En total se analizaron 132 muestras de aljibes y 100 muestras de pozos, teniendo en cuenta los siguientes elementos: pH, Conductividad eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$), Alcalinidad, Color (N.T.U), Dureza (ppm), Na (ppm), K(ppm), Ca (ppm), Mg (ppm), Fe (ppm), Cl (ppm), SO_4 (ppm), HCO_3 (ppm).

6.4.1.1 Resultados del análisis univariado. Mediante representaciones estadísticas simples y el uso de diagramas de cajas se logró conocer la distribución espacial de las variables.

Figura 6.1. Esquema de un Diagrama de cajas (Boxplot).

En la tabla 6.4 se presenta un resumen de las principales estadísticas descriptivas, y en las Figuras Nos. 6.2 a 6.17 (en anexo) se presentan los diagrama de cajas para las variables analizadas, los cuales permiten comparar las distribuciones de los datos tanto en pozos como en aljibes; la Figura No. 6.18 presenta un resumen de estos diagramas de cajas.

De las estadísticas de la Tabla 6.4 y de los diagramas de cajas se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El agua de los pozos tiene mayor conductividad y mayor concentración en bicarbonatos, dureza total, sodio, calcio, magnesio, pH, hierro y turbiedad que la de los aljibes, pero su contenido en cloruros, potasio y color es menor.**

- Todos los parámetros, exceptuando el pH, presentan un gran rango de variación.**

Los valores anómalos para los elementos de interés se establecieron con base en el análisis de los diagramas de cajas y se graficaron mediante la utilización de mapas de isovalores (Figuras Nos. 6.19 a 6.22) o de tonos (Fig. No. 6.23 a 6.38, en anexo) para conocer su distribución espacial, con los siguientes resultados:

Figura 6.18, 19, 20, 21, 22

¡Error! Marcador no definido.

TABLA 6.4. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS ANALITICOS

PARAMETRO	V.MINIMO		V.MEDIO		V.MAXIMO		V.MAXIMO ANOMALO	
	P	A	P	A	P	A	P	A
pH	6.5	5.4	7.1	6.8	7.8	7.6		
DUREZA	32	6	257	200	500	460	758	867
CONDUCTIVID	99	53	904	573	1620	1220	3950	2930
SODIO	5.7	1.6	110	37	290	82	675	425
POTASIO	0.3	0.3	2.7	4.6	4.8	9.5	22	32
CALCIO	6.4	1.4	45	41	85	90	129	107
MAGNESIO	3.9	0.5	35	23.6	70	57	144	170
HIERRO	0.3	0.1	5	2.2	13.5	4	32	35
CLORUROS	5	5	50	60	60	150	496	670
SULFATOS	5	5	11	23		63	220	155
BICARBONATO	57	24	526	225	1050	500	1488	1013
COLOR	5	5	42	57	55	100		700
TURBIEDAD	5	5	55	55	60	55	3000	3000

P: Pozos
A: Aljibes

- La distribución espacial de la mayoría de los iones en solución en el agua subterránea muestra una tendencia de aumento en el sentido sur-norte y oriente- occidente, presentando las mayores concentraciones en los alrededores de Turbo y en el sector comprendido entre Turbo y Apartadó.

- Los mapas de isoconductividad e isocloruros en aljibes y pozos, Figuras Nos 6.19, 6.20,

6.21 y 6.22 muestran un aumento gradual de la conductividad y los cloruros en el sentido oriente - occidente y sur - norte.

- La conductividad aumenta en aljibes de 250 a 1800 uS/cm (Figura No. 6.19) y en pozos de 250 a 1600 uS/cm (Figura No. 6.20), y los cloruros en aljibes de 25 a 250 mg/L (Figura No. 6.21) y en pozos de 10 a 150 mg/L (Figura No. 6.22). Los mayores valores en conductividad y cloruros se encuentran en alrededores de Turbo.

- La representación espacial de las concentraciones anómalas de los iones Cl, SO₄, HCO₃, Ca, Na, Mg, en aljibes y pozos, indica que éstas se presentan en las captaciones de agua subterránea ubicadas en alrededores de Turbo y entre Turbo y Apartadó (Figuras 6.23, 6.24, 6.25 ,6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, 6.34. En anexo).

6.4.2 Análisis Estadístico Multivariado. Con el fin de analizar las relaciones entre los diferentes iones presentes en el agua, se utilizó la técnica de análisis multivariable conocida como ANALISIS FACTORIAL MODO R, la cual permite establecer asociaciones o grupos de variables que presentan un comportamiento similar, debido a que fueron posiblemente afectadas por un mismo tipo de proceso. Cada asociación de variables se denomina un factor y el nombre de dicho factor representa el proceso que causó dicha asociación.

En la utilización de ésta técnica, se obtienen diversos modelos, de los cuales se debe escoger

uno, cuyos factores sean realmente representativos para explicar los procesos que operan en el área.

Estos factores son representados finalmente en un mapa, para efectos de interpretación.

6.4.2.1 Resultados del análisis Multivariada. Previo al análisis de factores, y con base en el análisis univariado, se decidió realizar una transformación logarítmica de las variables con el fin de hacer su distribución lo mas cercana posible a una distribución Normal (Media casi igual a la mediana, asimetría (Skewness) igual a cero y curtosis igual a 3) esto es muy importante ya que la mayoría de los métodos multivariados tienen un mejor desempeño cuando los datos están normalmente distribuidos.

- ALJIBES

Para el análisis factorial se partió de la matriz general de correlación que se muestra en la Tabla 6.5 y los resultados de éste análisis se presentan en la Tabla 6.6.

De la Tabla 6.6 se observa que un modelo constituido por los tres primeros factores es suficiente para explicar un 95.6% (Columna 4) de la varianza total de los datos.

TABLA 6.5. MATRIZ DE CORRELACION GLOBAL MUESTRAS DE ALJIBES

	pH	Cond.	Alk.	Na	K	Ca	Mg	Fe	Cl	SO4	HCO3
pH	1.00	0.49	0.58	0.35	0.22	0.57	0.46	0.13	0.27	0.24	0.58
Cond.	0.49	1.00	0.88	0.86	0.38	0.83	0.94	0.27	0.80	0.60	0.88
Alk.	0.58	0.88	1.00	0.72	0.28	0.85	0.87	0.36	0.50	0.44	0.99
Na	0.35	0.86	0.72	1.00	0.37	0.56	0.78	0.27	0.77	0.52	0.73
K	0.22	0.38	0.28	0.38	1.00	0.18	0.32	0.31	0.44	0.32	0.28
Ca	0.57	0.83	0.85	0.56	0.18	1.00	0.80	0.11	0.54	0.52	0.85
Mg	0.46	0.94	0.87	0.78	0.32	0.80	1.00	0.31	0.73	0.61	0.88
Fe	0.13	0.27	0.36	0.27	0.31	0.11	0.31	1.00	0.15	0.04	0.36
Cl	0.27	0.79	0.50	0.78	0.44	0.54	0.73	0.15	1.00	0.60	0.50
SO4	0.24	0.60	0.44	0.52	0.32	0.52	0.61	0.04	0.60	1.00	0.44
HCO3	0.59	0.88	0.99	0.73	0.28	0.85	0.88	0.36	0.50	0.44	1.00

Cond: Conductividad Eléctrica; Alk: Alcalinidad

TABLA 6.6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FACTORES EN MUESTRAS DE ALJIBES

Factor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	78.1	78.1
2	10.8	88.9
3	6.7	95.6
4	2.6	98.2
5	1.4	99.7
6	.3	100.0
7	.0	100.0
8	.0	100.0
9	.0	100.0
10	.0	100.0
11	.0	100.0

En la Tabla 6.7, se presenta la matriz para el modelo de los tres factores seleccionado.

Con el fin de mejorar la interpretabilidad de este modelo, se realizó una rotación ortogonal de los factores usando el criterio Varimax (rotación buscando las direcciones de máxima varianza); los resultados del análisis se presentan en la Tabla 6.8.

En la Figura No.6.39 se presenta un gráfico de los dos primeros factores rotados los cuales en conjunto explican un 88.9% de la varianza de los datos. De este gráfico se pueden distinguir dos grupos de variables. El primer grupo (primer factor) está formado por Alcalinidad-HCO₃, Ca, Cond, Mg y pH. El segundo grupo (segundo factor) contiene las variables Cl, Na, SO₄ y K.

El primer factor rotado explica un 78.1% de la varianza total y el segundo factor rotado explica un 10.8% de la varianza total de los datos (tabla 6.6).

En el tercer grupo (tercer factor) la única variable que posee alto es el hierro y rotado explica un 6.7% de la varianza total de los datos.

Con el fin de analizar la continuidad espacial de los tres factores rotados, se calcularon sus semivariogramas, los cuales en términos generales mostraron dos tipos escalas de variabilidad espacial, una de carácter regional y la otra local.

figura 6.39

¡Error! Marcador no definido.

TABLA 6.7. MATRIZ DEL MODELO DE 3 FACTORES SIN ROTACIÓN ALJIBES

	Variable/Factor		
	1	2	3
pH	0.538066	-0.266903	-0.037382
Cond.	0.981398	0.089282	-0.047788
Alk.	0.933145	-0.344731	0.105520
Na	0.839186	0.269202	0.111764
K	0.389399	0.277249	0.287998
Ca	0.848418	-0.257063	-0.322854
Mg	0.945805	0.024685	-0.025366
Fe	0.305342	-0.043001	0.526072
Cl	0.751701	0.536080	-0.086001
SO4	0.596614	0.281688	-0.212023
HCO3	0.935911	-0.341217	0.097262

TABLA 6.8. MATRIZ DEL MODELO DE 3 FACTORES DESPUÉS DE UNA ROTACIÓN VARIMÁX MUESTRAS ALJIBES

	Variable/Factor		
	1	2	3
pH	0.5783211	0.1312793	0.1022763
Cond.	0.6809454	0.6761316	0.2292539
Alk.	0.8951557	0.2827364	0.3456726
Na	0.4297987	0.6940796	0.3503153
K	0.0573512	0.3896417	0.3953883
Ca	0.8561175	0.3871364	-0.0855414
Mg	0.6917872	0.6003541	0.2383397
Fe	0.1559995	0.0439099	0.5878528
Cl	0.2303991	0.8860906	0.1469440
SO4	0.3021583	0.6230670	-0.0271769
HCO3	0.8965009	0.2888261	0.3386504

En la Figura No. 6.40 se muestra el semivariograma para el factor 1 rotado, el cual presenta una alta continuidad espacial (Rango = 18 Km).

Considerando la asociación de variables de este factor (Alk, HCO₃, Ca, Cond y Mg) y su gran continuidad en el área, se puede concluir que éste se encuentra relacionado con procesos de carácter regional (sistema de flujo, características litológicas, mineralógicas de los acuíferos, etc.).

Un análisis estadístico de este factor, resumido en el diagrama de cajas de la Figura No.6.41, revela una distribución casi normal de los datos, sin la presencia de valores anómalos positivos (valores extremos).

En las figuras 6.42 y 6.43 se presenta la distribución espacial de este factor, donde los valores mas altos se hallan en las zonas de drenajes de los principales ríos, especialmente en el sector SW en los alrededores de Barranquillita, considerada una zona de inundación.

La asociación de variables en el factor 2 (Cl, Na, SO₄ y K) y la pequeña variación espacial de esta asociación, caracterizada por un semivariograma de un rango muy corto (Figura No. 6.44), refleja presumiblemente procesos que tienen un impacto de carácter local o puntual. La evolución de los iones puede estar influenciada tanto por actividades antrópicas, como

por procesos geológicos de carácter puntual.

figura 6.40, 6.41, 42, 43, 44

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

En la distribución espacial de este factor (Figuras Nos. 6.45 y 6.46) se observa que los valores mas altos se localizan en los alrededores de Turbo y del Golfo de Urabá; en cercanías de las poblaciones de Apartadó y Carepa, se presentan algunos valores altos, pero mas moderados (casi puntuales) lo cual podría explicarse por la presencia de fuentes de contaminación debidas a la actividad agrícola y el tipo de uso de la tierra.

La distribución estadística de este factor, caracterizada en el diagrama de cajas de la Figura No. 6.47, muestra una distribución muy uniforme (casi normal), sin la presencia de valores anómalos; no hay una evidencia de valores extremos en las variables que conforman dicho factor, que puedan manifestar la intrusión del agua marina.

De la matriz de factores (Tabla 6.8) y del gráfico de los pesos de los factores 1 y 2 (Figura No. 6.39) se observa que el Mg tiene un peso alto en ambos, lo cual indica que una gran parte de la variación del magnesio es de carácter regional asociada con el factor 1 (características geológicas), y otra parte de la variación (asociada al factor 2) es de carácter local, debida a fuentes de contaminación y el efecto de la cercanía al golfo.

El tercer factor está correlacionado básicamente con el hierro, por lo cual este factor representa la variabilidad de su contenido en la zona. La alta continuidad espacial del semivariograma (Figura No. 6.48), indica el carácter regional de esta variación, que puede estar reflejando las condiciones oxidantes y/o reductoras del ambiente.

Figura 6.45, 46, 47, 48

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

La distribución espacial de este factor Figuras Nos. 6.49 y 6.50, muestra valores altos de este factor a través de toda el área de estudio, con dos valores extremos en las cercanías del golfo; pero no presenta ningún modelo o patrón específico definido.

- POZOS

En la tabla 6.9 se presenta la matriz de correlación global, de la cual partió el análisis factorial. Al igual que en el caso de las muestras de aljibes y con base en el análisis univariado, se decidió efectuar la transformación logarítmica de los datos.

TABLA 6.9. MATRIZ DE CORRELACIÓN GLOBAL MUESTRAS DE POZOS

	pH	Cond.	Alk.	Na	K	Ca	Mg	Fe	Cl	SO4	HCO3
pH	1.00	0.21	0.34	0.21	-0.07	0.14	0.12	-0.27	-0.04	-0.09	0.34
Cond.	0.21	1.00	0.89	0.84	0.53	0.27	0.90	0.18	0.72	0.33	0.89
Alk.	0.34	0.89	1.00	0.83	0.48	0.35	0.88	0.16	0.47	0.08	1.00
Na	0.21	0.84	0.83	1.00	0.56	-0.13	0.74	0.09	0.58	0.15	0.83
K	-0.07	0.53	0.48	0.56	1.00	-0.03	0.50	0.21	0.43	0.09	0.48
Ca	0.14	0.27	0.35	-0.13	-0.03	1.00	0.42	0.06	0.00	0.10	0.35
Mg	0.12	0.90	0.88	0.74	0.50	0.42	1.00	0.23	0.61	0.29	0.88
Fe	-0.27	0.18	0.16	0.09	0.21	0.06	0.23	1.00	0.20	-0.07	0.16
Cl	-0.04	0.72	0.47	0.58	0.43	0.00	0.61	0.20	1.00	0.35	0.46
SO4	-0.09	0.33	0.08	0.15	0.09	0.10	0.29	-0.07	0.35	1.00	0.08
HCO3	0.34	0.89	1.00	0.83	0.48	0.35	0.88	0.16	0.46	0.08	1.00

Cond: Conductividad Eléctrica; Alk: Alkalinidad.

Figura 49, 50

¡Error! Marcador no definido.

Los resultados del análisis de factores se presentan en la Tabla 6.10, en la cual se observa que un modelo de 3 factores es suficiente para explicar el 91.9 % de la varianza total de los datos.

En la Tabla 6.11 se presenta la matriz de factores obtenida después de realizar una rotación ortogonal de los factores por el método Varimax, y en la Figura No.6.51 se presenta un gráfico de los dos primeros factores rotados.

TABLA 6.10. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FACTORES EN MUESTRAS DE POZOS.

Factor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	67.1	67.1
2	14.1	81.2
3	10.7	91.9
4	6.8	98.7
5	1.3	99.7
6	.0	100.0
7	.0	100.0
8	.0	100.0
9	.0	100.0
10	.0	100.0
11	.0	100.0

figura 6.51

¡Error! Marcador no definido.

El primer factor explica un 67.1% de la varianza total en el juego de datos, esta conformado por las variables HCO₃, Alk.(alcalinidad), Cond (Conductividad eléctrica), Na, Mg, Cl y K.

La distribución espacial de este factor (Figuras Nos. 6.52 y 6.53) presenta una tendencia ascendente en dirección NW-SE, con los valores mas altos (extremos) en los alrededores de Turbo y el golfo.

TABLA 6.11. MATRIZ DE FACTORES ROTADA EN MUESTRAS DE POZOS

VARIABLE/FACTOR	1	2	3
Cond.	0.8903	0.3552	0.1835
pH	0.3170	-0.4496	0.1512
Alk.	0.9579	-0.0127	0.2831
Na	0.9394	0.1182	-0.2358
K	0.5208	0.2931	-0.1146
Ca	0.0995	0.0445	0.8853
Mg	0.8048	0.3693	0.3529
Fe	0.1113	0.2986	0.0254
Cl	0.5402	0.5901	-0.0817
SO ₄	0.0957	0.4779	0.0968
HCO ₃	0.9581	-0.0126	0.2829

El semivariograma (Figura No. 6.54) muestra una gran continuidad espacial (aprox. 25 km) lo cual indica un comportamiento determinado por las condiciones hidrogeológicas regionales.

figura 6.52, 6.53, 54

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

Un análisis estadístico de este factor representado en el diagrama de cajas de la Figura No. 6.55, presenta una distribución muy uniforme de este factor con ausencia de valores extremos positivos.

El factor 2 explica un 14.1% de la variación total de los datos y está caracterizado básicamente por la asociación Cl - SO₄. Su estructura de variabilidad espacial caracterizada por el variograma de la Figura No. 6.56 no es muy clara; la distribución espacial (Figuras Nos. 6.57 y 6.58) presenta una marcada concentración en la zona del golfo.

El factor 3 explica un 10.7% de la variación total de la varianza y está correlacionado básicamente con el Calcio. La continuidad espacial de este factor, caracterizada por el semivariograma de la Figura No. 6.59, refleja una estructura de un rango mas bien local (4 Km) y su distribución espacial (Figuras Nos 6.60 y 6.61), presenta valores extremos en los alrededores de las zonas mas pobladas.

6.4 INTERPRETACION DE RESULTADOS

La presencia y concentración de los principales iones en el agua subterránea de la región de Urabá está determinada básicamente por los siguientes elementos y procesos:

figura 6.55, 6.56, 57, 58, 59, 60, 61

¡Error! Marcador no definido.

1- Sistema de flujo y tiempo de permanencia de las aguas subterráneas.

- El sentido del flujo regional en términos generales es en dirección al golfo de Urabá; presentando para la unidad T2 dos depresiones, una al nor-oeste de Carepa y otra al norte de Apartado.

- La principal zona de recarga de la unidad T2 se encuentra ubicada al sur de Carepa hasta Barranquillita; para los Depósitos Cuaternarios es toda el área plana, diferenciándose probablemente en su magnitud, por la intensidad de la precipitación la cual aumenta desde Turbo (2600mm/año) hacia Barranquillita (3300mm/año). Al ser menor la precipitación media, la recarga por agua de lluvia del acuífero superficial será menor y por lo tanto será también menor el proceso de dilución.

- La permeabilidad de la Unidad T2 disminuye, en términos generales, hacia el norte de Chigorodó (19 m/día) presentándose los valores mas bajos en los alrededores de Turbo (2-3 m/día).

Por lo anterior se puede concluir que en el sector comprendido entre Apartadó y Turbo (y en general en cercanía al golfo de Urabá) el agua subterránea ha tenido un mayor tiempo de residencia y por lo tanto una mayor interacción con la roca, permitiendo así una mayor disolución de los minerales de las rocas.

2- Por su cercanía a la línea de costa es mayor la influencia en el agua subterránea de los aerosoles marinos y del agua lluvia con aportes marinos.

3- Al entrar el agua en contacto con los minerales que conforman las Unidad T2 y los Depósitos Cuaternarios como cuarzo, feldespatos, fragmentos de rocas volcánicas y sedimentarias, muscovita, circón y minerales opacos, con matriz arcillosa y ocasionalmente con cemento calcáreo, adquiere los iones HCO_3 , Ca, Mg, Na, K y Fe en solución, de acuerdo con las siguientes reacciones:

- Reacciones de meteorización

Meteorización de materiales de origen volcánico:



Meteorización de silicatos primarios :



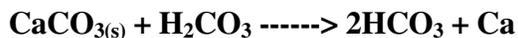
Donde X puede ser Ca, Mg, Na, K, Fe o sus combinaciones.

En las reacciones de meteorización el anión dominante es HCO_3 acompañado de pequeñas cantidades de SO_4 y Cl . El CO_2 juega un papel muy importante en las reacciones de meteorización; cuando proviene de la atmósfera es usado en la meteorización de los silicatos y la concentración de HCO_3 es muy baja (generalmente del orden de 0.61 mg/L).

Si proviene del suelo, donde la presión parcial del CO_2 es mayor unas 100 o 1000 veces que en la atmósfera, el contenido de HCO_3 puede estar entre 6 y 600 mg/L, como resultado de la siguiente reacción:



- Reacciones con materiales carbonatados



4- El potencial redox en la mayoría de las aguas subterráneas es reductor, con un pH neutro a ligeramente alcalino, condiciones en las cuales el agua puede tener cantidades apreciables de Fe^{++} . Cualquier cambio en el potencial redox permite una precipitación del Fe y por lo tanto la disminución de su contenido en el agua.

En las muestras de agua analizadas la concentración de Fe varía de 0.1 a 35 mg/l, su origen es el resultado de la disolución de los minerales de hierro presentes bajo diferentes condiciones, oxidantes o reductoras.

5- Intrusión marina. Con el fin de determinar si había una influencia de la cuña marina sobre el agua subterránea se calcularon las relaciones interparamétricas Cl/ HCO₃ y Mg/Ca, que tienen valores muy característicos en aguas continentales y aguas marinas, como se mencionó anteriormente.

El cálculo de éstas relaciones en aljibes con profundidad hasta 10 m y en pozos de 25 a 160m de profundidad, dan valores característicos de aguas continentales, como puede verse en la Tabla 6.12, donde se presentan los valores encontrados en el 25, 50 y 75% de las muestras, los cuales indican que no existe una clara influencia del agua de mar sobre las aguas subterráneas en ninguno de los puntos muestreados.

TABLA 6.12. VALORES DE PARAMETROS INDICADORES DE INTRUSION MARINA EN LAS AGUAS SUBTERRANEAS

PARAMETRO	Cl/ HCO ₃			Mg/ Ca		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%
ALJIBES	0.150	0.445	0.550	0.54	0.912	1.05
POZOS	0.040	0.148	0.130	0.760	1.507	1.850

La identificación de asociaciones, tanto para los Depósitos Cuaternarios como para la Unidad T2, permitió concluir lo siguiente:

ALJIBES

- **La primer asociación esta constituida por Alcalinidad-HCO₃, Ca, Cond, Mg y pH, su continuidad y correlación espacial es muy grande (aprox. 18km) lo que hace pensar que esta determinada por las características hidrogeológicas regionales. La disolución del material calcáreo de los acuíferos es el principal mecanismo que influye en el comportamiento del Ca, HCO₃ y la Alcalinidad.**

Las concentraciones mas altas se encuentran cerca a Barranquillita probablemente asociadas con zonas de inundación.

- **La asociación conformada por Cl, Na, SO₄ y K, presenta una continuidad de tipo local (hasta 4km); no presenta valores anómalos y las mayores concentraciones se encuentran alrededor del golfo de Urabá; esto puede estar asociado a aportes provenientes de aerosoles marinos así como a procesos de evapotranspiración que se realizan en el nivel freático (en la zona alrededor del golfo se encuentra a menor profundidad el nivel freático y se calcularon los mayores valores de ETP).**

También esta asociación puede estar afectada por aportes provenientes de la actividad agrícola e industrial de la zona.

- **El tercer factor, que representa los contenidos de Fe en el agua subterránea, presenta valores muy altos en toda la región siendo los mas mayores en cercanías de Turbo, esto se explica debido al pH el cual se encuentra entre un rango de 5.4 a 7.6 y la presencia de un ambiente reductor en toda el área.**

POZOS

- **La asociación conformada por Alcalinidad-HCO₃, Na, Cond, Mg, Cl y K tiene una alta continuidad espacial (mas de 25km) y no presenta valores anómalos. El incremento de sus concentraciones se presenta en el sentido del flujo regional y esta asociados los diferentes procesos de dilución e intercambio iónico entre el agua y el medio poroso.**

- **El segundo factor que representa al Cl y SO₄ presenta valores altos entre las poblaciones de Barranquillita y Chigorodó, en cercanías de Carepa, al norte de Apartadó y en los alrededores de Turbo (siendo éstos los mayores). La presencia y concentración de estos elementos no tiene una clara explicación, aunque podría deberse a procesos de contaminación antrópica.**

- El comportamiento del ion Ca (tercer factor), presenta un comportamiento de tipo local (correlación hasta 4km) con concentraciones altas entre Chigorodó y Carepa, alrededor de Apartado y al este de Turbo. Debido a que no hay asociación de este catión con ninguno de los iones analizados es difícil dar una explicación de estas concentraciones.

En cuanto al color y la turbiedad sus altas concentraciones tanto en aljibes como en pozos se debe entre otras causas a la presencia del hierro, el cual en condiciones oxidantes se precipita dando mayor color y turbiedad al agua. En los aljibes y algunos pozos la mayor turbiedad y color del agua, también puede estar asociada a una deficiente construcción y falta de mantenimiento de las obras de captación.

6.5. CLASIFICACION FISICO-QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA

6.5.1 Clasificación Geoquímica. La determinación de los iones dominantes en al agua subterránea se hace mediante su clasificación geoquímica, con base en los iones dominantes. Las aguas provenientes de los Depósitos Cuaternarios y de los Conjuntos B y C de la Unidad T2 presentan una mayor proporción del ión HCO_3 y en algunos casos de Cl, y de los cationes Ca, Mg y Na y por lo tanto se clasifica como $\text{HCO}_3\text{-NaCaMg}$, $\text{HCO}_3\text{-CaMgNa}$, $\text{HCO}_3\text{-MgNaCa}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Mg}$, $\text{ClHCO}_3\text{-Na}$ o Fe-Na.

La mayor proporción de cada uno de los cationes Ca, Mg o Na en el agua es controlada por los procesos de intercambio catiónico, que se presentan en aquellos materiales que tienen una gran capacidad de adsorción tales como las arcillas. La proporción de K es relativamente pequeña en el agua porque tiende a ser retenido irreversiblemente en ellas.

6.5.2 Clasificación del agua para consumo humano. La calidad físico-química del agua subterránea para consumo humano se determina con base en los parámetros contemplados en el Decreto 2105 del Ministerio de Salud, que reglamenta las normas y criterios que debe tener un agua potable.

En el área de estudio el agua subterránea de mejor calidad en cuanto a potabilidad se encuentra en los aljibes y pozos ubicados en alrededores de Barranquillita que cumplen, a excepción de la turbiedad, los requisitos físico-químicos para agua potable.

En el resto del área casi todas las aguas subterráneas se clasifican físico-químicamente como no potables, porque los parámetros turbiedad, color, dureza y hierro tienen concentraciones superiores a las establecidas en el Decreto mencionado. Estos parámetros no representan un peligro para la salud pero no son aceptados por sus consumidores por razones estéticas.

El principal problema que tienen las aguas con éstas características es de tipo económico

(obstrucción de tuberías y filtros de pozos causada por la precipitación de CaCO_3 y de óxidos de hierro). Las aguas duras (dureza como CaCO_3 mayor de 180 mg/l) cortan el jabón y aumentan el tiempo de cocción de algunos alimentos; las altas concentraciones de hierro dan al agua sabor astringente y producen manchas.

La turbiedad, el color, el hierro y la dureza pueden ser removidos y disminuida su concentración hasta los valores recomendados para agua potable, por medio de un tratamiento primario, consistente en filtración, coagulación química y sedimentación. Si con éste tratamiento el hierro tiene concentración superior a 0.3 mg/l es necesario oxidarlo (torre de aireación) para que se precipite.

A continuación se presentan las variaciones en la concentración de los parámetros que no cumplen con los requerimientos para agua potable.

- Turbiedad. El valor recomendado para agua potable es de 1 a 5 mg como SiO_2 . Solamente un 25% de las muestras analizadas en aljibes y pozos tiene valores de turbiedad menores de 5 N.T.U; un 50% tiene valores inferiores a 55 N.T.U; un 75% en aljibes tiene valores inferiores a 30 N.T.U y de 15 N.T.U en pozos.

Las muestras de agua que tienen un contenido de turbiedad menor de 5 N.T.U, están

relacionadas con los aljibes ubicados cerca al piedemonte, como se puede observar en la **Figura No. 6.62.**

- **Color.** El valor recomendado para agua potable es 5-15 unid. Pt-Co. Solamente un 25% de las muestras analizadas presenta concentraciones menores de 5; un 50% valores menores de 50; un 75% en aljibes tiene valores menores de 50 y de 30 en pozos.

La distribución espacial del color en aljibes y pozos, Figs 6.63 y 6.64, muestran que las aguas que tienen un contenido de color menor de 5, corresponden a las captaciones ubicadas en los alrededores de Barranquillita.

- **Dureza Total.** El valor recomendado para agua potable es de 30 - 150 mg/l como CaCO₃. Un 25% de las muestras presenta valores inferiores a 104 en aljibes y a 176 en pozos; un 50% de las muestras de aljibes tiene valores menores de 200 y de 257 en pozos; un 75% de las muestras de aljibes presentan valores inferiores a 258 y de 308 en pozos.

La variación espacial del contenido de dureza se presenta en las Figuras Nos. 6.65 y 6.66, donde en los sectores comprendidos entre Apartadó y Turbo y el ubicado al sur-occidente de Carepa, el agua subterránea presenta valores superiores a 180 mg/l, considerándose no apta para consumo humano.

figura 6.62, 63, 64, 65, 66

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

- **Hierro Total**, el valor recomendado para agua potable es de 0.3 mg/l como Fe. Solamente un 25% de las muestras tiene valores inferiores a 0.3 en aljibes y de 1.9 en pozos; un 50% con valores menores de 2.2 en aljibes y de 5.1 en pozos; un 75% con contenidos inferiores a 1.9 en aljibes y de 6.5 en pozos.

La variación espacial de las concentraciones de hierro en aljibes y pozos se presentan en las Figs. 6.67 y 6.68 , donde se observa que agua potable por su contenido en hierro inferior 0.3 mg/l se presenta en los aljibes ubicados al sur de Barranquillita y algunos pozos en alrededores de Barranquillita y Chigorodó.

6.5.3 Clasificación del agua para riego. Los criterios empleados para determinar la calidad del agua para irrigación parten de una serie de índices empíricos, que han sido establecidos basados en experiencia de campo y experimentos.

Para el presente estudio se toma la clasificación adoptada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, basada en la conductividad eléctrica y "S" (RAS), Figura No. 6.69. Con base en éstos criterios el agua subterránea en el área de estudio se clasifica para riego como:

C3S1, C3S2 y C4S1 en los aljibes ubicados al sur de Turbo y en los pozos en el sector del Golfo de Urabá y como C1S1 y C2S2 en los aljibes y pozos del resto del área.

figuras 6.67, 68, 69

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

Con aguas del tipo C1S1 se pueden regar la mayoría de los suelos y cultivos sin temor a perjuicios salinos y en el desarrollo del vegetal.

Aguas del tipo C3S1 requieren de suelos muy bien drenados y a veces utilizar prácticas que permitan controlar la salinidad y solo deben cultivarse plantas muy resistentes a las sales.

Aguas de tipo C4S1 se pueden utilizar para riego en condiciones muy especiales, los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado y en cultivos altamente tolerantes.

Aguas de tipo C2S2 pueden ser empleadas en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos con buena permeabilidad, exigen un grado moderado de lavado y cultivos de moderada tolerancia a las sales. Aguas de tipo C3S2 requieren de suelos muy bien drenados y a veces utilizar prácticas que permitan controlar la salinidad, pueden ser empleadas en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos con buena permeabilidad.

7. HIDROGEOLOGIA

Para un óptimo aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo es indispensable comprender el comportamiento hidrogeológico del área mediante la estructuración de un modelo conceptual en el que se integren los diferentes aspectos que determinan la presencia, el flujo y la calidad del agua subterránea; para ello se debe establecer tanto los componentes físicos, químicos y geométricos así como el comportamiento y las acciones externas que condicionan los diferentes sistemas acuíferos.

Para su estudio y comprensión, se clasifican los diferentes tipos de rocas en unidades hidrogeológicas de acuerdo a su capacidad de almacenar y transmitir agua así como de su calidad físico-química.

Dicha clasificación se realizó siguiendo las normas propuestas por la UNESCO para la elaboración de mapas hidrogeológicos (UNESCO, 1988; UNESCO, 1983).

7.1 METODOLOGIA

Con el fin de elaborar el modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio se compiló a escala 1: 50.000, toda la información geológica, geofísica, inventario de puntos de agua,

hidroquímica, pruebas de bombeo, monitoreo de los niveles estáticos y evaluación hidroclimatológica obtenida en las diferentes etapas del proyecto.

Para la clasificación hidrogeológica de las diferentes unidades geológicas se tuvieron en cuenta entre otros los siguientes aspectos:

- **Características geológicas (litología, granulometría, aspectos estructurales, espesores, etc.) de las diferentes formaciones del área.**
- **Características geofísicas de las rocas (valores de resistividad eléctrica y su variación).**
- **Distribución espacial de las rocas tanto en superficie como en profundidad.**
- **Calidad del agua subterránea.**
- **Propiedades hidráulicas de las rocas.**
- **Recarga por precipitación.**

Para cada una de las unidades hidrogeológicas de importancia se describe el modelo conceptual, con base en la información recopilada y analizada durante el proyecto.

La recarga real se evaluó siguiendo la metodología expuesta en Rushton, K. R. et al 1988), con base el cálculo de la recarga potencial por precipitación para el año medio (Capítulo 2), y un factor que varía entre 1 y 0.02 establecido según las características de la capa subyacente al suelo (Figura No.7.1).

No se evaluó la recarga proveniente de cuerpos de agua superficiales, ni la proveniente de otras cuencas o acuíferos fuera del área de estudio.

La descarga se evaluó con base en la información obtenida con el inventario de puntos de agua y la suministrada por AUGURA, respecto al número de fincas bananeras que utilizan aguas subterráneas. No se consideró en el cálculo la descarga debida a aljibes y manantiales ni la relacionada con flujo base de fuentes superficiales ni por aportes a otras cuencas por carecer de la información necesaria.

Para el cálculo de las reservas totales se consideró tan solo el agua almacenada y extraíble de los poros de la roca hasta la profundidad de investigación alcanzada con la geoelectrica ejecutada en el proyecto (aproximadamente 250m de profundidad); para ello se utilizó el valor de la porosidad efectiva y el espesor saturado en cada acuífero calculado con base en las columnas estratigráficas, datos geofísicos y columnas de pozos de cada una de las Figura

7.1

unidades hidrogeológicas de importancia. El volumen almacenado por efecto de elasticidad de la roca no se tuvo en cuenta por ser de un valor muy inferior al anterior.

7.2 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

Los diferentes tipos de rocas presentes en el área de estudio se clasificaron en dos grupos, de la siguiente forma:

- A Rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa grande y pequeña. Dentro de este grupo se encuentran las unidades geológicas Depósitos de Llanura Aluvial (Qal) y los conjuntos B y C de la unidad T2.**

- B Rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula. En este grupo se encuentran las unidades geológicas Terrazas Aluviales (Qt), el conjunto A de la unidad T2 y la unidad T1.**

En las Planchas Nos. 7.1 a 7.5, se presenta el Mapa Hidrogeológico de la región, donde se resumen las principales características de cada una de las unidades hidrogeológicas. Los cortes hidrogeológicos se presentan en bolsillo. A continuación se describen las características de cada una de estas unidades.

7.2.1 Rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa grande a pequeña. Dentro de este grupo se encuentran acuíferos de extensión regional o regional limitada, libres y/o confinados, de permeabilidad variable, la calidad química de las aguas es generalmente buena para consumo humano y riego. Pueden presentar aguas salinizadas en ciertos trechos someros o profundos.

Estos acuíferos están constituidos por sedimentos clásticos no consolidados y/o consolidados que conforman acuíferos multicapas.

7.2.1.1 Depósitos de Llanura Aluvial (Qal). Se extiende en toda la parte plana del área ocupando las zonas mas bajas comprendidas entre el piedemonte de la Serranía de Abibe y la zona costera, ocupando un área de 1.714 Km². Sobre esta unidad se encuentran ubicadas las principales poblaciones de la región (Arboletes, San Juan de Urabá, Necoclí, Turbo, Apartadó, Carepa y Chigorodó); así como la mayor parte de la actividad económica del área.

Lateralmente esta unidad se encuentra limitada en el piedemonte por la Unidad T1 desde el municipio de Turbo hasta Arboletes; y al sur del municipio de Turbo por el Conjunto C de la unidad T2. En profundidad cubre discordantemente las rocas de edad terciarias T1 (al norte de Turbo) y T2 al sur del mismo municipio. (Planchas Nos. 7.1 a 7.5).

Esta unidad constituye el acuífero más superficial del área. Está compuesto por intercalaciones de espesor variable, de arcillas color café, arcilla plástica con poco contenido de arena y arena fina a gruesa (ocasionalmente gravas), con matriz arcillosa. En la zona entre Turbo y el Río Juradó el espesor del acuífero se encuentra entre 5 y 45 m, disminuyendo progresivamente de sur a norte. (Plancha No. 7.6).

Los mayores espesores se encuentran especialmente en la cuenca del Río León y en menor proporción en la cuenca de los ríos Chigorodó, Carepa, Currulao, Guadualito y Turbo en sus respectivas áreas de salida hacia la llanura aluvial. De esta manera los espesores van disminuyendo a medida que el curso de los ríos avanza hacia el Golfo así: para el río León, de sur a norte y para los demás ríos mencionados, de este a oeste.

Los espesores entre 5 y 15 m se presentan principalmente en el municipio de Apartadó y al norte en los municipios de Turbo y Guadualito.

Los espesores menores de 5 m se concentran hacia el sector del golfo propiamente dicho, así como en cercanía a la zona montañosa en forma paralela al contacto entre los sedimentos de Cuaternario y las rocas del Terciario. También hacia la parte occidental del área como en Nueva Colonia, Maderas del Darién y occidente de las bananeras.

En la zona comprendida entre Necoclí y Arboletes los depósitos cuaternarios tienen espesores que varían desde 10 m (en las zonas de Arboletes - San Juan de Urabá y en regiones al norte de Necoclí (Figura No. 5.16, en bolsillo), hasta espesores de 70m, en la región de Damaquiel hasta el oriente de El Uvero, con muy buenas posibilidades acuíferas (Figuras 5.20 al 5.22, en bolsillo).

Cabe destacar la zona Meyitos - Mulatos donde se hallan depósitos cuaternarios antiguos del río Mulatos (Figuras 5.19 y 5.23, en bolsillo) con espesores mayores de 80m, y muy buenas posibilidades acuíferas.

Los valores de resistividad eléctrica de esta unidad varían entre 17 y 30 Ohm.m; hacia el Golfo de Urabá se presenta una disminución, con valores menores de 4 Ohm.m, que pueden estar asociados a la cercanía de la zona de interfase agua dulce - agua salada, como puede observarse en los cortes geoelectricos 2 - 2' y 3 - 3' (Figuras 5.4 y 5.5) y en el mapa de isorresistividad a 10 m de profundidad (Figura No. 5.11).

En la zona Necoclí - Arboletes se presentan depósitos cuaternarios con valores de resistividad eléctrica de 20 a 50 Ohm.m.

El agua presenta una conductividad eléctrica que varía entre 266 y 1060 uS/cm, con una tendencia ascendente en dirección NW. Los principales iones que se encuentran en las

aguas de este acuífero son los siguientes HCO_3 , Cl, Ca, Mg, y Na; clasificándose como $\text{HCO}_3\text{-NaCaMg}$, $\text{HCO}_3\text{-CaMgNa}$, $\text{HCO}_3\text{-MgNaCa}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ o $\text{ClHCO}_3\text{-Na}$. Presentan valores altos en color (hasta 100 unid. Pt.Co), turbiedad (hasta 55 N.T.U.) y hierro (hasta 4 ppm).

El sistema de flujo en los acuíferos cuaternarios presenta una tendencia desde la serranía hacia el occidente y hacia el Golfo de Urabá como puede observarse en los mapas de isoconcentración de cloruros e isolíneas de conductividad eléctrica (Figuras Nos 6.19 y 6.20), donde los valores menores se encuentran entre el límite sur del área de estudio y Barranquillita, los valores medios se ubican hacia el occidente del área y los mayores en cercanías al golfo. Esto muestra la tendencia del flujo de las aguas freáticas las cuales se enriquecen a medida que fluyen hacia el golfo.

La profundidad del nivel freático varía entre 0.5 a 6 m. Las características hidráulicas de esta unidad no se determinaron.

En esta unidad hidrogeológica están presentes los suelos denominados L1 (451 Km^2), L2 (898 Km^2), A1 (60 Km^2) y Ar (305 Km^2). (Plancha No. 2.5), los cuales presentan una recarga potencial media 177, 145, 138 y 52 mm/año respectivamente.

Con base en las características litológicas de esta unidad se estimó un factor de recarga de $k=0.8$, por lo que la recarga real por precipitación se estima para acuífero Qal, en términos generales del orden de 187 millones de $m^3/año$.

La descarga no natural del acuífero se produce básicamente a través de aljibes o pozos excavados (aproximadamente 362), con extracciones que rara vez llegan a los 3 l/s; siendo el método de explotación más común el de baldeo.

En la actualidad el recurso es utilizado básicamente para abastecimiento doméstico, satisfaciendo en gran medida las necesidades de abastecimiento de agua de una gran parte de la población tanto urbana como rural, ante la carencia de acueductos regionales y locales.

Según los valores RAS y de conductividad, el agua es apta para riego de la mayoría de suelos y cultivos (C1S1 y C3S1 y C4S1), o para suelos bien drenados con baja capacidad de intercambio catiónico (C2S2).

En cuanto a su potabilidad (en lo que respecta a los parámetros físico-químicos) en toda el área, a excepción de la zona del corregimiento de Barranquillita, los parámetros de hierro, turbiedad, color y dureza tienen concentraciones superiores para cumplir las

normas establecidas para tal fin, sin embargo estos valores pueden ser reducidos a concentraciones permitidas con métodos sencillos de tratamiento.

Como se mencionó antes, el aumento de los valores de resistividad eléctrica en cercanías del golfo de Urabá, no necesariamente indican presencia de una intrusión marina, sino que están relacionados con los diferentes procesos naturales que se suceden en las aguas subterráneas, así como a contaminación generada en gran medida por el deficiente sistema de disposición de residuos de los asentamientos humanos de la región.

Es muy importante tener presente que la intrusión salina no se da (en este tipo de depósitos) como un lente perfectamente definido, con límites claros si no que puede darse a través de pequeñas cuñas que ingresan por las capas con menor presión. Por esta razón es necesario realizar estudios más detallados que incluyan instalación de piezómetros, sondeos eléctricos y análisis de aguas a diferentes profundidades para establecer a que distancia puede estar la interfase agua dulce-salada y como se da la intrusión salina en estos acuíferos.

7.2.1.2 Unidad T2. La Unidad T2, aflora en la parte sur-oriental de la zona formando colinas de suave pendiente, con estructuras anticlinales y sinclinales, que continúan en profundidad hacia el occidente. El eje de estas estructuras tiene una dirección N - S y en profundidad presenta un cabeceo en sentido S - N.

Esta unidad está constituida por tres conjuntos (A, B y C), de los cuales solo los Conjuntos B y C son de importancia hidrogeológica.

A continuación se describirán en forma separada para cada uno de estos conjuntos, algunas de sus principales características hidrogeológicas; posteriormente de manera conjunta se presentarán los resultados de aquellos parámetros que por el tipo de muestreo desarrollado y por el sistema de captación de los pozos no permitieron caracterizar los conjuntos individualmente.

7.2.1.2.1 Conjunto C. Este conjunto aflora en superficie al sur-este del área de estudio (al sur del municipio de Turbo), formando una franja alargada en sentido S - NE, hasta los límites de la zona del proyecto.

En la zona de Turbo se encuentra limitada (al Este) por la falla de Apartadó, que la pone en contacto con la Unidad T1; desde el sur de Turbo y hasta un poco al Sur del Río Chigorodó se encuentra en contacto concordante con el Conjunto T2B; posteriormente está limitada por el Conjunto T2A, en contacto fallado hasta los límites de la zona de estudio. Hacia el oeste se encuentra en contacto discordante con la formación Qal. En profundidad se encuentra infrayaciendo la formación Qal y suprayaciendo el Conjunto T2B (Planchas Nos. 7.1 y 7.2).

Está compuesto por lodolitas de 1 a 2 m. de espesor, intercaladas con capas discontinuas de conglomerados en matriz arenosa y delgados paquetes discontinuos de areniscas friables, constituidas por cuarzo, chert, arcillolita, limolita y arenisca, también pueden presentar clastos de jaspe y en algunas ocasiones fragmentos de bivalvos.

El espesor de esta unidad en el área de estudio varía entre 10 y 80m, aumentando tanto de sur a norte como de oriente a occidente dando un indicio de una cuenca sedimentaria con cabeceo hacia el norte.

Las profundidades a las cuales se encuentra la base de esta unidad van desde unos 20 m en el sector de Barranquillita, hasta 75 m entre Turbo y Apartadó y entre 0 m en el contacto geológico aflorante, en la parte oriental del área, hasta 45 y 75 m en las partes suroccidental y noroccidental respectivamente. La Plancha No. 7.7 presenta el mapa del techo del conjunto T2B o base del conjunto T2C.

Los espesores de las capas arenosas varían desde algunos centímetros hasta 10 m, localmente presenta areniscas conglomeráticas en la base, con guijos de cuarzo, chert y roca volcánica en matriz arenosa de grano medio a grueso. En términos generales y con base en las columnas litológicas, los registros de pozos y los valores de resistividad determinados con la geoelectrica, se observa que el contenido arcilloso aumenta en dirección al Golfo de Urabá.

Este conjunto presenta valores de resistividad eléctrica entre 6 y 18 ohm.m, aunque se presentan valores muy bajos (1 a 3 ohm.m), en cercanías de la zona del Golfo de Urabá, como puede observarse en las Figuras Nos. 5.3, 5.4, 5.5, 5.7 y 5.9 (en bolsillo). Generalmente se presenta una tendencia ascendente hacia el sur (Fig.No.5.10, 5.12 y 5.13).

En este conjunto están presentes los suelos A2 (12.6 Km²) y A3 (129.6 Km²), los cuales presentan una recarga potencial media 71 y 553 mm/año, respectivamente. Con base en las características litológicas de esta unidad se estimo un factor de recarga $k= 0.4$. En términos generales la recarga real para el Conjunto T2C es del orden de 29.4 millones de m³/año.

La descarga no natural del acuífero se produce a través de pozos, sin embargo no es posible cuantificar la descarga exclusiva para este conjunto ya que todos los pozos que la captan extraen agua también del conjunto T2B. Por tal motivo la evaluación de la descarga se estima para los dos conjuntos.

7.2.1.2.2 Conjunto B. Este conjunto aflora en superficie en la zona sur-este del área de estudio, al sur del municipio de Turbo, formando una franja alargada en sentido S - NE, hasta los límites de la zona del proyecto. En superficie está limitada lateralmente en contacto fallado con la unidad T1, en la zona de El Tres - Turbo.

Al sur de Turbo y hasta los límites de la zona se encuentra en contacto con la formación T2A, este contacto generalmente es concordante a excepción de la zona al noreste de Chigorodó y hacia el final del afloramiento de la unidad, donde el contacto es fallado. En profundidad se encuentra infrayaciendo la formación Qal y suprayaciendo el conjunto T2B. (Planchas Nos. 7.1 y 7.2).

Está compuesto por capas de areniscas friables y conglomerados en una matriz arenosa, intercaladas con láminas delgadas de lodolitas. La frecuencia de aparición de areniscas y conglomerados aumenta en dirección hacia el sur.

Las profundidades a las cuales se encuentra el techo de dicha arenisca conglomerática van desde unos 20 m en el sector de Barranquillita, en la parte sur del área, hasta 75 m entre Turbo y Apartadó, y 0 m en el contacto geológico aflorante en la parte oriental del área; hasta 45 y 75 m en las partes suroccidental y noroccidental, respectivamente (Plancha No. 7.7).

Este conjunto presenta espesores entre 20 y 190 m. Los espesores mayores de 100 m se hallan en una franja con dirección NE-SW, desde Carepa y Chigorodó, hasta el sector occidental de Barranquillita al este del río León, constituyéndose en una cuenca sinclinal paralela al anticlinal de Chigorodó que aflora al oriente; también se encuentran al oeste de Currulao y este de Turbo, distribuido de manera irregular. (Plancha No. 7.8).

Los espesores entre 40 y 100 m se encuentran a manera de franjas NE-SW, en el sector de las bananeras y al oeste del corregimiento de Carepa. Así mismo, el oeste, oriente y sur del municipio de Apartadó, como también al oriente de Barranquillita. Estos constituyen pliegues menores, suaves, en esa dirección. En la parte de Turbo, Currulao y oeste de Currulao se presentan de manera irregular.

Los espesores menores de 40 m se presentan en franjas paralelas al anticlinal de Chigorodó, y al noroccidente de este municipio, constituyéndose en una especie de altos estructurales en profundidad que conforman el subsuelo de la zona plana. De acuerdo con esto, estas áreas serían de menor interés hidrogeológico comparado con las que presentan un mayor espesor.

Los espesores de las capas de areniscas conglomeráticas y conglomerados tienen espesores variables que llegan hasta los 40m; en términos generales el contenido arcilloso aumenta en dirección al Golfo de Urabá.

Este conjunto presenta valores de resistividad eléctrica entre 10 y 35 ohm.m, con una tendencia ascendente hacia el sur (Figuras Nos. 5.13 y 5.14).

En este conjunto están presentes los suelos denominados A2 (6.2 Km²) y A3 (80 Km²) . Los cuales presentan una recarga potencial media de 71 y 553 mm/año respectivamente. Con

base en las características litológicas de esta unidad se estimó un factor de recarga $k=0.7$, lo cual implica una recarga real para el conjunto T2B es del orden de 31.3 millones de $m^3/año$.

La descarga no natural del acuífero se produce básicamente a través pozos, sin embargo como se mencionó antes, la evaluación de ella se estima para los dos conjuntos T2C y T2B.

Para el cálculo de las reservas se consideró un valor de la porosidad eficaz de un 5%, un espesor saturado entre 10 y 85 m y un área de 1920 Km^2 , resultando un volumen almacenado extraíble aproximado de 3944 millones de m^3 .

Los datos obtenidos de la geofísica no indican valores bajos de resistividad, que puedan indicar cercanía de la interfase agua dulce-agua salada a excepción del SEV No. 15, que presenta valores de 5 Ohm.m por debajo de los 200m.

7.2.1.2.3 Calidad físico-química de los acuíferos de la unidad T2. Desde el punto de vista físico-químico las aguas de la unidad T2 son dulces a debilmente dulces, blandas a muy duras (60-180 ppm $CaCO_3$), con altos valores de color (hasta 55 unid. Pt-Co), turbiedad (hasta 60 N.T.U.) y hierro (hasta 13.5 ppm) y la misma clasificación geoquímica que la de las aguas del acuífero cuaternario.

7.2.1.2.4 Descarga de los acuíferos de la unidad T2. La descarga de estos acuíferos se da a

través de pozos, con un volumen aproximado de 57948 m³ diarios, donde el 65.2% de la descarga está concentrada en la zona entre Chigorodó y El Tres, donde se ha concentrado la actividad agrícola de la región, que es la que tiene el porcentaje mas alto de utilización del recurso (Tabla 4.3).

7.2.1.2.5 Características hidráulicas y condiciones de flujo de los acuíferos de la unidad T2.

El método mas práctico para obtener los parámetros hidráulicos representativos de los acuíferos es a través de ensayos de bombeo. Estos permiten evaluar según la duración, el tipo de prueba y el número y disposición de puntos de observación, la transmisividad del acuífero, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, presencia y situación de límites (barreras, fallas y líneas de recarga) y características propias del acuífero en relación a su entorno como son semiconfinamiento, recarga y drenaje diferido. Con las pruebas también se determinan parámetros relacionados al pozo como son la capacidad específica, eficiencia del pozo, curva característica, etc. (Custodio et al.,1983).

- Pruebas de Bombeo Realizadas

Dentro de este proyecto se realizaron 13 pruebas a caudal constante, con sus respectiva recuperación; con un tiempo de duración promedio de 360 minutos para el Bombeo y 180 minutos para la recuperación, con caudales que variaron entre 3 y 12 l/s.

La duración de las pruebas de bombeo ejecutadas se vió limitada en gran medida por las condiciones de seguridad y orden público de la región, y por la necesidad de abastecimiento de agua de los campamentos donde se realizaron algunas de ellas; sin embargo se obtuvieron curvas representativas para determinar los parámetros básicos como son la transmisividad, conductividad hidráulica y en algunos casos el coeficiente de almacenamiento.

También se analizaron e interpretaron 14 pruebas realizadas por compañías particulares que tuvieron una duración entre 400 y 600 minutos para el Bombeo y 200 minutos para la Recuperación, con caudales entre 5 y 80 l/s.

Las pruebas se analizaron a través del programa de computador GEOBASE, aplicando el método de Jacob, en régimen variable para los datos de bombeo (Custodio, 1983, Driscoll,1987), y el método de Theis (Custodio, 1983; Driscoll,1987), para las pruebas de recuperación. Todas las pruebas tanto realizadas durante el proyecto como las recopiladas se encuentran ubicadas en el sur- occidente del área de estudio, entre los municipios de Turbo y Chigorodó.

En ninguna de las pruebas se manifestaron condiciones de borde o límites, probablemente debido a su corta duración. La localización de los pozos con ensayos de bombeo se

presenta en la Plancha No. 7.9 y en la tabla 7.1 se presentan las características más importantes de dichos pozos.

- **Resultados Obtenidos Con Las Pruebas de Bombeo**

En términos generales las curvas analizadas presentan una tendencia rectilínea constante, típica de acuíferos extensos, confinados (Figura No. 7.2a). Ocasionalmente presentan variaciones en las pendientes producto de cambios laterales de permeabilidad y en algunos casos como en el pozo 90-IVA-18 cierta tendencia a la estabilización (Figura 7.3a).

Las curvas de recuperación tienen un comportamiento similar al de las pruebas de bombeo. Prolongando la parte rectilínea se observa, para un descenso residual s' igual a cero, un valor de $(T+t/t)$ entre 1 y 2 lo cual indica que durante el período de bombeo el acuífero se comportó como infinito y confinado, por lo tanto la recuperación de los niveles estáticos se dará generalmente a un tiempo muy similar al que duró el bombeo (Figuras Nos. 7.2b y 7.3b).

Los datos de las pruebas de bombeo y recuperación, lo mismo que las curvas obtenidas, para todos los pozos con ensayo, se presentan en el anexo No. 5.

Tabla 7.1, figura 7.2a b, 7.3a b,

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

Con los datos obtenidos en las pruebas de bombeo se calculó la transmisividad en 27 pozos obteniendo valores que variaron entre 57 m²/día (Pozo 79-IVD-40) y 501 m²/día (Pozo 90-IIC-13). A partir de estos datos se calculó la conductividad hidráulica promedio para el conjunto de capas acuíferas captadas por cada pozo, dividiendo el valor de ella entre la longitud de la zona filtrante.

Con estos valores se elaboró el mapa de isoconductividad hidráulica para los sistemas acuíferos T2C y T2B, de la zona sur del estudio (Plancha No. 7.9). Este mapa se realizó aplicando la técnica de Kriging, por medio del programa de computador GEOEAS, para analizar la variación espacial de este parámetro y graficado en el software SURFER for windows, versión 4.1.

Como puede observarse, la conductividad hidráulica varía entre 3 y 19 m/día presentando mayores valores al noroeste de Chigorodó; en general se observa una disminución en sentido S-N. Lo cual indica un aumento en el contenido arcilloso de la unidad en sentido S-N. Este hecho se corrobora con el análisis de los registros litológicos de los pozos donde se observa la disminución del contenido arcilloso, en las rocas, hacia el sur.

Los valores del coeficiente de almacenamiento solo se pudieron evaluar en tres pozos que contaban con puntos de observación, estos variaron entre 2×10^{-3} a 8×10^{-4} (Tabla 7.1), lo cual corresponde a valores para acuíferos confinados (Custodio, 1983).

Para los pozos en los cuales se realizaron pruebas de bombeo se calculó el valor de la capacidad específica la cual varía entre 0.3 l/s/m (pozo 79IVB45), con un abatimiento de 14.38m, un caudal de 4.34 l/s y una duración de la prueba de 535 minutos, y 4.68 l/s/m (pozo 90IIC13), con un abatimiento de 17.1m , para un caudal de 80 l/s y una duración de la prueba de 1440 minutos (Tabla No.7.1).

Esta capacidad, lo mismo que la profundidad a la cual se encuentran los niveles estáticos y dinámicos en el pozo, tienen gran incidencia en los costos de extracción del agua; razón por la cual es muy importante tener un control acerca de la variación de ellos con el tiempo.

En general puede concluirse que dentro de la zona del proyecto existe una tendencia a la disminución del valor de la permeabilidad de las rocas de la formación T2B y T2C en sentido sur - norte; esto se explica porque en la zona sur las capas acuíferas presentan contenidos menores de arcilla y/o aumento del tamaño del grano de las rocas.

El acuífero, a excepción en las zonas de afloramiento, se comporta como confinado de extensión regional y en ninguna de las pruebas realizadas se observaron pinchamientos o bordes de tipo impermeable o recarga.

- **Sistema De Flujo**

Con el fin de conocer las direcciones de flujo se diseño una red de monitoreo, la cual fue nivelada topográficamente, para realizar mediciones estacionales de los niveles estáticos. En total se realizaron tres mediciones en toda el área en 1994, en los meses de marzo, agosto y noviembre (Tabla No.4.3).

Con la información recopilada se elaboraron mapas de superficies piezométricas aplicando la técnica de Kriging, por medio del programa de computador GEOEAS, graficando en el paquete SURFER for Windows, para analizar la variación espacial de los niveles piezométricos (Figuras Nos. 7.4, 7.5 y 7.6). Como se observa las variaciones de los niveles entre los diferentes períodos no son notorias; en los tres mapas se observa una tendencia del flujo a nivel regional en sentido sur-norte, identificándose claramente tres zonas; una con los niveles piezométricos mas altos (38 m.s.n.m.) ubicada al sur de Chigorodó y que se extiende a lo largo del piedemonte, en un área con poca explotación del recurso.

Las otras dos zonas se manifiestan como depresiones una entre Turbo y Apartadó y la segunda al noroeste de Carepa, las cuales coinciden con zonas de alta densidad de pozos. El sentido del flujo subterráneo indica en forma clara la principal zona de recarga, la cual se extiende al sur de Apartado y que corresponde al área de afloramiento de las unidades T2B y T2C.

Fig 7.4, 7.5, 7.6

¡Error! Marcador no definido.

¡Error! Marcador no definido.

7.2.2 Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa muy Pequeña o Nula. Las terrazas y abanicos aluviales, se consideran sin importancia hidrogeológica debido a su limitada extensión y poco espesor.

La unidad T1, con 4310 m. de espesor total, se ha clasificado como sin importancia hidrogeológica, está compuesta por delgadas capas de arenisca con matriz arcillosa, interestratificada con lentes de conglomerados y sobre las cuales se encuentra un paquete de lodolitas.

El Conjunto A de la unidad T2, es considerada de poca importancia hidrogeológica, está conformado por areniscas de grano fino a medio en matriz arcillosa, en capas de 10 a 20 cm. de espesor, estratificadas con capas de lodolitas de 5 a 10 cm. de espesor.

7.3 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACION

El termino de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, 1987); sirve como base para la implementación de las políticas de protección de las aguas subterráneas y permite priorizar las medidas de control desde un punto de vista general, a fin de lograr una cobertura universal y evitar decisiones inconsistentes.

La vulnerabilidad es función de la inaccesibilidad de la zona saturada (en sentido hidráulico) a la penetración de contaminantes y de la capacidad de atenuación de la zona no saturada como resultado de su retención física y reacción química con los contaminantes.

Los mapas de vulnerabilidad conforman una base técnica de planeamiento para acciones de control y protección de la contaminación de las aguas subterráneas ya que permiten identificar, mediante la representación cartográfica, las diferentes áreas potencialmente críticas.

En general es mas conveniente evaluar la vulnerabilidad a contaminantes específicos, ya que en términos generales todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes no degradables; adicionalmente aquellos acuíferos que se consideran de menor vulnerabilidad son por lo general los mas difíciles de rehabilitar, una vez contaminados.

Por lo anterior, es necesario que los mapas de vulnerabilidad general sean siempre interpretados con precaución por personal capacitado en la materia.

Los componentes de la vulnerabilidad del acuífero interactúan con los correspondientes a la carga contaminante (tipo, forma de disposición, magnitud, movilidad, persistencia, etc.) determinando el tiempo de residencia en la zona no saturada y la demora de la llegada del

contaminante al acuífero, así como el grado de atenuación, retención o eliminación antes de llegar al agua subterránea.

Esta interacción con la carga contaminante ocasiona un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, que se define como la probabilidad que el acuífero (aunque no necesariamente una captación de agua) se contamine a niveles inaceptables (Foster, et.al., 1992).

7.3.1 Metodología. Para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos en el área de estudio se utilizo el método GOD desarrollado por el CEPIS (Foster, et. al., 1991).

El método se basa en la evaluación e indexación de tres parámetros básicos:

- La profundidad del nivel freático o techo del acuífero confinado.**
- Tipo de ocurrencia del agua subterránea.**
- Las características litológicas y grado de consolidación de los estratos encima de la zona saturada.**

En la Figura No.7.7 se ilustra el sistema de evaluación utilizado para hallar el índice de vulnerabilidad de los diferentes acuíferos presentes en el área de estudio, con base en lo cual se elaboró el Mapa de Vulnerabilidad de Contaminación.

figura 7.7

¡Error! Marcador no definido.

7.3.2 Mapa de Vulnerabilidad. La evaluación se realizó a escala 1:100.000 para el horizonte acuífero más somero de cada uno de los acuíferos presentes en la zona sur del área de estudio, según la metodología expuesta anteriormente y con base en la información de tipo regional recopilada durante el proyecto.

En esta evaluación se utilizaron las características promedio de los diferentes acuíferos, la principal dificultad radicó en la ausencia de datos sobre la profundidad del nivel freático en los acuíferos T1, T2A y Qt, para estos se asumió una profundidad entre 20-100, 5-20 y <5 respectivamente.

En cuanto al tipo de ocurrencia del agua subterránea se tomaron (con base en sus características geológicas) como semiconfinados los acuíferos de las formaciones T1, T2A y T2C, y no confinados cubiertos T2B, Qal y Qt.

En la Tabla No. 7.2 se observan los índices utilizados para cada uno y en la Plancha No. 7.10 el Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación.

Como resultado se identificaron tres zonas con vulnerabilidades que varían de muy baja a moderada. La primera, muy baja, se encuentra ubicada en la parte N-E del área relacionada con la formación T1, la segunda zona corresponde a baja vulnerabilidad y se encuentra ubicada al S-E sobre los afloramientos de la Formación T2A y T2C; el área

TABLA No. 7.2 EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD DE CONTAMINACION

ACUIFERO	INDICES			INDICE	VULNERABILIDAD
	OCURRENCIA	LITOLOGIA	DIST. AGUA		
Formación T1	0.3	0.5	0.5	0.08	MUY BAJA
Formación T2A	0.4	0.65	0.7	0.2	BAJA
Formación T2B	0.7	0.75	0.7	0.4	MODERADA
Formación T2C	0.4	0.55	0.7	0.15	BAJA
Formación Qt	0.6	0.6	0.9	0.32	BAJA-MODERADA
Formación Qal	0.6	0.6	0.9	0.32	BAJA-MODERADA

de vulnerabilidad moderada está ubicada en la parte oeste de la región, conformada por los acuíferos de los depósitos Cuaternarios y de la Formación T2B.

El área de mayor interés en cuanto a requerimiento de medidas de protección esta conformada, en la zona plana, por los acuíferos cuaternarios y los afloramientos de la Formación T2B; en estas zonas es necesario realizar un inventario y caracterización de fuentes potenciales de contaminación, evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y en aquellos lugares donde se presente alto riesgo, determinar el grado de contaminación de los acuíferos.

Adicionalmente es indispensable establecer zonas de protección para los pozos, aljibes y manantiales que sirven para abastecimiento público; se recomienda utilizar modelos de flujo estacionario que permitan definir sus áreas de captación.

A pesar de que durante el proyecto no se realizó el inventario de fuentes potenciales de contaminación en la región, se observó la existencia de diferentes tipos de ellas, tanto puntuales como dispersas, asociadas principalmente a saneamiento sin alcantarillado, uso de agroquímicos y disposición de residuos sólidos y líquidos.

7.4 PERSPECTIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Para la zona que se encuentra entre el municipio de Necoclí y el municipio de Arboletes, se identificaron los Depósitos Cuaternarios, como de moderadas condiciones para su aprovechamiento, localmente pueden alcanzar profundidades hasta 78m.

En la zona sur, localizada entre Turbo y Juradó, las mejores perspectivas de aprovechamiento las presentan los acuíferos de la Unidad T2, especialmente el conjunto B.

Con el fin de definir zonas con mayor potencial para el aprovechamiento del agua subterránea, se elaboró un mapa en donde se zonificó el acuífero T2B (Plancha No. 7.11); esta zonificación se elaboró teniendo en cuenta dos criterios:

- 1- La profundidad del techo del acuífero; entre 0 - 25m, 25 - 50m y 50 - 75m.**

2- El espesor del acuífero; mayor de 80m, entre 40-80m y 20 - 40m.

De esta manera se definieron zonas de muy alto, alto y moderado interés, constituidas por subzonas según la profundidad del techo del acuífero.

Dentro de este mapa se señalaron las zonas con mejor calidad de agua con base en las concentraciones de hierro (menores de 1 mg/l) y los valores de dureza (menores de 60 mg/l) recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Las áreas de mayor interés se encuentran ubicadas entre Carepa y Barranquillita, al sur de Apartadó, Norte de Currulao y al Este de Turbo. Cabe destacar que la zona entre Carepa y Barranquillita se tienen los valores mas altos de conductividad hidráulica y la menor densidad de pozos en explotación.

Las zonas de moderada importancia se encuentran principalmente al noroeste de Apartadó y en el extremo sur del area de estudio.

El acuífero cuaternario en la parte sur del área de estudio tiene buenas condiciones para el abastecimiento de agua a nivel doméstico, sin embargo, debido al deficiente servicio de alcantarillado, es posible que algunas zonas presenten contaminación bacteriológica, por lo que se hace indispensable adelantar estudios encaminados a evaluar esta problemática.

Desde el punto de vista fisico-químico, en general las aguas subterráneas pueden ser utilizadas para consumo humano, previo un tratamiento sencillo, como se discutió en el capítulo 6.

8. CONCLUSIONES

- **El área de estudio pertenece al piso térmico cálido (alturas hasta 1.000 m.s.n.m., temperatura media anual mayor de 24°C) con distinto grado de humedad, por lo cual se distinguen dos zonas: la primera corresponde a clima cálido semihúmedo y se extiende desde la costa del mar Caribe hasta el municipio de Chigorodó y la segunda con clima cálido húmedo se localiza en el extremo sur.**
- **En general el área de estudio presenta una alta pluviosidad, especialmente en la parte central y sur, donde la precipitación anual aumenta en el sentido noreste-suroeste desde 2.200 mm hasta llegar a valores mayores de 3.800 mm. La zona más seca se localiza en las partes altas de las cuencas de los ríos San Juan y Mulatos, con valores de precipitación menores a los 1.600 mm/año.**
- **La variación de la precipitación durante el año se determina como monomodal. Se observa una marcada temporada de escasez de las lluvias, que abarca el período de enero a marzo. El período húmedo se extiende de mayo a noviembre; los meses de abril y diciembre son considerados como de transición.**

- **En la region plana y semiplana (alturas menores de 50 m.s.n.m.) la ETP disminuye desde 1.300 hasta 1.000 mm/año. El gradiente vertical de la evapotranspiración potencial es bastante alto y disminuye con la altura. Su distribución durante el año es bastante uniforme, la máxima amplitud porcentual no supera 4.5% del total anual.**

- **Hidrológicamente el área del estudio esta compuesta por tres subcuencas; las cuencas de los ríos San Juan y Mulatos pertenecientes a la vertiente del mar Caribe presentan la esorrentía anual que va desde 200 mm hasta 800-1.000 mm y la cuenca del río León que desemboca en el Golfo de Urabá, muestra una esorrentía mayor (de 1.600 mm/año hasta 2.200 mm/año).**

- **La variación estacional de la esorrentía es determinada principalmente por la distribución de la precipitación, presentando un período húmedo y un período seco.**

- **A pesar de las condiciones climáticas con un déficit hídrico anual, en el área se presenta recarga (a nivel mensual) notándose diferencia según el tipo de suelo.**

- **Las características físicas del suelo y su composición influyen de manera muy marcada en la cantidad de agua infiltrada, aún bajo las condiciones hidrometeorológicas similares.**

- **La variación espacial de los parámetros climatológicos y de la escorrentía, hace que la recarga en el mismo grupo de suelo en varias zonas sea diferente.**
- **En el área afloran rocas sedimentarias del terciario y depósitos cuaternarios. Dentro del Terciario se identificaron dos unidades, una de ambiente de formación marino (Unidad T1) y otra de ambiente continental (Unidad T2), siendo mas joven la segunda.**

La Unidad T1 esta constituida por delgadas capas de areniscas de matriz arcillosa, interestratificada con lentes de conglomerados y sobre las cuales se encuentra un paquete de lodolitas. Su espesor promedio es aproximadamente 4310m.

La Unidad T2 debido a su importancia hidrogeológica se dividió en tres conjuntos:

Conjunto T2A, constituido por intercalaciones de lodolitas y areniscas de matriz arcillosa, con un espesor promedio de 165m.

Conjunto T2B, esta conformado por capas de areniscas y conglomerados con delgadas intercalaciones de arcillolitas y limolitas, su espesor varia en el área entre 20 y 210m.

Conjunto T2C, compuesto por intercalaciones de lodolitas y conglomerados en matriz arenosa, su espesor varia entre 20 y 115m.

El cuaternario lo conforman los depósitos de llanura aluvial y las terrazas. Los depósitos de llanura aluvial se extienden sobre toda la zona plana del área; estan contituidos por intercalaciones de arcilla, arcilla arenosa y arena fina a gruesa. Los espesores de estos sedimentos varia en tre 5 a 45m en el área de Turbo a Juradó y entre 10 a 80m en la zona comprendida Necocli y Arboletes.

Las terrazas estan compuestas por gravas dentro de una matiriz areno arcillosa, limos, arcillas y arenas conglomeráticas. Siendo de muy poca altura y extención.

- Desde el punto de vista estructural predominan las fallas de cabalgamiento con tendencias sur-norte, se destacan las fallas de Apartadó (pone en contacto la unidad T1 con T2), El Dos y El Aguila. Los principales pliegues presentes en la region son el de Chigorodo, Caiman y Tulapa con tendencia general sur-norte. Estos pliegues estan desarrollados sobre las unidades terciarias.

- El 47.4% de los puntos de agua inventariados corresponden a pozos los cuales se encuentran ubicados en su gran mayoría, entre los municipios de Turbo y Chigorodó;

estos pozos captan las unidades terciarias T2C y T2B; tienen profundidades entre 22 y 300 metros, aunque la profundidad del 72% de ellos se encuentra entre 60 y 100 m.

- Dentro del área plana de Urabá, comprendida entre Turbo y Juradó, se encontró una distribución de resistividades en profundidad de la siguiente manera:

Un grupo de valores de resistividad intermedios (10-100 Ohm.m) en la parte más cercana a la superficie: entre 5 y 45 m.

Un grupo de valores bajos de resistividad (2 - 15 Ohm.m) situado debajo de los anteriores y hasta una profundidad variable entre 20 y 70 m.

Otro grupo de valores intermedios de resistividad (10 - 50 Ohm.m) constituyendo la parte basal del estudio.

- La correlación de valores de resistividad, en perfiles, muestra que la unidad de valores intermedios se encuentra plegada en dirección Este-Oeste, profundizándose hacia el golfo a manera de cabeceo en dirección sur-norte.

- Los resultados obtenidos con la geoelectrica efectuada en la parte norte (entre

Necocli y Arboletes) permiten establecer lo siguiente:

En el sector comprendido entre Arboletes y Damaquiel.

En este existe penetración de la cuña salina en los depósitos cuaternarios tanto aluviales como marinos, que bordean la zona de colinas, conformando la terraza marina entre San Juan y Arboletes.

Se establece que en la planicie costera entre San Juan De Urabá y Damaquiel, existen depósitos aluviales saturados con agua de buena calidad y con posibilidad de ser aprovechada. La investigación realizada en esta planicie, muestra que no existe influencia de la cuña marina entre el Uvero y San Juan de Urabá

En el sector comprendido entre la localidad de Zapata y Necoclí:

Existen capas acuíferas con posibilidad de ser explotadas; estas alcanza su máxima profundidad en la localidad de Mulatos

Se presume la existencia de una discontinuidad litológica o fallamiento ya que se tiene una "cuenca" profunda que se ha rellenado con la sedimentación de los rios que drenan la zona.

La interpretación de los S.E.V. en este sector, permite establecer que existe una zona acuífera, la cual se profundiza hacia el sur-oeste hasta el sitio del sondeo 30.

En el sector de las ciénagas de Marimonda y El Salado:

Existe la posibilidad de tener dos zonas acuíferas bajo el sondeo 24, las cuales alcanzan profundidades entre 12 y 15 m, la primera y entre 30,0 y 53,2 m la segunda.

- **De acuerdo con los resultados analíticos las aguas subterráneas de los Depósitos Cuaternarios se caracterizan según su conductividad como muy dulces a moderadamente dulces ($266 < \text{conductividad} < 1060$ uSiemens/cm) y en las Unidades T2B y T2C como muy dulces a débilmente dulces ($266 < \text{conductividad} < 2130$ uSiemens/cm); por su dureza total (como CaCO_3) en ambos acuíferos como blanda a muy dura ($60 < \text{dureza} < 180$).**

- **El agua de los pozos tiene mayor concentración de bicarbonatos, sodio, calcio, magnesio, hierro y turbiedad que la de los aljibes, pero su contenido de cloruros, potasio y color es menor.**

La mayor concentración de estos iones se explica por el mayor tiempo de residencia del agua, permitiendo así una mayor interacción agua-roca y por lo tanto la disolución de los minerales presentes. El mayor contenido de cloruros y de potasio en los aljibes se puede deber a los procesos de evapotranspiración que se realizan en el nivel freático.

- Las aguas provenientes de los Depósitos Cuaternarios y de los Conjuntos B y C de la Unidad T2 presentan una mayor proporción del ión HCO_3 y en algunos casos de Cl, y de los cationes Ca, Mg y Na y por lo tanto se clasifica como HCO_3 - NaCaMg, HCO_3 -CaMgNa, HCO_3 -MgNaCa, HCO_3 -Na, HCO_3 -Ca, HCO_3 -Mg, ClHCO_3 -Na.

- La distribución espacial de la mayoría de los iones en solución en el agua subterránea muestra una tendencia de aumento en sentido sur-norte y oriente- occidente, presentando las mayores concentraciones en alrededores de Turbo y en el sector comprendido entre Turbo y Apartadó

- El calculo de las relación Cl/HCO_3 da valores menores de 0.55 y de la relación Mg/Ca valores menores de 1.85, los cuales son característicos de aguas continentales, indicando la no existencia de influencia del agua de mar sobre las aguas subterráneas, en los aljibes y pozos analizados.

- En el área de estudio el agua subterránea de mejor calidad físico-química, en cuanto a potabilidad, se encuentra en los aljibes y pozos ubicados en alrededores de Barranquillita. En el resto del área casi todas las aguas subterráneas se clasifican físic-químicamente como no potables, por los parámetros turbiedad, color, dureza y hierro los cuales tienen concentraciones superiores a las establecidas en el Decreto 2105 del Ministerio de Salud, que reglamenta los requisitos que debe cumplir un agua potable. Sin embargo mediante un tratamiento primario es posible reducir sus concentraciones hasta valores permisibles.

- Los diferentes tipos de rocas presentes en el área de estudio se clasificaron de acuerdo a su importancia hidrogeológica en dos grupos, de la siguiente forma:

Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa Grande y Pequeña.

Dentro de este grupo se encuentran las unidades geológicas Depositos de Llanura Aluvial (Qal) y los conjuntos B y C de la unidad T2.

Rocas Porosas con Importancia Hidrogeológica Relativa muy Pequeña o Nula. En este grupo se encuentran las unidades geológicas Terrazas Aluviales (Qt), el conjunto A de la unidad T2 y la unidad T1.

- **El conjunto T2B es el de mayor importancia hidrogeológica en el área, presentando excelentes condiciones para el aprovechamiento del agua subterránea**

Las áreas de mayor interés se encuentran ubicadas entre Carepa y Barranquillita, al sur de Apartadó, norte de Currulao y al este de Turba. Entre la zona de Carepa y Barranquillita se tienen los valores más altos de conductividad hidráulica y la menor densidad de pozos en explotación.

Las zonas de moderada importancia se encuentran al nor -oeste de Apartado y en el extremo sur del área.

- **El acuífero cuaternario presenta buenas condiciones para el abastecimiento de agua a nivel doméstico, sin embargo debido al deficiente sistema de disposición de aguas residuales es posible que algunas zonas presenten contaminación bacteriológica.**

- **Se diferenciaron tres zonas con vulnerabilidades que varían de muy baja a moderada, siendo la más susceptible a la contaminación la conformada por los acuíferos cuaternarios y los afloramientos del conjunto T2B.**

- **En la región existen diferentes tipos de cargas contaminantes que pueden alterar la calidad de las aguas subterráneas entre las que se cuenta el saneamiento sin alcantarillado,**

deficiente disposición de residuos y el uso intencivo de agroquímicos.

9. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en el estudio hidrogeológico se considera de gran importancia adelantar las siguientes acciones en forma prioritaria:

1. Implementar un sistema de control y seguimiento sobre las compañías de perforación de pozos en la región con el fin de lograr el cumplimiento de las normas de calidad y flujo de información técnica hacia la Corporación. Esto permitirá además llevar un registro actualizado de todas las perforaciones que se realicen en la jurisdicción de CORPOURABA y un control sobre el aprovechamiento del recurso.

2. Adelantar estudios encaminados a determinar la contaminación de los acuíferos tanto por intrusión salina como por actividades humanas. Se recomienda realizar el inventario y caracterización de fuentes potenciales de contaminación, evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y en aquellos lugares donde se presente alto riesgo, determinar el grado de contaminación de los acuíferos mediante la perforación de

piezómetros.

3. Es indispensable continuar con el monitoreo de niveles estáticos en la red diseñada y nivelada topograficamente durante el proyecto. Tambien es necesario incorporar nuevos puntos de medición, que involucren en lo posible puntos que capten solo un horizonte acuífera. Esto permitira iniciar la compilación de series históricas de datos que permitiran conocer las variaciones del almacenamiento, presisar la recarga y la incidencia de la explotación sobre el acuífero, entre otras.

4. Realizar un censo de pozos que permita cuantificar el volumen de descarga y llevar un control sobre el aprovechamiento del recurso.

5. Para mejorar el balance hídrico de la región es necesario mejorar y operar la red hidrometeorológica, complementando las estaciones de medición en aquellas áreas con deficiencia en información.

C O N T E N I D O

	Página
¡Error! Marcador no definido.	

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Población Urbana y Rural del Urabá Antioqueño.	11
Tabla 2.1 Estaciones Meteorológicas.	23
Tabla 2.2 Parametros Estadísticos de la Precipitación.	24
Tabla 2.3 Distribución Estacional de la Precipitación (% del Total Anual).	32
Tabla 2.4 Estaciones Climatológicas e Información Disponible.	36
Tabla 2.5 Resumen de la Información Climatológica Utilizada para el Cálculo de la ETP.	37

¡Error! Marcador no definido.

Tabla 2.6	Valores Anuales de la ETP (mm) y de Evaporación (mm).	39
Tabla 2.7	Distribución Estacional de la ETP (% del Total Anual).	43
Tabla 2.8	Estaciones Hidrométricas.	48
Tabla 2.9	Caudales Medios.	50
Tabla 2.10	Parámetros Estadísticos de la Escorrentía.	51
Tabla 2.11	Distribución Estacional de la Escorrentía (Factor de Distribución K).	54
Tabla 2.12	Caudales Mínimos y Flujo Base (% del Total Mensual).	61
Tabla 2.13	Constantes Físicas Resultantes para cada Grupo de Suelo (mm).	69
Tabla 2.14	Recarga Potencial (mm/año).	72
Tabla 4.1	Información Técnica Recopilada de Pozos en el Inventario de Puntos de Agua.	111
Tabla 4.2	Red de Puntos para Nivelación Topográfica y Niveles Estáticos de Marzo, Agosto y Noviembre de 1994.	114
Tabla 4.3	Utilización del Recurso Hídrico Subterráneo a Través de Pozos.	118
Tabla 5.1	Sondeos Eléctricos Verticales y Tipos de Curva Zona Sur.	139
Tabla 5.2	Correlación Hidrogeológica de las Curvas Zona Sur.	141
Tabla 5.3	Correlación Hidrogeológica de las Curvas Zona Norte.	162
Tabla 6.1	Métodos Analíticos Utilizados y su Límite de Detección.	167
Tabla 6.2	Valores de Parámetros Indicadores de Contaminación.	168

Tabla 6.3	Composición Agua Lluvia y Aerosoles Marinos.	171
Tabla 6.4	Análisis Estadísticos de los Resultados Analíticos.	184
Tabla 6.5	Matriz de Correlación Global Muestras de Aljibes.	187
Tabla 6.6	Resultados del Análisis de Factores en Muestras de Aljibes.	187
Tabla 6.7	Matriz del Modelo de 3 Factores sin Rotación Aljibes.	190
Tabla 6.8	Matriz del Modelo de 3 Factores después de una Rotación Varimáx Muestras Aljibes.	190
Tabla 6.9	Matriz de Correlación Global Muestras de Pozos.	202
Tabla 6.10	Resultados del Análisis de Factores en Muestras de Pozos.	205
Tabla 6.11	Matriz de Factores Rotada en Muestras de Pozos.	207
Tabla 6.12	Valores de Parámetros Indicadores de Intrusión Marina en las Aguas Subterráneas	222
Tabla 7.1	Pruebas de bombeo y principales parámetros determinados.	259
Tabla 7.2	Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación.	273

INDICE DE FIGURAS

	Página	
Figura 1.1	Mapa de Localización del Area de Estudio.	9
Figura 2.1a.	Distribución Estacional de la Precipitación.	29
Figura 2.1b.	Distribución Estacional de la Precipitación.	30
Figura 2.1c.	Distribución Estacional de la Precipitación.	31
Figura 2.2	Variación de la ETP con Elevación.	41
Figura 2.3	Distribución Estacional de la ETP (Método de CRISTIENSEN).	44
Figura 2.4a.	Distribución Estacional de la Escorrentía Cuenca Río San Juan.	54
Figura 2.4b.	Distribución Estacional de la Escorrentía Cuenca Río Mulatos.	55
Figura 2.4c.	Distribución Estacional de la Escorrentía Cuenca Río Leon.	56
Figura 3.1	Mapa de Líneas de Vuelo.	78
Figura 3.2	Elementos Geotectónicos Mayores del N.W. de Colombia.	82
Figura 3.3	Sub-Cuenca del Sinú. Columna Estratigráfica Generalizada.	85
Figura 3.4	Columna Estratigráfica Generalizada de la Unidad T1 a lo Largo del Río Turbo.	87

Figura 3.5	Lodolitas de la Unidad T1.	89
Figura 3.6	Columna Estratigráfica Generalizada de la Unidad T2, Conjuntos A-B-C a lo Largo de la Carretera El Tigre - El Alto.	91
Figura 3.7	Aspecto del Conjunto A.	92
Figura 3.8	Aspecto del Conjunto B.	93
Figura 3.9	Aspecto del Conjunto C.	94
Figura 3.10	Aspecto de la Unidad T2. Fotografía tomada desde avión.	95
Figura 3.11	Primer nivel de Terraza.	97
Figura 3.12	Segundo Nivel de Terraza.	98
Figura 3.13	Tercer Nivel de Terraza.	99
Figura 4.1	Aceite en Agua de Manantiales, Finca La Esperanza.	115
Figura 4.2	Manantial de la Q. María Ramos.	116
Figura 4.3	Reservorio Finca Triganá.	119
Figura 4.4	Tanque de Lavado de Banano, Finca Américas.	119
Figura 4.5	Tanque de Lavado de Banano, Finca La Primera.	120
Figura 4.6	Vertimiento de las Aguas a los Canales, Finca Magdalena.	121
Figura 4.7	Sistema de Aireación. Finca Nuevos Tiempos.	122
Figura 4.8	Sistema de Aireación. Finca El Retiro.	123
Figura 4.9	Sistema de Aireación. Finca La Primera.	124
Figura 5.1	Sondeo Geoeléctrico con Dispositivo Schlumberger (Vista de Perfil).	128
Figura 5.2a.	Curva tipo 1.	133

Figura 5.2b.	Curva tipo 2.	134
Figura 5.2c.	Curva tipo 3.	135
Figura 5.2d.	Curva tipo 4.	136
Figura 5.2e.	Curva tipo 5.	137
Figura 5.3	Diagrama de Correlación, Corte 1-1` . (en bolsillo).	
Figura 5.4	Diagrama de Correlación, Corte 2-2` . (en bolsillo).	
Figura 5.5	Diagrama de Correlación, Corte 3-3` . (en bolsillo).	
Figura 5.6	Diagrama de Correlación, Corte 4-4` . (en bolsillo).	
Figura 5.7	Diagrama de Correlación, Corte 5-5` . (en bolsillo).	
Figura 5.8	Diagrama de Correlación, Corte 6-6` . (en bolsillo).	
Figura 5.9	Diagrama de Correlación, Corte 7-7` . (en bolsillo).	
Figura 5.10	Diagrama de Correlación, Corte 8-8` . (en bolsillo).	
Figura 5.11	Mapa de Isorresistividad a 10 m de Profundidad	145
Figura 5.12	Mapa de Isorresistividad a 30 m de Profundidad	146
Figura 5.13	Mapa de Isorresistividad a 100 m de Profundidad	148
Figura 5.14	Mapa de Isorresistividad a 200 m de Profundidad	149
Figura 5.15a.	Curva tipo 1.	156
Figura 5.15b.	Curva tipo 2.	157
Figura 5.15c.	Curva tipo 3.	158
Figura 5.15d.	Curva tipo 4.	159
Figura 5.16	Diagrama de Correlación, Corte 9-9` Y 10-10` . (en bolillo).	
Figura 5.17	Diagrama de Correlación, Corte 11-11` . (en bolisillo).	

- Figura 5.18** Diagrama de Correlación, Corte 12-12`. (en bolsillo).
- Figura 5.19** Diagrama de Correlación, Corte 13-13`. (en bolsillo).
- Figura 5.20** Diagrama de Correlación, Corte 14-14` Y 15-15`. (en bolsillo).
- Figura 5.21** Diagrama de Correlación, Corte 16-16`. (en bolsillo).
- Figura 5.22** Diagrama de Correlación, Corte 17-17`. (en bolsillo).
- Figura 5.23** Diagrama de Correlación, Corte 18-18`. (en bolsillo).
- Figura 6.1** Esquema de un Diagrama de Cajas. 177
- Figura 6.2** Diagrama de Cajas para pH. (en bolsillo).
- Figura 6.3** Diagrama de Cajas para Dureza. (en bolsillo).
- Figura 6.4** Diagrama de Cajas para Conductividad Eléctrica.
(en bolsillo).
- Figura 6.5** Diagrama de Cajas para Sodio. (en bolsillo).
- Figura 6.6** Diagrama de Cajas para Potasio. (en bolsillo).
- Figura 6.7** Diagrama de Cajas para Calcio. (en bolsillo).
- Figura 6.8** Diagrama de Cajas para Magnesio. (en bolsillo).
- Figura 6.9** Diagrama de Cajas para Hierro. (en bolsillo).
- Figura 6.10** Diagrama de Cajas para Cloruros. (en bolsillo).
- Figura 6.11** Diagrama de Cajas para Bicarbonatos. (en bolsillo).
- Figura 6.12** Diagrama de Cajas para Color. (en bolsillo).
- Figura 6.13** Diagrama de Cajas para Alcalinidad. (en bolsillo).
- Figura 6.14** Diagrama de Cajas para Turbidez. (en bolsillo).
- Figura 6.15** Diagrama de Cajas para Sulfatos. (en bolsillo).

Figura 6.16	Diagrama de Cajas para Relación Cl/HCO₃. (en bolsillo).	
Figura 6.17	Diagrama de Cajas para Relación Mg/Ca. (en bolsillo).	
Figura 6.18	Resumen de los Diagramas de Cajas para las Variables Analizadas.	179
Figura 6.19	Distribución Espacial de la Conductividad Eléctrica en Aljibes	180
Figura 6.20	Distribución Espacial de la Conductividad Eléctrica en Pozos	181
Figura 6.21	Distribución Espacial de Cloruros en Aljibes	182
Figura 6.22	Distribución Espacial de Cloruros en Pozos	183
Figura 6.23	Valores Anómalos de Cloruros para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.24	Valores Anómalos de Cloruros para Pozos. (en bolsillo).	
Figura 6.25	Valores Anómalos de Sulfatos para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.26	Valores Anómalos de Sulfatos para Pozos. (en bolsillo).	
Figura 6.27	Valores Anómalos de Bicarbonatos para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.28	Valores Anómalos de Bicarbonatos para Pozos. (en bolsillo)	
Figura 6.29	Valores Anómalos de Calcio para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.30	Valores Anómalos de Calcio para Pozos. (en bolsillo).	
Figura 6.31	Valores Anómalos de Sodio para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.32	Valores Anómalos de Sodio para Pozos. (en bolsillo).	
Figura 6.33	Valores Anómalos de Magnesio para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.34	Valores Anómalos de Magnesio para Pozos. (en bolsillo).	

Figura 6.35	Valores Anómalos de Potasio para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.36	Valores Anómalos de Potasio para Pozos. (en bolsillo).	
Figura 6.37	Valores Anómalos de Hierro para Aljibes. (en bolsillo).	
Figura 6.38	Valores Anómalos de Hierro para Pozos. (en bolsillo).	
Figura 6.39	Gráfico de los dos primeros Factores para Aljibes.	189
Figura 6.40	Semivariograma del Factor 1 en Aljibes.	192
Figura 6.41	Diagrama de Cajas del Factor 1 en Aljibes.	193
Figura 6.42	Distribución Espacial del Factor 1 en Aljibes.	194
Figura 6.43	Mapa de Tonos del Factor 1 en Aljibes.	195
Figura 6.44	Semivariograma del Factor 2 en Aljibes.	196
Figura 6.45	Distribución Espacial del Factor 2 en Aljibes.	198
Figura 6.46	Mapa de Tonos del Factor 2 en Aljibes.	199
Figura 6.47	Diagrama de Cajas del Factor 2 en Aljibes.	200
Figura 6.48	Semivariograma del Factor 3 en Aljibes.	201
Figura 6.49	Distribución Espacial del Factor 3 en Aljibes.	203
Figura 6.50	Distribución Espacial del Factor 3 en Aljibes.	204
Figura 6.51	Gráfico de los dos Primeros Factores para Pozos.	206
Figura 6.52	Distribución Espacial del Factor 1 en Pozos.	208
Figura 6.53	Distribución Espacial del Factor 1 en Pozos.	209
Figura 6.54	Semivariograma del Factor 1 en Pozos.	210
Figura 6.55	Diagrama de Cajas del Factor en Pozos.	212
Figura 6.56	Semivariograma del Factor 2 en Pozos.	213

Figura 6.57	Distribución Espacial del Factor 2 en Pozos.	214
Figura 6.58	Distribución Espacial del Factor 2 en Pozos.	215
Figura 6.59	Semivariograma del Factor 3 en Pozos.	216
Figura 6.60	Distribución Espacial del Factor 3 en Pozos.	217
Figura 6.61	Distribución Espacial del Factor 3 en Pozos.	218
Figura 6.62	Distribución Espacial de la Turbidez en Aljibes.	229
Figura 6.63	Distribución Espacial del Color en Aljibes.	230
Figura 6.64	Distribución Espacial del Color en Pozos.	231
Figura 6.65	Distribución Espacial de la Dureza en Aljibes.	232
Figura 6.66	Distribución Espacial de la Dureza en Pozos.	233
Figura 6.67	Distribución Espacial del Hierro en Aljibes.	234
Figura 6.68	Distribución Espacial del Hierro en Pozos.	235
Figura 6.69	Diagrama de Scholler.	236
Figura 7.1	Cálculo de la Recarga Real a partir de la Recarga Potencial y las Características de la Capa Adyacente al Suelo.	242
Figura 7.2a.	Curva tipo Prueba de Bombeo Pozo 79-IV-C-17.	260
Figura 7.2b.	Curva tipo Prueba de Recuperación Pozo 79-IV-C-17.	260
Figura 7.3a.	Curva Prueba de Bombeo Pozo 90-IV-A-18.	261
Figura 7.3b.	Curva Prueba de Recuperación Pozo 90-IV-A-18.	261
Figura 7.4	Mapa de Isopiezas de los Sistemas Acuíferos B Y C de la Unidad T2 Marzo de 1994.	265

Figura 7.5	Mapa de Isopiezas de los Sistemas Acuíferos B Y C de la Unidad T2 Agosto de 1994.	266
Figura 7.6	Mapa de Isopiezas de los Sistemas Acuíferos B Y C de la Unidad T2 Noviembre de 1994.	267
Figura 7.7	Sistema de Evaluación para Hallar el Índice de Vulnerabilidad	271

INDICE DE PLANCHAS

- Plancha 2.1** Mapa de Isoyetas Multianuales y Localización de Estaciones Meteorológicas.
- Plancha 2.2** Mapa de Isoyetas Año Húmedo
- Plancha 2.3** Mapa de Isoyetas Año Seco
- Plancha 2.4** Mapa de Escorrentía Multianual y Localización de Estaciones Hidrométricas.
- Plancha 2.5** Mapa de Rezonificación de Suelos.
- Plancha 3.1** Mapa Geológico Zona 1 (Carepa - Juradó).
- Plancha 3.2** Mapa Geológico Zona 2 (Turbo - Apartadó).
- Plancha 3.3** Mapa Geológico Zona 3 (Necoclí).
- Plancha 3.4** Mapa Geológico Zona 4 (Mulatos - El Uvero).
- Plancha 3.5** Mapa Geológico Zona 5 (San Juan de Urabá - Arboletes).
- Plancha 4.1** Localización de Puntos Inventariados Zona 1 (Carepa - Juradó).
- Plancha 4.2** Localización de Puntos Inventariados Zona 2 (Turbo - Apartadó).
- Plancha 4.3** Localización de Puntos Inventariados y SEVS Zonas 3, 4 y 5 (Necoclí - Arboletes).
- Plancha 7.1** Mapa Hidrogeológico Zona 1 (Carepa - Juradó).
- Plancha 7.2** Mapa Hidrogeológico Zona 2 (Turbo - Apartadó).
- Plancha 7.3** Mapa Hidrogeológico Zona 3 (Necoclí).

- Plancha 7.4** Mapa Hidrogeológico Zona 4 (Mulatos - El Uvero).
- Plancha 7.5** Mapa Hidrogeológico Zona 5 (San Juan de Urabá - Arboletes).
- Plancha 7.6** Mapa de Isópacas de los Sedimentos Acuíferos del Cuaternario Zonas 1 y 2 (Turbo - Juradó).
- Plancha 7.7** Mapa de Isóbatas del Techo del Conjunto T2B.
- Plancha 7.8** Mapa de Isópacas del Conjunto T2B.
- Plancha 7.9** Mapa de Distribución Espacial de la Conductividad Hidráulica (K) y Localización de Pozos con Prueba de Bombeo.
- Plancha 7.10** Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación Zonas 1 y 2 (Turbo - Juradó).
- Plancha 7.11** Mapa de Disponibilidad del Recurso Hídrico Zonas 1 y 2 (Turbo - Juradó).

INDICE DE ANEXOS

- Anexo 1. Hidrometeorología y Balances Hídricos**

- Anexo 2. Resumen Información de Inventario de Puntos de Agua**

- Anexo 3. Interpretación Matemática de los Sondeos Eléctricos Verticales**

- Anexo 4. Calidad del Agua**

- Anexo 5. Pruebas de Bombeo**

Anexo 1. HIDROMETEOROLOGÍA Y BALANCES HÍDRICOS

- **Registros de Precipitación**
- **Ajuste Ley de Distribución Log. Normal (Precipitación)**
- **Registros Meteorológicos**
- **Registros de Caudales**
- **Balances Hídricos**

Anexo 2. RESUMEN DE LA INFORMACION DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

- **Pozos**
- **Aljibes**
- **Manantiales**

**Anexo 3. INTERPRETACION MATEMATICA DE LOS SONDEOS ELECTRICOS
VERTICALES**

Anexo 4. CALIDAD DEL AGUA

- **Resultados de los Análisis Físico - Químicos**
- **Diagramas de Cajas de los Principales Parámetros Analizados**
- **Distribución Espacial de los Valores Anómalos de los Principales Parámetros Analizados**

Anexo 5. PRUEBAS DE BOMBEO

- **Datos de las Pruebas de Bombeo Analizadas**
- **Interpretación de las Pruebas de Bombeo**

BIBLIOGRAFIA

BILLINGS, M. P., 1972. Structural Geology. 3ed. New Jersey, Printice-Hall, 606p.

CARO y otros, 1985. Prospección Hidrogeológica en el Noreste de Urabá.

CASTANY, 1976. Tratado Práctico de Aguas Subterráneas. Editorial Omega. España.

CASTRO, M.A., y GUZMAN O., 1985. Estudio Comparativo de Fórmulas de Evapotranspiración Potencial en Colombia. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT. Bogotá.

CATALAN Lafuente, J. 1981 Química del Agua. Segunda Edición. Madrid. España.

CHEVRON, 1986. Northwest Colombia Project Exploration Quarterly. Ecopetrol rep. 1406. Bogotá.

CHOW, V. T., 1964. Handbook of Applied Hydrology. Mc.Graw Hill Co.

CUSTODIO, E., y LLAMAS. 1976. Hidrología Subterránea. Barcelona, Ediciones Omega S.A.

DRISCOLL F., 1986. Groundwater and Wells. Johnson Filtration System Inc; st Paul, Minnessota.

DUQUE CARO, H. 1972. Relaciones entre la bioestratigrafía y la cronoestratigrafía en el llamado geosinclinal de Bolívar. Bol. Geol. Vol. 19:3. p. 25-68. Ingeominas. Bogotá.

_____, 1973. Guidebook to the Geology of the Monteria Area. Col. Soc. Petr. Geol. Geoph. Ann. Field Conf. 14:1-49. Bogotá.

_____, 1975. Los Foraminiferos planctónicos y el Terciario de Colombia. Rev. Esp. Micropal, 7(3):403-427. Madrid.

_____, 1979. Major structural elements and evolution of Nortwestern Colombia. In: Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins. Watkins, J.S. and others (eds.). American Association of Petroleum Geologist, Memoir 29:329-351.

_____, 1980. **Geotectónica y Evolución de la Región Noroccidental Colombiana. Bol. Geol.Ingeominas, Vol. 23(3):4-37. Bogotá.**

_____, 1984. **Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinu San Jacinto terrane, Southwestern Caribbean borderland. In the South American Caribbean Plate Boundary and Regional Tectonics. Bonini, W. E. and others (eds.). Geol. Soc. of Amer., Memoir 162:303-316.**

_____, 1990a. **The Choco Block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. Galley Proofs, J. South Am. Earth Sci. 3:1 p. 1-14.**

_____, 1990b. **Estratigrafía, paleoceanografía de la cuenca del Atrato y la Evolución de Panamá. Bol. Geol. Vol. 31:1 Ingeominas. Bogotá.**

_____, 1990c. **El Bloque Chocó en el noroccidente Suramericano: Implicaciones estructurales, tectonoestratigráficas y paleogeográficas. Bol. Geol. Vol. 31:1 Ingeominas. Bogotá.**

ESLAVA J.A. Et al. 1986. Los Climas de Colombia. Atmósfera No. 7. Bogotá.

ETAYO, F. et al. 1983-1986. Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publ. Geol. Esp. Ingeominas. 14:1. p. 1-235. Bogotá.

FOSTER, S., et al. 1987. Contaminación de las Aguas Subterráneas. OMS,OPS-HPE, CEPIS, Lima - Perú.

FOSTER, S., et al. 1991. Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas. OMS,OPS-HPE, CEPIS, Lima - Perú.

FOSTER, S., et al. 1992. Estrategias para la Protección de Aguas Subterráneas. OMS,OPS-HPE, CEPIS, Lima - Perú.

HAFFER, J. 1965. On the Stratigraphy of the upper Sinú - upper San Jorge región, northwestern Colombia. report GR-302 Ecopetrol. Bogotá.

HAFFER, J. 1967. On the Geology of the Uraba and northern Choco report. 357 (mecanografiado). p. 1-105. Ecopetrol. Bogotá.

INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI". 1979. Suelos del Departamento de Antioquia. Tomo 1 y 2. Bogotá.

INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI". 1980. Estudio general de los suelos de la región del Darien. Bogotá.

INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI". 1982. Suelos del Departamento de Antioquia y su aptitud de uso. Bogotá.

INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI", 1983. Mapa Gravimétrico de Anomalías Simples de Bouguer. Escala 1:500.000.

INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI". 1992. Características Geográficas. Antioquia. Bogotá.

ITAMAR, N. D., 1976. Evaluación de la Evapotranspiración Potencial en Colombia Según el método C. W. THORNTHWAITE. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT. Bogotá.

ITAMAR, N. y GUZMAN, O., 1977. Estudio sobre la Evaporación Media desde la Superficie del Agua en Colombia. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT. Bogotá.

KLIBASHEV, .P Y GOROSHKOV, I.F., 1970. Los Cálculos Hidrológicos. Hidromet Izdat,

Leningrado.

LASSO, L., 1983. Régimen de la temperatura media del aire en Colombia. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT. Bogotá.

LECARPENTIER, C. Et al. 1975. Estudio Hidroclimatológico de la Region del Caribe. Instituto Geográfico "AGUSTÍN CODAZZI". Subdirección de Investigación y Divulgación Geográfica. Bogotá.

LOPEZ, D. 1990. Agroclimatología y Suelos (Notas de Clases Preliminares). IGAC. Bogotá.

MOHR, E. C. J., et al. 1972 Tropical Soils. Third Edition, The Netherlands.

NRA, 1992. Policy and Practice for the Protection of Groundwater. Newcastle, United Kingdom.

OVERMEEREN, 1987. Avances en Exploración Geofísica para Aguas Subterráneas (inédito). INGEOMINAS - TNO.

PROBAN, S. A., 1986. Geoeléctrica. Medellín (inédito.)

RANGEL, E. M., 1984. Estudio de Precipitación para la Costa Norte de Colombia. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras "HIMAT". Subdirección de Hidrología y Meteorología. Bogotá.

ROJAS, O. 1966. Geological traverses in the Choco región (Northwestern Colombia). Ecopetrol GR. 360. p. 1-68. Bogotá.

RODRIGUEZ, M. G., y DE BERMOUDES O. N., 1992. Modelo de Balance de Humedad del Suelo propuesto para el cálculo de la recarga en la Sabana de Bogotá. CIDIAT. Bogotá.

SHAW, F. M., 1983. Hidrology in practice. Van Nostrand Reinhold Co., Ltda. England.

SCHUILING, R.D, et al. 1983. Introduction to Geochemistry. Fourth Edition, Utrecht, The Netherlands.

SUBDIRECCION DE MINERIA

PROGRAMA:

**EXPLORACION Y EVALUACION
DE FUENTES DE AGUA SUBTERRANEA**

**EVALUACION DEL AGUA SUBTERRANEA EN LA REGION
DE URABA, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

Santafé de Bogotá, D.C., Septiembre de 1995

PARTICIPANTES

Los profesionales que participaron en la ejecución de este proyecto son los siguientes:

Ubaldo Cossio y José Vicente Franco en la Cartografía Geológica y elaboración del capítulo de Geología.

Olga de Bermoudes, Liliana Chaparro y Dora Reyes en el análisis hidrometeorológico y realización del respectivo capítulo.

Miguel Garzón, Luis Vásquez y José Vicente Franco en la Prospección Geoeléctrica y realización del informe respectivo.

Jorge A. Cárdenas , María Consuelo Vargas y Jorge Calderón en la fase de hidroquímica y realización del capítulo de Calidad del Agua.

Flor Marina Rocha en la estructuración de la base de datos.

Jorge I. Cárdenas, Gloria Hincapié, Miriam Ríos y Camilo Martínez, en las diferentes etapas de la fase de Hidrogeología.

Jorge I. Calderón en el procesamiento y análisis estadístico de la información de las diferentes fases y en la presentación gráfica de ella.

Camilo Martínez y Miriam Ríos en la compilación y edición del informe final.

En todas las etapas de campo y de oficina se contó con la participación del grupo de auxiliares del área de Minería y del área de Geofísica.