

1-1-2000

Evaluación ambiental e identificación de las zonas de protección de las aguas subterráneas del municipio La Tebaida, departamento del Quindío

Elkin Javier Bermudez Mejía
Universidad de La Salle, Bogotá

Elberth Robles Rojas
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria

Citación recomendada

Bermudez Mejía, E. J., & Robles Rojas, E. (2000). Evaluación ambiental e identificación de las zonas de protección de las aguas subterráneas del municipio La Tebaida, departamento del Quindío. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1706

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

EVALUACION AMBIENTAL E IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE
PROTECCION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL MUNICIPIO LA
TEBAIDA, DEPARTAMENTO DEL QUINDIO

ELKIN JAVIER BERMUDEZ MEJIA

ELBERTH ROBLES ROJAS

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
SANTA FE DE BOGOTA, D.C.

2000

EVALUACION AMBIENTAL E IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE
PROTECCION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL MUNICIPIO LA
TEBAIDA, DEPARTAMENTO DEL QUINDIO

ELKIN JAVIER BERMUDEZ MEJIA
41952600

ELBERTH ROBLES ROJAS
41922601

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Ambiental y Sanitario

Director
HUGO CAÑAS CERVANTES
Geólogo

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
SANTA FE DE BOGOTA, D.C.
2000

DIRECTIVAS

Hno. JOSE VICENTE HENRY VALBUENA
Visitador Provincial

Hno. FABIO GALLEGO ARIAS
Rector

Hno. HUMBERTO CAICEDO LOPEZ
Vicerrector Académico

Hno. EDGAR FIGUEROA ABRAJIM
Vicerrector de Promoción y Desarrollo Humano

Dr. ORLANDO RUIZ PEÑA
Vicerrector Administrativo

Dr. GUILLERMO PANQUEVA MORALES
Secretario General

Dr. CAMILO GUAQUETA RODRIGUEZ
Decano facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Dr. JOSE ANTONIO GALINDO MARTINEZ
Secretario Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

NOTA DE ACEPTACION

Dr. CAMILO GUAQUETA RODRIGUEZ

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Dr. JOSE ANTONIO GALINDO MARTINEZ

Secretario Académico Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Dr. HUGO CAÑAS CERVANTES

Director

Dr. JOSE ANTONIO GALINDO

Jurado

Dr. HERNANDO AMADO BAENA

Jurado

Bogotá septiembre de 2000

ADVERTENCIA

***“Ni la Universidad ni la Facultad
son responsables por las ideas
expresadas por el graduando ”***

DEDICATORIA

A Dios quién todo lo puede; a nuestros padres por enseñarnos a ser mejores cada día, a mis hermanos por el apoyo incondicional y a mi amigo Lucio Fernando Ruiz por la motivación y esperanza puesta en mi.

ELBERTH.

A Dios como Ser supremo; a mis padres por darme la oportunidad de superarme, a mis hermanos por su apoyo constante y a Sandra por ser mi amiga incondicional.

ELKIN.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar sus más sinceros agradecimientos a:

Geólogo, Dr. Hugo Cañas Cervantes por su constante colaboración y apoyo a lo largo de este proyecto

Ingeniero Civil, Dr. Jose Antonio Galindo Martinez Jurado de Tesis

Ingeniero Civil, Dr. Hernando Amado Baena Jurado de Tesis

Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Adriana Parada Rojas por su valiosa colaboración

Compañero y amigo, Cesar Eduardo Moreno Yépez por su desinteresada colaboración

Todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para que este proyecto llegara a su feliz término.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. DELIMITACIONES	4
1.4.1. Delimitación temporal	5
1.4.2. Delimitación espacial	5
1.5. METODOLOGÍA	5
1.6. PROPOSITO	6
2. MARCO DE REFERENCIA	7
2.1. GENERALIDADES	7
2.2. EXPLORACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	11
2.3. ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS	11
2.4. METODOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	12
2.4.1. Métodos geológicos	13
2.4.1.1. Características de las unidades geológicas	14
2.4.2. Métodos geofísicos	14
2.4.2.1. De superficie	15
2.4.2.2. De subsuperficie	18
2.4.3. Métodos de hidrología de superficie	19
2.4.4. Métodos hidroquímicos	20

2.4.5. Métodos hidrogeológicos propiamente dichos	21
2.4.5.1. Inventarios de pozos	21
2.4.6. Técnicas especiales	22
2.5. CONCEPTO DE VULNERABILIDAD Y RIESGO	23
2.6. CONCEPTOS GENERALES DE PROTECCIÓN DE LOS ACUÍFEROS	26
2.6.1. Estrategia global	26
2.7. MARCO LEGAL	30
2.7.1. Recurso agua	33
2.7.1.1. Normas sobre aguas no marítimas	33
3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO	43
3.1. LOCALIZACIÓN	43
3.2. ACTIVIDADES ECONOMICAS, RECURSOS Y SANEAMIENTO BASICO	43
3.2.1. Servicios	45
3.2.2. Energía eléctrica	45
3.2.3. Salud	46
3.2.4. Educación	46
3.2.5. Condiciones sanitarias existentes	46
3.2.5.1. Acueducto	46
3.2.5.2. Alcantarillado	47
3.3. VIAS DE COMUNICACIÓN	48
4. MARCO CONCEPTUAL AMBIENTAL Y DE HIDROGEOLOGÍA GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO	50
4.1. ZONAS ECOLÓGICAS	50
4.2. SUELOS	51
4.2.1. Consociación Chinchina (CI)	51
4.2.2. Asociación Tebaida – Alejandría (TB)	52
4.2.3. Asociación Alejandría – Isabela (AL)	53
4.2.4. Asociación Quindío (QU)	53
4.2.5. Consociación Playones (PY)	54

4.2.6. Asociación Ceilán – Danubio (CE)	55
4.2.7. Asociación Barragán – Picota (BA)	55
4.3. USO ACTUAL DEL SUELO Y CAPACIDAD DE USO	56
4.3.1. Tierras de clase II	57
4.3.2. Tierras de clase III	58
4.3.3. Tierras de clase IV	59
4.3.4. Tierras de clase VI	59
4.4. GEOMORFOLOGÍA	60
4.4.1. Fisiografía	60
4.4.2. Corrientes superficiales	62
4.4.3. Estratigrafía	62
4.4.4. Glacis del Quindío (TQgp)	65
4.5. HIDROLOGIA	67
4.5.1. Análisis Climático de la cuenca	68
4.5.2. Precipitación	70
4.5.2.1. Distribución temporal de la precipitación	70
4.5.2.2. Distribución espacial de la precipitación	71
4.5.3. Evaporación	73
4.5.4. Evapotranspiración	74
4.5.5. Temperatura	75
4.5.6. Humedad relativa	76
4.5.7. Brillo solar	76
4.5.8. Análisis del régimen de caudales	77
4.5.9. Análisis del diagrama de frecuencias	78
4.5.10. Curva de duración de caudales	78
4.5.10.1. Estimación de la escorrentía secundaria	79
4.5.11. Escorrentía directa	83
4.5.12. Movimiento del agua subterránea	83
4.5.13. Zonas de recarga	84
4.6. BALANCE HÍDRICO	84
4.6.1. Generalidades y principios de establecimiento	84

4.7.	HIDROGEOLOGÍA	90
4.7.1.	Unidades hidrogeológicas	90
4.7.2.	Características hidrogeológicas del sistema acuífero Glacis del Quindío	95
4.8.	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	98
4.8.1.	Inventario de pozos	99
4.8.2.	Pozos	99
4.8.3.	Aljibes	103
4.8.4.	Manantiales	104
4.8.5.	Abastecimiento actual de agua	105
4.9.	GEOELECTRICA	106
4.9.1.	Interpretación	106
4.9.2.	Métodos geofísicos	107
4.9.3.	Mapas de isorresistividad	109
4.9.4.	Factor de formación	110
4.10.	PARAMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS	110
4.10.1.	Pruebas de bombeo	111
4.11.	HIDROGEOQUIMICA	111
4.11.1.	Redes de flujo subterráneo	115
5.	MODELO CONCEPTUAL PARA DEFINIR LAS ZONAS DE PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	117
5.1.	METODOLOGÍA	117
5.1.1.	Recopilación de información	117
5.1.2.	Diseño experimental	118
5.2.	CONCEPTOS SOBRE LA VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO A LA CONTAMINACIÓN	118
5.2.1.	Evaluación de la vulnerabilidad	119
5.2.2.	Método de evaluación de parámetro "GODS"	120
5.2.3.	Resultado de la vulnerabilidad del acuífero Glacis del Quindío	121
5.3.	CONCEPTO SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS FISICO – QUÍMICAS DEL AGUA	123

5.3.1. Evaluación general	124
5.4. EVALUACIÓN AMBIENTAL	126
5.5. DEFINICIÓN DE LAS ZONAS DE PROTECCIÓN DEL ACUÍFERO GLACIS DEL QUINDÍO	131
5.5.1. Zona de protección interior	132
5.5.2. Zona de protección exterior	132
5.5.3. Zona de captura de las fuentes	132
5.5.4. Métodos utilizados	133
5.5.4.1. Método manual	134
5.5.4.2. Ecuaciones básicas	135
5.5.4.3. Soluciones analíticas	136
5.5.4.4. Método semi – analítico	136
5.6. EVALUACIÓN DE LAS ZONAS DE CAPTURA DE POZOS Y ALJIBES QUE CAPTAN LAS CAPAS ACUÍFERAS SUBSUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS DEL GLACIS DEL QUINDÍO EN EL SUBSUELO DEL MUNICIPIO DE LA TEBAIDA	139
5.7. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE	144
5.7.1. Factores que controlan la forma de las zonas de protección	146
5.7.2. Factores hidrogeológicos que influyen en la zona de protección	146
6. CONCLUSIONES	150
7. RECOMENDACIONES	152
BIBLIOGRAFÍA	155
ANEXOS	162
MATERIAL ACOMPAÑANTE	

LISTA DE TABLAS

1. Tipos de estudios hidrológicos
2. Rangos de resistividad de formación esperados según el tipo de agua y el factor de formación F
3. Programa tipo de testificación geofísica para hidrogeología
4. Estaciones pluviométricas y climatológicas
5. Valores totales mensuales y anuales de precipitación
6. Cálculo de la precipitación media de la cuenca de la Quebrada Cristales
7. Cálculo de la ETP
8. Cálculo de la curva de la duración de caudales Quebrada Cristales
9. Valores de lámina de escorrentía directa mensual
10. Balance hídrico estación Aeropuerto El Edén
11. Resultados del análisis de conductividad. Marzo de 1994
12. Resultados del análisis de la calidad de agua. Febrero 1999
13. Análisis comparativo resultados calidad del agua. Decreto 475 de 1998
14. Matriz – aceptabilidad de las actividades e instalaciones con potencial de contaminación con relación a las zonas de protección del agua subterránea.
15. Parámetros que influyen en la forma y tamaño de las zonas de protección
16. Problemas relativos a los datos de terreno y su influencia en los modelos

LISTA DE GRAFICAS

1. Distribución mensual de la Precipitación
2. Distribución mensual de la Evaporación
3. Distribución mensual de la Temperatura media
4. Distribución mensual de la Humedad relativa
5. Distribución mensual del Brillo Solar
6. Diagrama de Frecuencia de Caudales
7. Curva de duración de Caudales Medios Diarios
8. Hidrograma de una tormenta en la Quebrada Cristales
9. Climodiagrama ETP - P
10. Balance Hídrico Climático, Estación Aeropuerto El Edén

LISTA DE PLANOS

1. Localización
3. Suelos
4. Isolíneas de pendiente

LISTA DE FOTOGRAFIAS

1. Vía carreteable Armenia – La Tebaida
2. Tipo de suelo superficial Glacis del Quindío
3. Cañon del río Quindío
4. Panorámica del Cerro de Armenia, desde el relieve Sur del Area
5. Talud de la carretera Armenia – La Tebaida – El Caimo, se evidencia parte superficial del Glacis del Quindío
6. Apariencia de la arena Volcánica en Bosque de Pinares
7. Estructura de bombeo Pozo 243ID-28 Anapoima
8. Estructura de bombeo Pozo 243ID-30 La Marina
9. Estructura de bombeo Pozo 243ID-102 El Arco
10. Estructura de bombeo Pozo 243ID-103 El Horizonte
11. Estructura de bombeo Pozo 243IIC-7 Parque Recreacional
12. Manantial 243IIIB-1 Maravelez
13. Invasión ronda de la Quebrada La Jarramilla – Contaminación por vertimientos domésticos. Pozo Anapoima
14. Localización de aljibes en bajos Topográficos
15. Vista general cementerio municipio de La Tebaida

MAPAS

2. General del municipio de La Tebaida
5. Fisiografía
6. Geológico del municipio de La Tebaida
7. Isoyetas de Precipitación en el municipio de La Tebaida
8. Hidrogeológico del municipio de la Tebaida
9. Isorresistividades para AB/2, 50 metros
10. Isorresistividades para AB/2, 100 metros
11. Dirección del flujo de agua subterránea en el municipio de La Tebaida
12. Isoconductividad en el campo de Pozos en el municipio de La Tebaida 1994
13. Isoconductividad en el campo de Pozos en el municipio de La Tebaida 1999
14. Isoconductividad del Acuífero libre en el municipio de La Tebaida
15. Isoconductividad de la cuenca del río Cristales en el municipio de la Tebaida
16. Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Glacis del Quindío (TQgp) – Acuífero libre
17. Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Glacis del Quindío (TQgp) – Confinado

FIGURAS

1. Marco conceptual de la protección de aguas subterráneas
2. Resumen de procesos que favorecen la atenuación de contaminantes en el subsuelo
3. Clasificación de los estratos geológicos para fines de mapeo de la vulnerabilidad de Acuíferos a la contaminación
4. Corte geológico del mapa geológico del municipio de La Tebaida
5. Correlación litológica de los Pozos Anapoima, Cicolsa y La Marina
6. Perfil geológico sección A – A”
7. Sistema “GODS” para la evaluación del índice de vulnerabilidad del Acuífero
8. Area de influencia y zona de captura de un Pozo
9. Zona de captura alrededor de un Pozo en un Acuífero
10. Comparación de áreas de protección para diferentes tipos de acuíferos y condiciones de recarga

CUADROS

1. (a,b,c,d) Inventario de Puntos de agua, Pozos y Aljibes
2. Método manual. pozos
3. Solución analítica. Pozos
4. Método manual. Aljibes
5. Solución analítica. Aljibes

ESQUEMAS

1. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Pozo Anapoima
2. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Pozo La Marina
3. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Pozo El Horizonte
4. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Pozo El Arco
5. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Pozo Parque Recreacional
6. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Aljibe Villa Cristina
7. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Aljibe Andalucia
8. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Aljibe La Argentina
9. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Aljibe De La Irlanda
10. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Aljibe El Salto
11. Aplicación módulo RESSQC del programa WHPA. Aljibe El Cinco

CALCULOS

1. Método Manual – Solución Analítica. Pozos
2. Método Manual - Solución Analítica. Aljibes

GLOSARIO

ABANICO: superficie de configuración triangular formada por acumulación de materiales al pie de una vertiente. La pendiente es suave y paralela al eje del abanico.

ABATIMIENTO: es el descenso del nivel piezométrico en los acuíferos confinados o del freático en los no confinados como consecuencia de la extracción del agua del subsuelo mediante bombeo.

ABSTRACCION: remover el agua subterránea hasta la superficie, usualmente por medio de bombas.

ABSORBCION: penetración de una sustancia en otra, generalmente gas o vapor en un líquido, que da lugar a una disolución.

ACUIFERO: agua subterránea contenida en capas geológicas en cantidades suficientes para permitir su explotación, formación rocosa que permite el paso del agua a través de ella.

ACUIFERO CONFINADO: aquel en que el agua está en cualquier punto del mismo a mayor presión que la atmosférica y por tanto al efectuar una perforación, el agua asciende hasta un nivel superior al del techo del acuífero; el techo y el fondo del acuífero no aporta agua.

ACUIFERO LIBRE: aquel cuyo nivel freático se halla en contacto con la atmósfera a través de la zona no saturada y que por lo tanto son susceptible de recibir recarga loca directa.

ACUIFERO SEMICONFINADO O SEMICAUTIVO: es un acuífero en condiciones similares al acuífero cautivo pero que puede recibir recarga o perder agua a través del techo y/o base.

ADSORCION: absorción superficial de moléculas por un material absorbente (sílica gel, alúmina activada, carbón activado). Este Fenómeno puede ser esencialmente físico o químico y si hay reacción esta puede ser catalítica o no catalítica.

ANISOTROPIA: variación de la permeabilidad en un medio según la dirección en la que se observe; en un medio anisótropo la permeabilidad horizontal es diferente de la permeabilidad vertical.

ATENUACION: aminorar en forma de dilución un contaminante en el agua

BIODEGRADABLE: susceptible de ser escindido por acción de los microorganismos.

CAPACIDAD DE RETENCION ESPECIFICA: es el porcentaje de volumen de agua que queda en el terreno, después de que se ha desalojado el agua gravifica, respecto al volumen total de una porción de suelo.

CAPACIDAD ESPECIFICA: cociente entre el caudal de agua bombeada y el descenso de nivel producido.

COALESCENCIA: la habilidad de una sustancia de fundirse, unirse o aglomerarse.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S): volumen de agua liberado por una columna de acuífero de altura igual al espesor del mismo.

COLUVIAL: materiales dendríticos transportados y acumulados sobre coluviones por escurrimiento o gravedad al pie de una pendiente.

GEOFONOS: son dispositivos o elementos que captan y registran las llegadas de las ondas u oscilaciones del terreno.

LIXIVIACION: remoción o migración de materiales del suelo en disolución, pseudodisolución o en suspensión coloidal, arrastrados por las aguas de precolación. La migración de sustancias con dimensiones superiores a las coloidales se conocen con el nombre de “erosión interna”

NIVEL DINAMICO: nivel de bombeo producido en un pozo, el cual se mantiene estable y no se producen descensos adicionales.

NIVEL ESTATICO: nivel de agua en estado natural o en reposo del acuífero en un pozo.

PERMEABILIDAD (K): facilidad en que un material deja pasar al agua a su través.

POROSIDAD: viene expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total.

POZO ARTESIANO: son manantiales que aparecen en la superficie gracias a diferencias de presión hidrostática, o igual pozo que alcanza un acuífero artesiano o confinado en el cual el nivel del agua se eleva por encima del suelo.

RADIO DE INFLUENCIA: distancia a partir de la cual se consideran nulos los descensos producidos por el bombeo del pozo.

TRASMISIVIDAD (T): capacidad de un sustrato rocoso para transmitir agua bajo presión.

TRAZADORES RADIACTIVOS: sustancias químicas que sirven para determinar las variaciones de la velocidad del agua.

RESUMEN

Uno de los rasgos más característicos de un sistema hidráulico bien constituido es, sin ningún género de dudas, la utilización de todas las fuentes posibles de recursos, procurando su empleo en aquellos usos para los que existen evidentes ventajas comparativas.

La inclusión de las aguas subterráneas en el dominio público del municipio, constituye, en ese sentido, un hecho importante en la línea de una utilización racional y efectiva de las mismas, reforzando el papel que debe jugar dentro de la política de recursos hídricos nuestro país.

También los debates producidos a lo largo de los trabajos de planificación hidrológica, presentado por Instituciones serias como INGEOMINAS y la C.R.Q., regional, en diferentes administraciones, y que han ido manifestando no sólo la importancia que los recursos hídricos subterráneos tienen dentro del sistema general de los recursos, sino un gran valor estratégico como elemento de primera magnitud ya que como configurador del medio ambiente alimenta gran parte de las lagunas, zonas húmedas del municipio y que son prioritario, preservar y proteger.

Sin embargo nos encontramos ante un recurso frágil tanto en sus aspectos de calidad como de cantidad. De un lado, la explotación de estos acuíferos por encima de sus posibilidades efectivas está abocando a algunos hacia situaciones no sostenibles de desarrollo; en otros casos, nos encontramos en zonas húmedas

en procesos de regresión por afección al flujo que las alimentaba; a su vez la contaminación, localizada o difusa, conlleva una pérdida de la capacidad de los estos acuíferos para atender determinados usos, por lo que exige actuaciones urgentes para prevenirla y corregirla.

Un método que permite asegurar la completa protección del agua subterránea en el municipio de la Tebaida, consiste en prohibir o controlar algunas actividades potencialmente contaminadoras al interior del área del acuífero. Sin embargo, la mayoría de las actividades basadas en el uso de la tierra, tales como la agricultura, la construcción de viviendas, la actividad forestal, la construcción de vías, pueden ocasionar la contaminación del acuífero.

La solución simplista de aplicar una prohibición consistiría en desistir definitivamente de estas actividades.

Es necesario entonces la búsqueda de estrategias de avanzada que permitan proteger el recurso, sin afectar la continuación de la mayoría de las actividades basadas en el uso de la tierra.

INTRODUCCION

El uso indiscriminado de los recursos naturales está haciendo que estos pierdan su equilibrio. Día a día aumentan las necesidades de agua para suplir la demanda del hombre exigiendo cantidad y calidad adecuada para su uso, teniendo que buscar nuevas alternativas de abastecimiento, como en el caso de las aguas subterráneas que actualmente se explotan en el municipio de la Tebaida.

El presente estudio evalúa desde el punto de vista hidrogeológico, un polígono de aproximadamente 121.096 Km² que comprende el municipio de la Tebaida. Para ello se desarrollo una recopilación de información sobre inventario de fuentes de agua subterránea, geológica, prospección geofísica (método geoeléctrico), medición de niveles piezométricos y la determinación de la calidad del agua, así mismo, el reconocimiento en campo de los factores ecológicos y ambientales entre otros aspectos.

Para hacer un uso adecuado del recurso hídrico subterráneo, se hace necesario el estudio evaluativo tanto en aspectos cualitativos como cuantitativos por parte de la C.R.Q., como organismo administrador del recurso, con el fin de dar un manejo racional y adecuado.

La contaminación más común de las aguas subterráneas en el municipio de la Tebaida, está asociada con el saneamiento de áreas que no cuentan con alcantarillado, la disposición final de efluentes líquidos domésticos, y las actuales prácticas de cultivos agrícolas.

Por último para proteger y regular éste elemento vital para nuestra supervivencia, el Gobierno Colombiano a dictado algunas disposiciones jurídicas, aunque en muchos casos en la región no son seguidas con rigor, al menos se contrarrestan algunos abusos en su explotación y aprovechamiento.

El régimen legal sobre el particular está instituido en lo artículos 149 a 154 del Código de Recursos Naturales y en los artículos 146 a 154 del Decreto reglamentario 1541 de 1978; además en los artículos 58 a 62 del Código Sanitario (L. 9°/79), y el Decreto 475 de 1998, sobre Normas Técnicas de la Calidad del Agua Potable.

La metodología utilizada consistió en un proceso descriptivo - evaluativo, para determinar las zonas de protección y riesgos de contaminación de las aguas subterráneas (vulnerabilidad del acuífero), y se propone un método de delineación simple y así definir las zonas de protección.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El municipio de la Tebaida, está ubicado en el Departamento del Quindío y se abastece de las aguas subterráneas de pozos profundos en la zona urbana y aljibes en la zona rural para el consumo humano y otros usos. El subsuelo del municipio y su área circundante donde yace el acuífero, fue afectado por el terremoto de Enero de 1999 y potencialmente pueden haberse contaminado, creando riesgos para la salud de sus habitantes que se abastecen de este recurso.

Las aguas subterráneas en el municipio de la Tebaida cumplen un rol importante y en numerosos casos vital, para el suministro de agua potable. Sin embargo, en la mayoría de los casos se ha prestado poca atención a la prevención de la contaminación de las fuentes de aguas subterráneas, y aún menos, la protección de los acuíferos en su conjunto.

El área del presente estudio corresponde al acuífero Glacis del Quindio (TQgp), que cubre la mayor parte del municipio de La Tebaida y la parte sur-occidental de su capital Armenia.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia el seguimiento y monitoreo de la explotación de los recursos hídricos subterráneos, adolece de planes de seguimiento que permitan a corto y mediano plazo, asegurar su sostenibilidad, en cuanto a la calidad y cantidad del recurso, haciendo cumplir las normas existentes por las entidades destinadas para tal fin, monitoreando constantemente las zonas de influencia determinadas para su protección; tal es el caso del municipio de la Tebaida (Quindío), el cuál se abastece de agua subterránea, mediante pozos de mediana a gran profundidad, los cuales requieren de la definición de sus zonas de protección, y verificación de su vulnerabilidad, por motivos de usos del suelo y el régimen de bombeo a que son sometidos.

Los conos de bombeo de los pozos que abastecen al municipio de la Tebaida bajo el régimen de explotación permanentemente a que son sometidos, se superponen creando un cono de abatimiento semi - regional a local, el cual hidráulicamente, puede conectarse con otros pozos o fuentes de contaminación difusa o puntuales en superficie.

Cabe destacarse que en la actualidad la disposición final de los residuos sólidos a cielo abierto, y otras obras de infraestructura básica, como letrinas, tanques sépticos y vertimientos del beneficio del café, que también constituyen focos de

contaminación puntual y/o difusa, se realizan en parte de la zona de influencia del acuífero captado por los aljibes y pozos, por lo que requieren ser manejados ambientalmente, mediante la definición de la vulnerabilidad y la definición de sus zonas de protección.

El avance en el estado del conocimiento hidrogeológico del área de estudio, permitirá diagnosticar, definir e implementar las zonas de protección de las aguas subterráneas, de acuerdo a su estado de vulnerabilidad a partir de un modelo hidrogeológico conceptual y del acuífero, que conducirá a formular una red integral de monitoreo del recurso hídrico subterráneo. Este será utilizado por los planificadores de la región (C.R.Q.), como una herramienta valiosa en la toma de decisiones de la actividades a ejecutar, dentro del plan de reconstrucción de la región.

En el país se dio un paso importante en la gestión y conservación del medio ambiente, a partir de la Constitución de 1991, la Ley 23 de 1973 que contienen una serie de útiles pronunciamientos y definiciones legales sobre medio ambiente, contaminación y recursos naturales; así mismo tienen en cuenta para el anterior análisis las normas del Código Sanitario Nacional (L.9°/79), que incluye la regulación de numerosos elementos ambientales y los decretos reglamentarios de ambos códigos.

En los nuevos Planes de ordenamiento territorial (POT), la cuenca es núcleo esencial del desarrollo económico, social y ambiental del municipio, por lo tanto se debe tener en cuenta el marco hidrogeológico de la misma que permita planificar el uso y manejo y aprovechamiento del recurso agua, compatibilizando las demandas actuales y futuras que exige el desarrollo social y económico con la oferta del recurso, proponiendo las acciones conducentes a incrementar su disponibilidad la protección de las fuentes, el mejoramiento de su calidad y su utilización.

Por ello la importancia del desarrollo e implementación de métodos de delineación para el manejo de las aguas subterráneas, los cuales requieren la aplicación de técnicas de modelación prácticas, para definir las zonas de protección, de las aguas subterráneas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Identificar, evaluar y desarrollar un método hidrogeológico y ambiental de las zonas de protección, de acuerdo a su vulnerabilidad, de las aguas subterráneas del municipio de la Tebaida.

1.3.2. Objetivos específicos.

- * Conceptualizar una metodología que defina las zonas de protección de las aguas subterráneas.
- * Zonificar según las zonas de protección, la vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico subterráneo en el municipio de la Tebaida.
- * Determinar las áreas donde se puedan construir pozos de mediana a gran profundidad desde el punto de vista ambiental e hidrogeológico para el municipio de la Tebaida.

1.4. DELIMITACIONES

1.4.1. Delimitación temporal

Para el desarrollo del trabajo se implementó una metodología conceptual y aplicada, de recopilación, análisis y descripción de la información temática como la interpretación de los datos obtenidos en campo, con una duración aproximada a los ocho meses.

1.4.2. Delimitación espacial

El área corresponde al acuífero Glacis del Quindio (TQgp), está ubicado en el municipio de la Tebaida y parte sur - occidental del municipio de Armenia, en un sector perteneciente a la cuenca de la Quebrada Cristales, afluente del río la vieja, en el Departamento del Quindío.

1.5. METODOLOGIA

Es de tipo descriptivo – evaluativo, donde se recopila la información existente, y se procede a interpretar, analizar y evaluar para determinar un modelo hidrogeológico conceptual y aplicado, al acuífero Glacis del Quindío.

El trabajo consistió en la identificación en campo de los usos del suelo y determinar las causas primarias de la contaminación al interior del área del acuífero, y posteriormente realizar el análisis secundario sobre la información

existente (mapas temáticos, cartografía básica, estudios geográficos y de exploración y evaluación de aguas subterráneas) y proceder a definir las zonas de protección del área de estudio.

1.6. PROPOSITO

Con el presente trabajo se pretende capacitar y estimular a los profesionales de la carrera de Ingeniería Ambiental, administradores de la gestión ambiental en los municipios Colombianos, y interesados en el área de las aguas subterráneas, en el manejo de algunas técnicas prácticas para definir las zonas de protección de los acuíferos, además de resaltar sobre la importancia y necesidad de proteger este recurso invaluable. Así mismo, que sirva de guía de consulta, para los estudiantes, sobre como utilizar bases técnicas para definir procedimientos documentados para la delineación de las zonas de protección de los acuíferos, comprender la base de los mapas de vulnerabilidad y su utilización, y definir zonas de protección utilizando un programa de aguas subterráneas computarizado.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. GENERALIDADES

El desarrollo de la hidrogeología, aparece ligado al de la hidrología, por una parte, con el concepto central y básico del ciclo hidrológico y al de la geología por otro, con los conceptos de estructura y características de las rocas (BISWAS, 1970).

El desarrollo agrícola e industrial de un pueblo, el continuo mejoramiento de su estándar de vida y el rápido crecimiento de la población trae como resultado un crecimiento en la demanda de agua.

La eficiente satisfacción de dicha demanda exige un completo conocimiento de la magnitud de los recursos disponibles y su variación en el tiempo y en el espacio. Esto implica llevar a cabo un estudio completo del ciclo hidrológico en nuestro planeta a escala global y local, respondiendo a la pregunta de cuáles son nuestros recursos de agua disponibles y cómo están distribuidos.

Los estudios hidrogeológicos en el país no abarca mas del 15% del total de áreas con posibilidades de aguas subterráneas en el territorio nacional (414.375 km²= para la cual se han estimado unas reservas totales de 140.879 km³ que equivalen a cerca de 70 veces el total de aguas superficiales del país, estimadas en 2.097 km³ (Marín, 1992; INGEOMINAS, 1997).

Desde el punto de vista global, varios investigadores han calculado independientemente los recursos hídricos, llegando a cifras más o menos similares.

Se estima que el agua en la hidrosfera de la tierra, en términos volumétricos, es del orden de 1337 millones de kilómetros cúbicos, de los cuales 1300 millones, el 97.2% es agua salada de lagos y océanos.

Podemos observar entonces que solamente 37 millones es decir, 2.8% del total, es agua dulce. Más aún, una gran parte del agua dulce 28.5 millones cúbicos, consta de agua difícilmente accesibles o utilizable y es aquella acumulada en los polos, los glaciares y la atmósfera. Esto significa que no más de 0.61% (8.2 millones de kilómetros cúbicos), de los recursos totales de agua de la tierra, es aprovechable bajo las actuales circunstancias.

En la actualidad se puede disponer únicamente de esos 8.2 millones de Km³ los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

Lagos de agua dulce	123.000 Km ³
Ríos	1.230 "
Humedad del suelo	65.000 "
Agua subterránea (hasta 800 m de profundidad)	4'000.000 "
Agua subterránea a mayor profundidad	4'000.000 "
TOTAL	8'189.230 Km ³

Podemos concluir que el 98.48% (8'605.000Km³), del agua dulce utilizable en nuestro planeta, es agua subterránea.

Las cifras citadas arriba no deben considerarse como volúmenes estáticos de agua sino como una presentación de los diferentes volúmenes existentes en el ciclo hidrológico "dinámico", continuamente renovados.

Otro cálculo comparativo que permite apreciar la enorme magnitud de las reservas subterráneas de agua dulce, establece que el agua subterránea existente en el globo terrestre hasta una profundidad de 800 metros, es equivalente a la descarga total de todos los ríos de la tierra durante 132 años.

El agua subterránea está presente donde quiera que puede penetrar bajo la superficie del suelo en rocas lo suficientemente porosas permeables como para permitir el flujo del agua a través de ellas.

La geología controla la presencia y distribución del agua en las rocas; la hidrología determina el suministro de agua al subsuelo, y la mecánica de fluidos explica las leyes que rigen su movimiento.

Corresponde a la hidrogeología ligar los conocimientos de estas tres ciencias y aprovecharlos para estudiar el agua subterránea en las diferentes etapas de exploración, evaluación y aprovechamiento, etapas que se cumplen gracias al concurso de otras disciplinas especializadas tales como la geofísica, la química y las matemáticas, para mencionar sólo tres de ellas.

Las aguas subterráneas se forman, en primera instancia, por la "percolación" de las aguas en superficie, sean éstas de origen pluvial o fluvial. Percolación es el descenso de líquidos por los medios permeables saturados de agua.

El proceso que le sigue es la infiltración, las aguas en su trayectoria hasta los acuíferos pasan por medios impermeables, haciendo este descenso lento; se puede ejemplificar como si debiera pasar por una fina trama de tul mezclado con

restos de arcilla; los diminutos intersticios de la trama se bloquearán por la mezcla de sólidos y líquidos, haciendo el descenso más dificultoso.

Durante el descenso de las aguas con mayor o menor velocidad, es decir, al "percolar" y luego "infiltrar", se van purificando debido a que los estratos sedimentarios (capas compuestas por diversos materiales y minerales de diferentes tiempos geológicos) actúan como "filtros naturales", por ésta razón las aguas más profundas son más puras.

Recordemos que toda acción o actividad en el medio provoca un "impacto" no solo en superficie, sino que directa o indirectamente se notarán tales efectos en el interior terrestre porque el agua actuará como conductor.

Las aguas subterráneas cumplen un rol importante, y en numerosos casos vital, para el suministro de agua potable de muchas áreas urbanas y rurales de Colombia. Sin embargo, en la mayoría de los casos se ha prestado poca atención a la prevención de la contaminación de las mismas fuentes de aguas subterráneas, y aún menos, a la protección de los acuíferos en su conjunto. En algunas áreas, principalmente dentro de los grandes centros urbanos o en las áreas circundantes, ya se ha producido la contaminación de las aguas subterráneas, creando riesgos potenciales para la salud pública causando el abandono de las fuentes de suministro de agua existentes, con la consiguiente pérdida de inversión financiera y de recursos naturales. En lo que se refiere a las aguas subterráneas, la contaminación tiende a aparecer lentamente, pero es muy persistente y, en muchos casos, la purificación es técnicamente problemática, excesivamente costosa y con frecuencia poco práctica.

La contaminación más común de las aguas subterráneas está asociada con el saneamiento de áreas que no cuentan con alcantarillado, la disposición final de

efluentes líquidos industriales, y las actuales prácticas de cultivos agrícolas. El creciente incremento de las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas y los frecuentes episodios de penetración en la subsuperficie de hidrocarburos halogenados volátiles, plantean un serio peligro para la calidad del agua potable en relación con la normatividad actual para la potabilidad del agua establecidas por la OMS y las entidades de saneamiento básico y ambiental de Colombia.

2.2. EXPLORACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

La exploración de aguas subterráneas se interpreta como el conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se obtiene agua en cantidad y calidad con criterios para los diferentes usos y/o aprovechamiento.

Aunque el agua subterránea no puede ser vista desde la superficie de la tierra, una variedad de técnicas pueden suministrar información fundamental para su aprovechamiento.

2.3. ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS

Existen tipos diferentes de estudios que varían de acuerdo con los objetivos que se persiguen en la exploración (**Tabla 1**).

Tabla 1
Tipos de estudios hidrológicos

TIPO DE ESTUDIO HIDROGEOLOGICO	AREA	ESCALA	OBJETO
Preliminar o de Reconocimiento	Superior a miles de Km ²	1:200.000 a 1:100.000	Localización embalses subterráneos
Hidrológico general	Suele ser del orden de unos centenares o miles de Km ²	1:100.000 a 1:50.000	Cuantificación aproximada de embalse Subterráneos, inventario De pozos, fuentes, prospección geofísica, sondeos mecánicos, ensayos de bombeo y análisis químicos.
De detalle		1:25.000 a 1:10.000	Conocimiento pormenorizado del acuífero para permitir resolver una demanda de agua concreta para las diferentes actividades

2.4. MÉTODOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN DE AGUAS SUBTERRANEAS

Para obtener información de aguas subterráneas se utilizan varias técnicas desde las convencionales a especiales, como los métodos geológicos, geofísicos de superficie, hidroquímicos, teledetección, pozos experimentales, sondeos de

reconocimiento hidrológicos y trazadores. A continuación se hace una breve descripción de los métodos anteriores los cuales se han aplicado en el área del presente estudio y son la base para la definición del modelo hidrogeológico conceptual y la definición de la vulnerabilidad y las zonas de protección del acuífero Glacis del Quindío en el municipio de la Tebaida.

2.4.1. Métodos geológicos. Los métodos geológicos representan un primer paso importante en cualquier investigación de aguas subterráneas. Los mapas topográficos y geológicos así como las fotografías aéreas constituyen uno de los instrumentos básicos para el estudio de las aguas subterráneas.

* Mapas geológicos: consiste en registrar en un plano la naturaleza litológica estratigráfica y las características estructurales de los afloramientos de las rocas. De estos datos en conjunto con los de sondeos mecánicos y prospección geofísica deduce la profundidad, historia geológica de los materiales y los límites y tipos de las principales unidades hidrogeológicas. Los perfiles geológicos y los diagramas tridimensionales son muy útiles para adquirir una visión adecuada de la geometría de los acuíferos. Por lo general es útil que la escala vertical de los perfiles sean varias veces superior a la escala horizontal.

* Fotografías aéreas: la visión estereoscópica de las fotografías pone de relieve aspectos difíciles de ver sobre el terreno y permite identificar con nitidez:

a) la red hidrográfica

- b) algunas características litológicas o morfológicas de directo interés para las aguas subterráneas, como son: llanuras aluviales, conos de deyección, volcanes y coladas volcánicas, dunas, y formas Cársticas.
- c) características estructurales como escarpes de falla, diques, etc.

2.4.1.1. Características de las unidades geológicas. Las rocas sedimentarias tienen para el geólogo gran importancia y mayor para el hidrólogo, si se tienen en cuenta que las rocas eruptivas - con exclusión de algunos tipos de rocas volcánicas - y las rocas metamórficas son prácticamente impermeables mientras que las sedimentarias suelen originar buenos acuíferos como son las calizas, areniscas y arenas.

2.4.2. Métodos geofísicos. Es la técnica que a partir de fenómenos físicos naturales o provocados, trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades.

Los métodos de exploración geofísica se aplican con el fin de obtener información del subsuelo de una forma indirecta. Dentro de los métodos de exploración geofísica, el método de la resistividad geoelectrica es el más usado en la prospección de aguas subterráneas. Este método sirve para conocer en primera instancia, cualitativamente la litología del subsuelo de una área determinada. La prospección geoelectrica busca conocer el subsuelo mediante los contrastes entre características eléctricas de las rocas con base en la densidad, por lo que se puede inferir la existencia de capas permeables e impermeables, lo que se

reflejará en una mayor o menor conductividad (o su inversa la resistividad), eléctrica.

El sondeo eléctrico vertical (SEV), consiste en establecer una curva de la variación de la resistividad aparente con la profundidad de un terreno, a partir de medidas hechas en la superficie del mismo.

Para llevar a cabo lo anterior, se introduce una corriente eléctrica en el subsuelo mediante dos electrodos de corriente (A y B) y dos de potencial (M y N), para obtener la diferencia de potencial. Los electrodos se ubican a unas distancias previstas y pueden variar según las condiciones de campo. La distancia media entre los electrodos de corriente es proporcional a la profundidad de investigación.

2.4.2.1. De superficie: la prospección geofísica de superficie no suelen indicar datos directamente hidrogeológicos, indican variaciones en las constantes físicas del terreno que primero es preciso interpretar, relacionarlas con la geología y luego con la presencia de aguas subterráneas.

Las investigaciones de aguas subterráneas desde la superficie en general son parcialmente exitosas, y sus resultados conducen usualmente a un retrato hidrogeológico incompleto. Sin embargo éstos métodos son normalmente menos costosos que investigaciones subsuperficiales.

Hay dos técnicas geofísicas que son utilizadas ampliamente en la exploración de acuíferos. Son los métodos de resistividad eléctrica y de refracción sísmica, que se muestran a continuación:

a) Resistividad eléctrica: con éste método se obtiene una interpretación geohidrogeológica del subsuelo, haciendo posible la localización de zonas saturadas con agua e incluso se puede inferir sobre la calidad del agua subterránea presente en lo que se refiere a agua dulce.

El empleo de éste método permitirá racionalizar cualquier inversión que se haga de un pozo, ya que sólo se recomendará perforar si existe agua subterránea disponible. Además sólo se perforará hasta la profundidad ideal y en el mejor sitio dentro del predio investigado.

En una roca o suelo saturado, la resistividad depende en gran medida de la densidad de la porosidad del material y de la salinidad del fluido saturante.

En la **(tabla 2)** se muestran valores típicos de resistividad para diversos tipos de aguas de formaciones geológicas que sirven de orientación a una interpretación geofísica.

Este método también utiliza un sistema con separación de electrodos fijos los que se utilizan para definir los límites del acuífero o mapear variaciones areales en la salinidad de las aguas subterráneas.

En áreas urbanas el método es distorsionado por la presencia de líneas eléctricas tuberías, líneas férreas que interfieren con líneas de corriente. Las interpretaciones estratigráficas basadas sobre medidas sísmicas o de resistividad eléctrica deberán ser calibradas contra la información obtenida en el pozo prueba.

b) Refracción sísmica: este método se basa en las ondas elásticas que viajan a través de diferentes materiales y con distintas velocidades. Es un material más denso, mayor será la velocidad de la onda. En la exploración sísmica las ondas

elásticas son iniciadas por una fuente de energía, usualmente una pequeña explosión de dinamita en la superficie del terreno, un juego de receptores llamados geófonos se colocan en una línea de radiación fuera de la fuente de energía. El tiempo entre el choque y la onda de llegada de la onda elástica en un geofono es registrado en un sismógrafo.

Tabla 2

Rangos de resistividad de formación esperados según el tipo de agua y el factor de formación F

LITOLOGIA	F	TIPO DE AGUA	RESISTIVIDAD DE LA FORMACION (Ohm.m)
Limos	2	Dulce	Más de 22
		Poco dulce	16 – 22
		Salobre	5 – 16
Arenas finas	3	Dulce	Más de 33
		Poco dulce	24 – 33
		Salobre	7.5 – 24
Arenas medias	4	Dulce	Más de 44
		Poco Soluble	32 – 44
		Salobre	10 – 32
Arenas gruesas	5	Dulce	Más de 55
		Poco dulce	40 – 55
		Salobre	12.5 – 40
Gravas	6	Dulce	Más de 66
		Poco dulce	48 – 66
		Salobre	15 – 48
Rocas poco compactas	7	Dulce	Más de 77
		Poco dulce	56 – 77
		Salobre	17.5 – 56
Rocas compactas	8	Dulce	Mas de 110
		Poco soluble	80 – 110
		Salobre	25 – 80

En investigaciones de aguas subterráneas el método de refracción sísmica ha sido utilizada para determinar características como profundidad del zócalo, espesor de zonas de fracturas superficiales y extensión areal de acuíferos potenciales principalmente en estudios regionales. Las interpretaciones son más confiables en casos donde existe una configuración geológica de 2 o 3 capas en que los estratos exhiben un fuerte contraste en velocidad sísmica.

2.4.2.2. De subsuperficie. Esta técnica involucran registros y pruebas en pozos construidos. Los registros de sondeos sirven para averiguar las características del mismo y de terrenos difíciles o imposibles de obtener a base de testigos recuperables, lo que es una importante razón para su creciente aplicación. Existen registros de temperatura, salinidad, eléctricos, radiactivos, geoeléctricos de sondeo, magnéticos, sónicos y visuales. En estudios hidrogeológicos los más utilizados son los eléctricos y los radiactivos.

a) registros eléctricos: en este método se aprovechan ciertas propiedades eléctricas de las formaciones atravesadas y la calidad de aguas contenidas en éstas, en la construcción de un pozo. Estas propiedades son medidas con dos o más electrodos que son introducidos dentro del pozo por medio de cables eléctricos o cables multiconductores aislados, y al subirlos van registrando los valores que se obtienen en cada formación.

Generalmente el registro eléctrico presenta dos gráficos diferentes; la resistividad con la sonda corta y larga y el potencial espontáneo, ambos son registrados simultáneamente en un solo viaje del instrumento. Esta mediciones sólo pueden realizarse en pozos de prueba y provistos de lodo.

b) Registros radiactivos - registro de rayos gamma: es la medida de la radiactividad natural de las formaciones.

c) Aplicaciones:

- * Localiza los estratos de lutita, cuando la curva del potencial espontáneo está en formaciones muy resistivas o cuando no tiene expresión por ser la resistividad del filtrado de lodo muy semejante a la del agua intersticial.
- * Algunas veces es usado en operaciones en que se utilizan trazadores radiactivos.

Un programa completo de registros de pozo en hidrogeología incluye usualmente dos registros eléctricos - potencial espontáneo y resistividad con sonda normal larga y corta, una de radiaciones - rayos gamma y un registro caliper que indica variaciones en el diámetro de sondeo. En la **(tabla 3)** se muestran los resultados obtenidos de un cuadro completo y su interpretación.

2.4.3. Métodos de hidrología de superficie. Suministran información referente a la ubicación de las aguas superficiales y caudal de los manantiales - denominados en nuestra región como nacederos o nacimientos -, son muy importantes, pues resumen en muchos aspectos las condiciones hidrogeológicas de la zona. Son de interés y en general son aliviaderos o líneas de drenaje de los acuíferos más someros.

2.4.4. Métodos hidroquímicos. La calidad del agua suele ser tan importante como su cantidad. Por ello se debe programar adecuadamente la toma y análisis sistemática de muestras de agua, que permitan conocer su variación en tiempo y espacio.

Tabla 3

Programa tipo de testificación geofísica para hidrogeología

REGISTROS		PRINCIPALES INFORMACIONES QUE PROPORCIONAN
Potencial Espontáneo		<ul style="list-style-type: none"> Resistividad ρ_e calidad del agua de las capas
Resistividad	Normal corta	<ul style="list-style-type: none"> Límite de las capas. Resistividad ρ_i de la zona invadida por el lodo. Factor de formación (ρ_i/ρ_b) y porosidad.
	Normal larga y/o lateral	<ul style="list-style-type: none"> Resistividad ρ de las capas. Factor de formación (ρ/ρ_e) y porosidad.
	Normales corta y larga	<ul style="list-style-type: none"> Resistividad ρ_e del agua de las capas. Localización de zonas permeables (detección de zonas invadidas por el lodo por comparación de los registros normales cortos y largos).
Rayos gamma		<ul style="list-style-type: none"> Contenido en arcilla de las formaciones. Distinción entre arcillas y acuíferos de agua salada, ambos conductores.
Caliper		<ul style="list-style-type: none"> Util para la interpelación de registro eléctrico y de rayos gamma. Localización de zonas arenosas o fracturadas en areniscas, calizas o lavas.

REGISTROS	PRINCIPALES INFORMACIONES QUE PROPORCIONAN
Velocidad del agua	Estimación del caudal relativo de los diferentes acuíferos.

2.4.5. Métodos hidrogeológicos propiamente dichos. Los datos básicos sobre los parámetros geométricos e hidrogeológicos de un embalse subterráneo y sobre su funcionamiento se obtienen fundamentalmente sobre una red de pozos de observación y/o piezómetros.

Los pozos de observación y los piezómetros pueden proporcionar los siguientes datos: a) espesor total o parcial de los acuíferos y sus oscilaciones de nivel; b) el valor aproximado de su permeabilidad o transmisividad y su coeficiente de almacenamiento, y c) obtener muestras de agua.

Dentro del método hidrogeológico: a) las pruebas de bombeo; b) piezómetros, y c) pozos de observación.

2.4.5.1. Inventario de pozos. Los pozos ya construidos se convierten en la principal información para el comienzo de las actividades de exploración. De estos pozos se obtiene información como: localización y profundidad del pozo, perfil de las capas geológicas penetradas, nivel estático del agua, descarga y nivel de bombeo, calidad, rendimiento de los acuíferos, tipo de construcción, diámetro de la tubería de revestimiento, longitud de los filtros y abertura de las ranuras utilizadas; de interés adicional para la investigación o estudio del área por perforar lo constituyen las características hidráulicas tales como la capacidad

específica, permeabilidad y transmisividad de la capa acuífera, las variaciones de rendimiento y los problemas presentados durante la construcción del pozo.

2.4.6. Técnicas especiales. Existen varias técnicas, de las cuales destacamos:

a) Trazadores: son sustancias que se le agregan al agua subterránea para

seguir el movimiento del mismo, estas sustancias se pueden identificar y medir con facilidad y al mismo tiempo, éstas tienen que ser capaces de moverse a la misma velocidad del agua en estudio. Estos trazadores pueden ser añadidos artificial o naturalmente como los radioisótopos. Los trazadores permiten medir la velocidad de movimiento del agua subterránea, su dirección, porosidad del medio, permeabilidades relativas al estudio de la anisotropía, heterogeneidad de acuíferos, mezclas de agua y velocidades de tránsito, entre otros.

b) Teledetección: constituye una especie de prolongación de la fotografía, bien sea captada la emisión desde un avión o desde un satélite. Existen varias clases de fotografías como son la pancromática, espectro múltiple, color, infrarroja y la de la radiometría y termografía infrarroja a la hidrología en general.

Las fotografías en color son eficaces para facilitar el estudio de la geología en las zonas donde el contraste de color es fuerte y cuando La zona por estudiar es extensa.

La termografía con rayos infrarrojos parece resultar un útil instrumento de exploración cuando existe un contraste de temperatura entre las características geológicas o hidrogeológicas a investigar. Estas diferencias han ayudado en

algunos casos a localizar fallas, contactos entre distintos tipos de rocas, cauces abandonados de ríos, entre otros

2.5. CONCEPTO DE VULNERABILIDAD

En vista de la complejidad de los factores que afectan el transporte de contaminantes en el subsuelo y la singularidad de cada situación, puede parecer más lógico tratar cada actividad individualmente y realizar evaluaciones independientes de los requerimientos para el control de la contaminación. Sin embargo, este tipo de planteamiento requiere un gran número de recursos humanos, una mayor inversión que puede generar problemas administrativos cuando la responsabilidad institucional es compartida.

Se requiere entonces un marco general dentro del cual se manejen las políticas de protección y se dé prioridad a las medidas de control, con el fin de lograr una cobertura universal y evitar decisiones inconsistentes. Una clasificación de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación ofrece el elemento central para este propósito.

“La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se ha definido ya; “como un conjunto de características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del suelo y que determinan la sensibilidad del acuífero al efecto adverso de la aplicación de una carga contaminante”

Hay que considerar la vulnerabilidad del acuífero en interacción con la carga contaminante que es, será o sería aplicada al subsuelo como resultado de la actividad humana que ocasiona un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. **(El término "riesgo de contaminación de las aguas subterráneas se define": como la probabilidad de que el acuífero, aunque no necesariamente una captación de agua, se contamine a niveles inaceptables).** Al adoptar tal esquema, podemos tener una elevada vulnerabilidad sin riesgo de contaminación, por la falta de una carga contaminante significativa y viceversa. Ambos son perfectamente lógicos en la práctica.

Dado que la carga contaminante puede controlarse, las estrategias de protección de las aguas subterráneas contra la contaminación intentan lograr dicho control conforme sea necesario, tomando en cuenta la vulnerabilidad del acuífero y su capacidad natural de atenuación de los contaminantes.

Sin embargo, si la protección del recurso hídrico subterráneo tiene un fundamento, se debe recordar que el concepto de la vulnerabilidad general a un contaminante universal en un escenario típico de la contaminación. Todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes en el largo plazo. Además, los acuíferos que podrían considerarse generalmente como menos vulnerables a la contaminación de acuerdo a éstos términos tienden a ser los más difíciles de rehabilitar si se contaminan.

No obstante, se considera que la vulnerabilidad general de los acuíferos a la contaminación es un concepto útil que sirve como base para la implementación de una política de protección de los acuíferos **(Anexo - Figura 1)**. En primer lugar y por lógica es función de:

a) la accesibilidad de la zona saturada del acuífero a la penetración de contaminantes en un sentido hidráulico.

b) La relativa capacidad de atenuación de los estratos que yacen sobre la zona saturada del acuífero, como resultado de la retención física y la reacción química de los contaminantes; esta zona favorece la atenuación o eliminación de la contaminación porque el movimiento del agua es generalmente lento y restringido a los poros más pequeños con mayor superficie específica (**Anexo - Figura 2**).

Por estas consideraciones es conveniente caracterizar la vulnerabilidad del acuífero con base a los siguientes parámetros que están generalmente disponibles o pueden ser fácilmente determinados:

- a) el grado de confinamiento de las aguas subterráneas
- b) las características generales de los estratos sobre la zona saturada, en términos del tipo litológico y el grado de consolidación (**Anexo - Figura 3**)
- c) la profundidad del nivel freático o el techo del acuífero confinado.

Este esquema de clasificación de la vulnerabilidad del acuífero no incluye una consideración del suelo biológicamente activo. Se acepta que muchos procesos que producen eliminación y atenuación de la contaminación subterránea ocurren a tasas máximas en esta zona, como resultado de su mayor contenido de materia orgánica y arcilla, y una mayor población de bacterias. En muchas fuentes puntuales de contaminación sin embargo, la carga contaminante subterránea se aplica por debajo del suelo en base de las excavaciones (tales como fosas, zanjas, lagunas, sumideros y canteras) y la capacidad de atenuación de esta zona no contribuye a reducir la vulnerabilidad del acuífero, excepto en el caso de contaminación dispersa por cultivo agrícola del suelo (**Anexo - Figura 1**).

Se consideran los estratos que separan el acuífero saturado y la superficie del terreno (es decir la zona no saturada o las capas confinantes) y el número de subdivisiones litológicas.

2.6. CONCEPTOS GENERALES DE PROTECCION DE LOS ACUIFEROS

Una diversidad de sustancias químicas tanto sintéticas como naturales, bacterias y virus pueden degradar la calidad del agua de los acuíferos. Una vez que la contaminación ha ingresado a un acuífero, la remediación, la eliminación de los contaminantes, es extremadamente difícil. La remediación implica usualmente un alto costo financiero y puede no ser factible desde el punto de vista técnico. La idea básica de la protección de los acuíferos es impedir que los contaminantes entren al agua subterránea, preservando así la calidad del recurso hídrico y asegurando que no se requerirán costosas medidas de limpieza.

Un método que permite asegurar la completa protección del agua subterránea consiste en prohibir o controlar las actividades potencialmente contaminadoras al interior del área del acuífero. Sin embargo la mayoría de las actividades basadas en el uso de la tierra, tales como la agricultura, la construcción de viviendas, la actividad forestal, la construcción de vías y caminos, los ferrocarriles, las fábricas y las oficinas pueden ocasionar la contaminación de un acuífero. La solución simplista de aplicar una prohibición consistiría en prohibir estas actividades. Una estrategia más avanzada permitirá proteger los recursos de agua subterránea sin afectar la continuación de la mayoría de las actividades basadas en el uso de la tierra (CEPIS)

2.6.1. Estrategia global: El mejoramiento de la protección de las aguas

subterráneas contra la contaminación grave es una tarea difícil, que abarca conceptos complejos y generalmente no comprendidos. Pueden seguirse dos estrategias independientes pero interrelacionadas; éstas son la protección de:

- a) el recurso hídrico subterráneo o todo el acuífero
- b) las captaciones de agua subterránea, es decir, aquellas partes del acuífero donde se explota el recurso para un determinado tipo de abastecimiento de agua.

Esta última estrategia se considera como una protección especial y adicional, complementaria de la primera. Se debe hallar un equilibrio realista entre ambas, según las circunstancias locales.

Los acuíferos se encuentran protegidos naturalmente contra la contaminación de su agua subterránea por la zona no saturada o las capas impermeables ubicadas sobre ellos (en el caso de los acuíferos no confinados/freáticos y los acuíferos confinados/artesianos, respectivamente). El grado de protección contra un determinado contaminante varía según el tipo de perfil del suelo y el material de cobertura del acuífero. También varía considerablemente según el tipo y modo de descarga del contaminante.

La necesidad de lograr la máxima protección del acuífero dependerá también de la utilización actual o proyectada de las aguas subterráneas. Una política de protección de las captaciones de agua normalmente se aplica sólo a los pozos y manantiales de gran caudal que están siendo explotados como fuentes de agua potable. Se implementa ejecutando controles y/o supervisión sobre las actividades humanas desarrolladas en zonas definidas alrededor de la captación, cuyo tamaño se calcula en base a la velocidad estimada del flujo horizontal del agua subterránea en el acuífero (**Anexo – Figura 1**).

Con respecto a la protección del recurso hídrico subterráneo, es necesario zonificar el terreno en relación con su vulnerabilidad a la contaminación (**Anexo -**

Figura 1). esto permitirá una asignación lógica de las medidas prioritarias de control y evitará la introducción de políticas innecesariamente restringidas en áreas de baja vulnerabilidad. La estrategia global consiste en establecer control sobre las actividades que representan fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas, de acuerdo con su localización en relación a tales zonas.

En las áreas altamente urbanizadas e industrializadas o con cultivos agrícolas intensivos, las zonas servirán para definir prioridades para el reconocimiento de la carga contaminante al subsuelo, realizar un inventario de los productos químicos peligrosos e instalar un sistema monitoreo del acuífero. Dichas acciones serán necesarias normalmente antes de tomar decisiones racionales y acciones justificadas para la implementación de las medidas de control de la contaminación derivada de las actividades existentes.

En consecuencia, en la formulación de las políticas de protección de las aguas subterráneas, el prerequisite básico es:

- a) la clasificación y el mapeo de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.
- b) La definición de zonas especiales de protección alrededor de las captaciones, como pozos y manantiales importantes.

Aunque las estrategias de protección del recurso hídrico subterráneo y de las captaciones de aguas subterráneas son complementarias, el énfasis en una u otra dependerá del estado de desarrollo del recurso hídrico subterráneo y de las condiciones hidrogeológicas.

Una estrategia orientada a la protección de las captaciones es más indicada para los acuíferos relativamente uniformes y no consolidados, explotados únicamente mediante un número fijo y reducido de pozos de alto rendimiento para abastecimiento municipal, con regímenes estables de bombeo. También son muy

apropiados en regiones escasamente pobladas, donde su definición podría ser relativamente conservadora sin producir serios conflictos con otros intereses.

La misma estrategia no es factible en los casos en que existe un número de captaciones individuales elevado y en constante aumento, que hace impracticable el establecimiento de zonas individuales de protección. Además, debido a deficiencias de información de las dimensiones requeridas para las zonas de protección es inadecuada sin una costosa investigación en terreno. Sin embargo, debe notarse que esta estrategia es incorporada indirectamente en los reglamentos sobre la mínima separación entre las captaciones de aguas subterránea y las instalaciones de saneamiento in - situ.

Las estrategias orientadas a la protección de los acuíferos (en lugar de captaciones solamente) son de aplicación más universal, dado que intentan lograr un grado de protección para el recurso hídrico subterráneo completo y para todos los usuarios de las aguas subterráneas.

Se debe reconocer que suelen existir zonas limitadas de acuíferos cuya protección no se justifica porque la calidad de su agua es naturalmente inferior o ya ha sufrido un deterioro excesivo. En tales zonas, una estrategia posible es prohibir la explotación de las aguas subterráneas para uso potable y permitir la descarga de efluentes al suelo como una forma de eliminación de bajo costo. Sin embargo, esta política requiere un cuidadoso planeamiento y control para evitar riesgos serios asociados con :

- a) el uso de pozos como fuente doméstica de agua en períodos de sequía, cuando la demanda excede el suministro.

- b) El cambio en la orientación del flujo de aguas subterráneas hacia otras zonas de captación.

c) Contaminación de los acueductos de agua potable debido a un aumento de la contaminación del agua subterránea en los niveles freáticos del subsuelo.

El área de protección más amplia que se puede definir para un pozo o manantial es la de captación y recarga. Esta es el área dentro de la cual se captará toda la recarga del acuífero, ya sea proveniente de la precipitación o la infiltración de agua superficial. No deberá confundirse esta área con la de interferencia hidráulica causada por el bombeo de un pozo, que es más grande.

Las zonas de captación de los pozos tienen significación no sólo en términos de la protección de la calidad de las aguas subterráneas, sino también con relación con la gestión de los recursos hídricos subterráneos. En áreas que experimentan una extracción intensiva también pueden ser utilizadas para el control de la explotación.

Para eliminar completamente el riesgo de contaminación, toda actividad parcialmente contaminadora tendrá que ser prohibida o controlada al nivel requerido dentro de toda zona de captación. Esto será frecuentemente insostenible debido a presiones socioeconómicas a favor del desarrollo. Se requerirá efectuar alguna división de la zona de captación para aplicar restricciones más severas en aquellas áreas cercanas al pozo o manantial.

2.7. MARCO LEGAL

En las últimas décadas el hombre se ha constituido en el gran enemigo del medio ambiente a través de sus operaciones destructivas de la naturaleza. Ante ésta situación mundial los Estados han iniciado la protección de los recursos naturales con la expedición de normas para los no renovables y renovables.

Con estas disposiciones jurídicas la humanidad pretende poner freno al espíritu devastador del mismo hombre, para que los pueblos y las naciones vivan en un ambiente globalmente sano como derecho fundamental para asegurar la subsistencia. El derecho a disfrutar y a vivir en un ambiente sano debe ser considerado como un derecho humano básico.

Si no hay un ambiente sano y limpio, el ser humano no puede gozar de la libertad y seguridad social. Infortunadamente la crisis económica y la pobreza absoluta de varios pueblos han contribuido al deterioro ambiental.

Desde los años 40 se han expedido decretos sobre legislación ambiental, pero solamente a partir de 1973 se expidió una Ley que consagró rigurosos principios para proteger el medio ambiente en Colombia, la Ley 23 del 73. Por primera vez

en su artículo 30 dispone que el medio ambiente es patrimonio común y en su conservación participará el Estado y los particulares. Además, facultó al gobierno para expedir el Código de los Recursos Naturales.

El Código de los Recursos Naturales recogió grandes principios ya contenidos en el Código Civil y buscó adaptar esa normatividad a los nuevos tiempos. Con la expedición de la Ley 99 de 1993 que creó el Ministerio del Medio Ambiente, se llenaron los vacíos que el Decreto 2811 de 1974 no reguló.

Las licencias ambientales dejaron de ser un dolor de cabeza para los sectores productivos por cuanto el Ministerio del Medio Ambiente han expedido una compleja legislación, donde se establecen los procedimientos a seguir.

Estas normas son un gran instrumento de trabajo para todas las empresas y entidades cuyas actividades puedan causar impacto sobre los recursos renovables. Por lo tanto, conocer la legislación ambiental con esta compilación es sinónimo de grandeza patria para la preservación del medio ambiente.

La Constitución Política de 1991, conocida como < **La carta más verde del mundo, con páginas blancas para la ecología**>, hizo una amplia referencia en casi cuarenta artículos del texto definitivo y cuatro transitorios sobre la importante temática, que se agrupan para una mejor comprensión y detalle, así:

* Artículos referentes a los principios, derechos, deberes y participación democrática: (arts. 1 y 13), (art. 7), (art. 8), (art. 11), (art. 44), (arts. 49 y 50), (art. 58), (art. 64), (arts. 65 y 66), (art. 67), (art. 69), (art. 71), (art. 79), (art. 80), (art. 82), (arts. 86 y 89), (arts. 95 y 98), (art. 103).

* Artículos referentes al ámbito espacial, su relación de pertenencia y los habitantes: (arts. 75 y 76), (art. 101).

* Artículos referentes a la administración de los recursos: (art. 113), (art. 115), (art. 116), (arts. 200 y 3), (arts. 150 y 3), (art. 215), (art. 226), (art. 289), (arts. 300 y 2), (arts. 305 y 6), (art. 302), (art. 306), (arts. 313 y 9), (arts. 315-2-3 y 5), (arts. 318 y 319), (arts. 313 y 2), (art. 317), (art. 328), (art. 330), (art. 331), (art. 310 y transitorio No 42).

* Artículos referentes a los organismos de control de los recursos: (art. 117), (art. 118), (arts. 227-4 y 7), (arts. 278-4), (arts. 282-2), (art. 119), (art. 267), (arts. 268-7).

* Artículos referentes a la hacienda pública y a los planes de desarrollo: (art. 334 similar al 32 CN-86), (art. 340), (arts. 322, 328 y 330), (arts. 356 y 357), (art. 360), (art. 361), (art. 366).

2.7.1. RECURSO AGUA

2.7.1.1. Normas sobre aguas no marítimas

a) En el Código de los Recursos Naturales, en el Código Sanitario, en los Decretos reglamentarios respectivos y en la Ley 99 de 1993.

El Código de los Recursos Naturales (art.1, dice que la preservación y manejo de las aguas son de <utilidad pública e interés social>. Las normas del código que regulan la utilización de este recurso son los artículos 80 a 85, 86,87,88 a 98,99, 106 y 118, relativos a servidumbres de aguas; los artículos 119 a 131, sobre obras hidráulicas; 132 a 145, uso, conservación y prevención de aguas; 146 y 147, usos mineros; 148, aguas lluvias; 149 a 154, aguas subterráneas; 155 a 157, administración de las aguas y sus cauces, y 158 a 160, cargas primarias. En cuanto a las normas aplicables del Código Sanitario sobre el uso de las aguas y reglamentación de descargas y residuos, figuran los artículos 1 a 9, protección del ambiente y control sanitario de los usos del agua; 10 a 21, tratamiento legal de los residuos líquidos, y 22 a 39, regulación de los residuos sólidos.

La Ley 99 de 1993 trae una serie de directrices sobre el manejo y aprovechamiento de los distintos recursos naturales, entre ellos el recurso agua.

En los principios generales ambientales adoptados por dicho ordenamiento (principio 4°), se aclara que los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial, y luego, en el principio 5°, se esclarece que la situación de los recursos hídricos para el consumo humano tendrán prioridad sobre cualquier otro uso. Estos principios y demás normas de la Ley que indirectamente inciden sobre el recurso agua, servirán, sin duda, de base para promulgar la reglamentación en ésta materia, y en general serán útiles para ser considerados cuando se produzca cualquier tipo de normatividad referente al recurso en cuestión.

b) Reglamentación de las aguas para el consumo humano

En esta materia se deben acatar, entre otras, las disposiciones dictadas por los Ministerios de Salud y Medio Ambiente y por las autoridades territoriales en uso de sus funciones ambientales. Se debe tener en cuenta la utilización de las aguas que formule el usuario en las solicitudes que realice para obtener permisos, por ser necesarias para los proyectos mineros o agrícolas, sobre todo para atender el suministro habitacional de agua a los trabajadores de los campamentos.

También se determina por medio de este decreto la vigilancia y el control sanitario del agua que deben ejercer el Ministerio de Salud y las entidades encargadas del manejo y administración del recurso, EMAR, y la formas de aplicación de las medidas sanitarias, sus procedimientos, las sanciones, así como las formas para

la imposición de todas ellas; estas últimas pueden consistir en clausura temporal de establecimientos; suspensión parcial o total, de trabajos o servicios; decomiso de objetos o productos; destinación o desnaturalización de artículos o productos; congelación o suspensión temporal de la venta o empleo de productos y objetos.

c) Control de la calidad de las aguas

El artículo 163 del Código de Recursos naturales y los artículos 238 y 252 del Decreto 1541 de 1978, reglamentario del anterior en lo pertinente al recurso de aguas no marítimas, establecen ciertas medidas, como los análisis diarios de calidad de aguas arriba en la toma, los análisis de los índices de dotación o esterilización efectivos, la certificación de la potabilidad del agua y control periódico de la calidad de las mismas; estos requisitos son de gran utilidad para obtener un adecuado control de las aguas no marítimas. El procedimiento para la obtención de las concesiones de aguas se encuentra consagrado en los artículos 69 y 97 del Código de los Recursos Naturales y también en los artículos 54 a 66 del Decreto Reglamentario 1541 de 1978. Dicho procedimiento se establece con el fin de llevar un registro y control de calidad de aguas y de su adecuado manejo en todo el país.

d) Régimen sanitario del agua potable. Vertimientos

El Ministerio de Salud, con el fin de reglamentar el código Sanitario Nacional (L. 09/79) en lo referente al recurso aguas y a su control sanitario, ha elaborado las siguientes normas:

*** Decreto 1594 de 1984**

Fija pautas para la toma de decisiones en materia de ordenamiento y asignación del uso del recurso hídrico, y establece, además, el procedimiento para la implantación del referido ordenamiento. Se ocupa, igualmente, de normas específicas sobre vertimientos, de forzoso acatamiento por parte de los usuarios, ya sean éstos personas naturales o jurídicas de derecho público o privado.

Materias tratadas: Siguiendo la excelente técnica científica legislativa empleada en el Decreto 02 de 1982, reglamentario del recurso aire y emanaciones

atmosféricas, el Decreto 1594 de 1984, fija las normas básicas sobre el ordenamiento del recurso agua, la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas, marítimas, estuarinas y servidas, y los criterios de calidad que deben emplearse para el uso y destinación adecuados del recurso.

Por otra parte, el estatuto comentado asigna capítulos específicos para reglamentar la figura de la concesión de aguas desde el punto de vista sanitario, sobre el vertimiento de los residuos líquidos y sus registros. Otros capítulos se

refieren a la forma y oportunidad en que pueden obtenerse los permisos de aprovechamiento del recurso - tanto por su caracterización como el permiso definitivo - y también a las obligaciones existentes a cargo de los usuarios que deseen obtener estos permisos, o sea: la presentación de un plan de cumplimiento, el desarrollo del mismo y la estipulación de los planes en sus distintas etapas.

Los restantes capítulos trata de los permisos y autorizaciones sanitarias que deben obtener los usuarios nuevos o existentes para emprender ampliaciones o modificaciones en sus instalaciones.

Las autorizaciones sanitarias otorgadas por el Ministerio de Salud son: la autorización sanitaria de instalación - parte agua, la autorización sanitaria provisional de funcionamiento - parte agua, y la autorización sanitaria definitiva - parte agua. Las condiciones para el otorgamiento de las anteriores autorizaciones están determinadas en el mismo decreto, el cuál establece también que los usuarios del agua deberán presentar las solicitudes de su correspondiente autorización ante el Ministerio de Salud, por conducto de la respectiva entidad encargada del manejo administrativo del recurso, EMAR.

Finalmente, el decreto presenta las tasas retributivas que se causen por la utilización directa o indirecta de los ríos, arroyos, lagos y aguas subterráneas, para introducir o arrojar en ellos los desechos o desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen y sustancias nocivas que sean resultados de actividades lucrativas, así como algunas normas relativas a la forma como deben elaborarse los estudios de efecto o impacto ambiental y los métodos de análisis y toma de muestras de agua.

También se determina por medio de este decreto la vigilancia y el control sanitario del agua que deben ejercer el Ministerio de Salud y las entidades encargadas del manejo y administración del recurso, EMAR, y la forma de aplicación de las medidas sanitarias, sus procedimientos, las sanciones así como las formas para la imposición de todas ellas: estas últimas pueden consistir en clausura temporal de establecimientos; suspensión, parcial o total, de trabajos o servicios; decomiso de objetos o productos; destinación o desnaturalización de artículos o productos; congelación o suspensión temporal de la venta o empleo de productos y objetos.

*** Decreto 475 de 1998**

Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable.

Fija los criterios organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos de la calidad del agua potable.

e) Tasas retributivas del recurso agua

Por medio del decreto 901 de 1997 el Gobierno Nacional reglamentó las tasas retributivas por concepto de la utilización directa o indirecta del agua como receptor de vertimientos puntuales, según dice la norma su artículo 1°.

El estatuto contempla lo relacionado con el establecimiento de la tarifa mínima y su aporte regional; define además los sujetos pasivos de la tasa, los mecanismos para su recaudo y lo relativo a la fiscalización y control de cobro, o para terminar incluyendo un procedimiento especial para las reclamaciones que se susciten por cobros.

f) Clasificación de otras aguas no marítimas

Veamos ahora algunas normas legales aplicables a las demás clases de aguas que regula el Código de Recursos Naturales.

1- Aguas subterráneas

Su uso requiere permiso otorgado por la autoridad ambiental correspondiente. El régimen legal sobre el particular está instituido en los artículos 149 a 154 del código de Recursos Naturales y en los artículos 146 a 154 del Decreto Reglamentario 1541 de 1978; además en los artículos 58 a 62 del Código Sanitario (L. 9°/79).

2) Agua para usos mineros

Esta agua son susceptibles de ser otorgadas en concesiones; por ello es procedente tener en cuenta las normas que regulan concesiones de aguas para uso minero. Así mismo, es importante definir el sistema de desalinización o potabilización de aguas que se vayan a utilizar. Igualmente, se deben establecer los planes de contingencia referentes al cálculo de la población de los acuíferos, es decir de los individuos que habitan en el medio acuático en cada región. También es importante recordar que la calidad de las aguas de vertimiento no deberá ser menor que la tomada inicialmente del afluente.

3) Aguas negras

En cumplimiento de lo dispuesto en los artículos 36 a 40 del Código Sanitario (L. 9°/79) se deben prever algunas obras, como la construcción de un sistema de alcantarillado y disposición de aguas negras mediante pozos sépticos y una red de alcantarillado con pozos de aguas fecales, y además pozos de inspección de aguas fluviales. Todo esto con el fin de ajustarse a la legislación ambiental, especialmente al artículo 38 del Código sanitario que dice:

Se prohíbe colocar letrinas directamente sobre fuentes de agua (.....)

Y el artículo 39 *ibídem*, que establece:

Los residuos provenientes de la limpieza de sisternas de disposición de excretas con arrastre se ajustarán a lo establecido para los residuos líquidos

4) Los ríos

En cuanto a las normas aplicables para las actividades que tienen que ver con los ríos y las obras que en sus cauces o riberas se piensan realizar, como de forzosa aplicación, tenemos las siguientes:

- Los artículos 119 a 131 del Código de Recursos Naturales que regulan lo relativo a las obras hidráulicas, entre otros; y artículos 145 y 182 a 204 del mismo código, referente a la preservación de las aguas y sus cauces.
- Igualmente, los artículos 211 a 219 y 226 *ibídem*, referentes al control de vertimiento de residuos por uso industrial.

g) Sanciones consagradas en los Decretos 1541 de 1978 y 2857 de 1981

Las sanciones del decreto 1541 de 1978 por incumplimiento de sus normas (art. 238) van desde el requerimiento, multas hasta de \$500.000, suspensión de las obras y destrucción de las mismas (art. 243), hasta la declaración de caducidad de las concesiones y permisos atorgados (art. 248). En cuanto a contribuciones destinadas a compensar el mantenimiento y conservación de este recurso tenemos que el artículo 23 ibídem establece las tasas que deben pagar, los usuarios, según la cuantía que fije la autoridad ambiental competente.

En este punto, es de especial aplicación el artículo 11 del Código sanitario que determina - antes de procederse a la instalación de cualquier establecimiento industrial - la obligación de solicitar licencia especial ante el Ministerio de Salud por el vertimiento de residuos líquidos.

En lo relativo a los trabajos que se piensan realizar en ríos, incluyendo corte de meandros o curvas de los ríos y otras obras, también se deben tener en cuenta el decreto 2857 de 1981, reglamentarios de Código de los Recursos Naturales , en lo relativo a cuencas hidrográficas. Este último decreto establece pautas precisas que es necesario seguir cuidadosamente a fin de dar cumplimiento a la ley, y para evitar las sanciones pecuniarias contempladas en otras normas, y las causales de caducidad de permisos y concesiones.

- **Permiso de exploración de aguas subterráneas:**

Se deben cumplir unos requisitos mínimos para la obtención del permiso de exploración de aguas subterráneas, los que se encuadran dentro del siguiente marco conceptual.

Observar que las extracciones de agua subterránea no superen la recarga de la cuenca hidrogeológica, de lo contrario ocurrirán descensos de los niveles de agua

en el acuífero con posibilidad de presentarse otros efectos negativos de tipo económico y ambiental.

Evaluar el potencial de afectación de tipo hidrológico, geotécnico que se generaría por la construcción del pozo en el área de influencia sobre otros puntos de agua como manantiales, aljibes y pozos. De mayor relevancia si son fuentes de suministro a comunidades para consumo humano que tienen previos derechos adquiridos y una tradición en el uso del agua.

La documentación requerida considera básicamente un estudio geoeléctrico, la localización del sitio propuesto para la perforación en plancha cartográfica, la que debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- * Inventario de puntos de agua, es decir, aljibes, pozos y manantiales en el área de influencia que pueden ser afectados.
- * Fuentes superficiales como quebradas o ríos que puedan ser afectados por el nuevo pozo y reduzcan los caudales disponibles de dichas fuentes, perjudicando a usuarios que realizan aprovechamiento aguas abajo.

5. Medidas que se pueden adoptar:

- Profundización de la perforación con el fin de alcanzar acuíferos más profundos para su aprovechamiento.
- Aislamiento de acuíferos superiores con la instalación de sello sanitario e instalación de tubería ciega con el fin de evitar conexión hidráulica entre acuíferos.
- Alejamiento del sitio de perforación donde medie una distancia prudente para que el cono de abatimiento del pozo no alcance al del pozo existente o éste sea mínimo, lo que depende de las características hidráulicas del acuífero, en especial la transmisividad, y horas de bombeo continuo con que se opera el pozo.

- Cuando no exista otra alternativa que la construcción cercana, se pueden manejar horarios de operación de los pozos de tal manera que se contemplen aspectos como radio de influencia del cono de abatimiento de los dos pozos, revisión de los consumos que minimicen la concesión de aguas, radio de acción del pozo y establecimiento de turnos de bombeo.

3. DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO.

3.1. LOCALIZACION.

El área de estudio se localiza en la parte centro-occidental del Departamento del Quindío, involucrando parte de los municipios de la Tebaida, Armenia y la totalidad de la subcuenca de la quebrada Cristales, al sur del denominado abanico de Armenia, Glacis del Quindío o formación Pereira. La cuenca de la quebrada Cristales es afluente de la cuenca del río La Vieja. El área forma un polígono orientado en sentido NE-SW, con un área aproximada de 121.096 Km² (**Anexo - Plano 1 - Mapa 2**). Se trabajó con las planchas 243-I-B y 243-I-D del IGAC a escala 1:25000.

3.2. ACTIVIDADES ECONOMICAS, RECURSOS Y SANEAMIENTO BASICO

Como se menciono anteriormente la cuenca del la quebrada Cristales pertenece a los municipios de La Tebaida y Armenia, en la cual se encuentra la Inspección de

policía El Caimo y el puesto de policía de Granada, con una población aproximada según el censo de 1993 de 25.000 habitantes.

La población del municipio de La Tebaida registró desde 1973 - 1985 una migración rural originada porque la mayoría de los pequeños propietarios vendieron sus parcelas y se trasladaron a la cabecera municipal, trabajando actualmente como jornaleros en las grandes y medianas fincas cafeteras tecnificadas del municipio (IGAC 1989).

Las actividades agrícolas y pecuarias constituyen la base de la economía en la región. Según el mapa del uso actual del suelo (Figura 2), el principal cultivo es el café (70.52%), seguidos de bosques de guadua (6.62%), cultivos semestrales (5.68%), pasto y pasto de corte (5.68%), yuca (5.2%), árboles frutales (3.09%), plátano (2.92%) y caña panelera (0.1%). Estos productos ocupan hoy un renglón importante dentro de la economía, gracias a la diversificación de cultivos llevados a cabo por la Federación Nacional de Cafeteros en las medianas y grandes fincas de la región.

Los cultivos transitorios han traído también problemas de tipo social y económico, dado que demandan en general una mano de obra muy limitada, provocando una disminución en la oferta de empleo.

Las actividades pecuarias del área generan poco empleo al compararla con las actividades agrícolas por lo que la actividad ganadera es reducida, de baja rentabilidad debido a los altos costos de sostenimiento. La avicultura presenta problemas por los altos costos de producción e insumos.

Así mismo el gobierno Departamental impulsa campañas encaminadas a fortalecer el ecoturismo con el objeto de desarrollar una gran industria turística como alternativa a la actual crisis cafetera, al mismo tiempo que debido a la

problemática social derivada del terremoto del año 99, se han creado muchas microempresas a nivel rural y urbano con el fin de dar solución y alternativas de trabajo a las gentes que sufrieron en su economía campesina o de comercio en la ciudad.

Lo anterior es una justificación más para buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable en la región ante el posible incremento en la demanda.

3.2.1. Servicios. El conocimiento sobre la cobertura y la calidad de las funciones básicas, así como el acceso a ellas, es un aspecto de vital importancia para la prestación, ampliación y dotación de servicios. Este conocimiento ayuda a tomar decisiones racionales para adelantar programas de beneficio de la sociedad. Además, que permite seleccionar los lugares más adecuados para la localización de un servicios o facilitar el acceso a al población a él y servir a un número mayor de habitantes.

3.2.2 Energía Eléctrica. El número de usuarios del servicio es aproximadamente de 15390, discriminados en 13120 en la cabecera Municipal y 215 en la Zona Rural para una cobertura del 76%.

En cuanto a las características generales del Sistema de Energía, se tiene la existencia de una sub-estación montada en el Municipio de tipo interior para 345 K.V. que funciona con el sistema de Interconexión Nacional.

3.2.3. Salud. El municipio dispone de un hospital con 66 camas, un puesto de salud y 73 centros de atención en diferentes modalidades del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar.

3.2.4. Educación. La cabecera municipal cuenta con 5 establecimientos de pre – escolar, 146 alumnos y 7 profesores; 8 establecimientos de primaria, 5174 alumnos y 186 profesores; 4 establecimientos de educación media, 2255 alumnos y 107 profesores; el sector rural cuenta con 23 establecimientos de primaria, 1059 alumnos y 44 profesores, 2 establecimientos de educación media, 279 alumnos y 22 profesores.

3.2.5. Condiciones Sanitarias Existentes

3.2.5.1. Acueducto: de acuerdo con la información suministrada por el administrador del acueducto se tiene una cobertura del 90%. Es un sistema que cuenta con un tanque de almacenamiento que viene de los pozos profundos y únicamente desinfectan el agua con cloro, antes de ser conducida por la red a la comunidad.

En opinión de las personas, el acueducto es bueno y suficiente para atender la demanda del sector urbano, sin embargo, se presentan continuamente roturas y escapes en los tubos de conducción, por lo tanto la presión en muchas ocasiones

es baja; en el área rural no hay ningún tipo de acueducto, y se surten de las aguas subterráneas de los aljibes.

Hay algunos casos de “redes” de Acueducto rural, que son pocos y aislados y representan la unión de propietarios que tienen más o menos cerca sus viviendas y con la explotación a través de un pozo profundo, o aljibe se distribuyen el agua por medio de canaletas de madera o mangueras de caucho construyendo una pequeña alberca como tanque de almacenamiento. Este modo de conducción se da especialmente en las zonas de ladera, siendo realmente una extensión muy pequeña ya que sólo sirve para 7 fincas aproximadamente.

3.2.5.2. Alcantarillado: el Alcantarillado construido en el año de 1966, por lo reducido de su diámetro, es muy deficiente por las continuas rupturas. Las aguas negras son evacuadas por gravedad hacia la Vereda la Española, dónde existe un pozo a cielo abierto sin medidas preventivas de orden sanitario, lo cual constituye un grave problema para los habitantes de las zonas aledañas.

La cobertura del sistema está calculada en un 80% de los domicilios de la zona urbana; es de propiedad municipal, y por su medio se administra y mantiene.

El alcantarillado de la Tebaida no funciona de manera separada para aguas lluvias y aguas servidas y sólo cubre el área urbana, en las veredas, incluyendo la de La Española; la disposición de las aguas servidas y excretas se hace mediante la utilización de pozos sépticos, letrinas y campos de riego sin aplicar mayores técnicas sanitarias para su construcción, problema que es visible en muchos sectores. En este momento está para poner en funcionamiento la planta de

tratamiento moderna de aguas residuales, ubicada en la vereda Sajonia, aproximadamente a 3 Km del casco urbano.

3.3. VIAS DE COMUNICACION

La red vial del Departamento es una de la más importantes del país, con unos 3.000 km de carreteras y carreteables que permiten una rápida comunicación de los municipios entre si a través de numerosas vías secundarias, que a su vez se intercomunican formando una intrincada red vial, las cuales tienen un mantenimiento aceptable y agilizan el transporte hacia las principales veredas de la región y de éstos con la capital (**Anexo - Fotografía 1**). Las vías principales que atraviesan la zona de interés son:

- * Armenia - La Tebaida - Zarzal
- * Armenia - Balboa - Barcelona
- * Club campestre de Armenia - El Caimo - Balboa, cuyas rutas conducen a la parte occidental, nor - oriental y central del área respectivamente.

Los carreteables conducen y unen las principales veredas de la parte central y sur del área, tal es el caso de los tramos:

- * Aeropuerto El Edén - La Primavera - Maravelez - Portugalito
- * Carreteables que desde Maravelez conducen a Pissamal
- * Aeropuerto El Edén - El Ocaso - La Argentina - Hacienda Santa Fe
- * Aeropuerto El Edén - El Delirio - Vereda Argentina
- * La Tebaida - Hacienda El Oasis - Vereda La Argentina

- * La Tebaida - Tequendama - Hacienda el Cinco - Hacienda Río Arabia
- * La Tebaida - Vereda Padilla
- * El Caimo - Sebastopol - La primavera - Portugalito y la desviación que desde esta conduce a la central hidroeléctrica El Bosque.
- * Inspección de policía de Murillo - Betulia
- * Inspección de policía de Granada - El Manzano - Los Laureles - La Estrella
- * Las vías que desde la carretera La Tebaida - Zarzal conducen a El Retiro - La Chagra - Venecia y la Popa - Pisamal
- * La vía que desde la carretera club campestre de Armenia - El caimo conduce al sector de El Silencio.

La comunicación aérea del departamento se efectúa a través del aeropuerto El Edén, ubicado a unos pocos kilómetros del sur - occidente de Armenia, dentro del área de estudio.

4. MARCO CONCEPTUAL AMBIENTAL Y DE HIDROGEOLOGIA GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

4.1. ZONAS ECOLOGICAS

Por su situación geográfica, todas las zonas de vida del Quindío están ubicadas en la región latitudinal tropical donde los factores climáticos, dentro de los factores del medio ambiente, tienen una influencia marcada sobre la vegetación, siendo los más importantes la temperatura, la lluvia y la humedad. De acuerdo con el estudio del IGAC (Espinal, 1997) sobre las zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia, en el departamento se encuentran las siguientes, que influyen fundamentalmente en el uso agropecuario de las tierras. En el área se encuentran las siguientes zonas ecológicas:

*** Bosque húmedo premontano (bh - PM)**

Corresponde a la zona cafetera situada entre el río La Vieja y La Tebaida con un relieve moderado, en parte suavizada por la acumulación de material volcánico, limitando con el bosque seco tropical. Presenta una biotemperatura media entre 18 a 24°C y precipitaciones anuales entre 1000 y 2000 mm. La vegetación original ha sido profundamente modificada debido a la explotación intensiva a las que se someten estas áreas.

* **Bosque muy Húmedo premontano (bmh - PM)**

Corresponde a la parte del área cafetera del municipio de Armenia, con un relieve ondulado y partes de planas de poca extensión. Tiene una biotemperatura media entre 18 y 24°C y un promedio anual de lluvias entre los 2000 y 4000 mm.

4.2. SUELOS

En el área investigada, el IGAC ha reconocido diferentes tipos de suelos¹ dentro de un estudio semi-detallado y general de los suelos del departamento del Quindío. A continuación se mencionan los principales tipos de suelos que hacen parte del área donde se realizó el estudio. Para el piedemonte se reconocen las siguientes asociaciones y consociaciones (**Anexo – Plano 3**), (**Anexo – Fotografía 2**):

4.2.1. Consociación Chinchina (C.I.): esta formada por suelos localizados al sur de Armenia y norte de La Tebaida, sobre un relieve tipo abanico torrencial, en altitudes que oscilan entre 1300 a 1600 msnm, en clima medio - húmedo. El

relieve varía de ligeramente plano a escarpado con pendientes desde el 3 hasta más del 50% y erosión ligera.

¹ IGAC. Suelos de Colombia Bogotá 1995 p 367-401.

Los suelos actualmente se explotan en cultivos de café tecnificado, plátano, yuca, tomate, frijol y algunos frutales como naranjo, mandarina, aguacate, entre otros.

En general se caracterizan por ser profundos, bien drenados, texturas medias, fuerte o moderadamente ácidos, fertilidad de moderada a alta.

De acuerdo con la variaciones de las pendientes y la erosión en el área se diferencian las siguientes fases(**Anexo – Plano 4**):

- * Clab1= Pendiente del 0 - 3 y 3 - 7% erosión ligera.
- * Clbc1= Pendiente del 3 - 7 y 7 - 12% erosión ligera.
- * Clf1= Pendiente del 7 - 12 y 25 - 50% erosión ligera.
- * Cif1= Pendiente > del 75% y erosión ligera.

4.2.2. Asociación Tebaida - Alejandría (TB): esta asociación también hace parte del abanico torrencial, localizado en la parte distal, principalmente por los alrededores de La Tebaida, en alturas que oscilan entre 1200 y 1300 msnm, dentro del clima medio húmedo. El relieve es ligeramente plano a ondulado con pendientes menores del 12% y erosión ligera. Los suelos son medianamente evolucionadas y su material de origen está constituido por cenizas volcánicas muy alteradas; se dedican a cultivos tecnificados de café, plátano, yuca, tomate, frijol y algunos frutales como naranjo, mandarina, aguacate, zapote, guayaba, entre otros.

En el área se diferencia el conjunto Tebaida el cual presenta un horizonte (A) superior espeso, de color pardo muy oscuro y textura media; seguidamente un

horizonte (B) muy grueso de color pardo amarillento y textura que varía de media a gruesa. En general son suelos profundos, bien drenados; de fertilidad alta, reacción fuerte o moderadamente ácida, mediano contenido de materia orgánica y magnesio, altos en calcio, bajos en fósforo y potasio. En el área se presenta la fase TBbc1; la cual presenta una pendiente de 3 - 7 y 7 - 12% con erosión ligera (**Anexo – Fotografía 3**).

4.2.3. Asociación Alejandría - Isabela (AL): esta integrada por suelos localizados al pie del abanico torrencial sobre la margen derecha del río La Vieja, en altura que oscilan entre 1000 y 1200 msnm, dentro del clima húmedo transicional al medio seco. El relieve varía de ondulado a escarpado con pendientes mayores del 7%.

Estos suelos han evolucionado a partir de materiales sedimentarios, areniscas y arcillolitas y se encuentran afectados por procesos erosivos, de grado moderado a severo. Actualmente se explotan en ganadería extensiva y pequeñas áreas que están en rastrojo. En el área se presenta la fase Alde2 la cual presenta una pendiente de 25 - 50 y 50 - 75% con erosión moderada (**Anexo – Fotografía 4**).

4.2.4. Asociación Quindío (QU): esta unidad agrupa suelos que se localizan dentro de los diferentes valles angostos, principalmente del río Quindío, en altitudes que oscilan entre 1000 y 2300 msnm, dentro de los climas medio húmedo y frío muy húmedo en relieve plano o ligeramente plano, con pendientes

del 7%. Sufren encharcamientos ocasionales causados por el desbordamiento de los ríos y en algunos sectores se presenta erosión ligera.

Son suelos muy poco evolucionados que se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales; están dedicados a la ganadería y pequeños cultivos de café, maíz, sorgo, y algunos frutales.

El conjunto Quindio y específicamente la fase Qua con pendiente de 0 - 3% se presenta en el área y se caracterizan por ser moderadamente bien drenados, profundos a moderadamente profundos, limitados por el nivel freático.

Químicamente son de fertilidad moderada, reacción fuerte a moderadamente ácida con medianos contenidos de materia orgánica, calcio, magnesio, fósforo y bajos en potasio.

4.2.5. Consociación Playones (PY): esta unidad está conformada por suelos localizados en pequeñas vegas e islas del río Quindio dentro del clima medio húmedo en alturas promedio de 1000 msnm.

El relieve es plano con problemas de continuas inundaciones. Los suelos no han evolucionado debido a los continuos aportes de sedimentos; actualmente están dedicados a la ganadería extensiva.

Los suelos constan de una serie de capas de texturas gruesas; superficiales, limitados por el nivel freático fluctuante. Tienen fertilidad baja a moderada, reacción fuerte a moderadamente ácida, contenidos bajos a medianos de materia orgánica, calcio, magnesio, fósforo y potasio. En el área se presenta la fase Pya; con pendientes de 0 - 3%

4.2.6. Asociación Ceilán - Danubio (C.E.): esta unidad está integrada por suelos localizados cerca de la confluencia de los ríos Quindío y Barragán, en altitudes que oscilan entre 1000 y 1200 msnm, dentro del clima medio húmedo. El relieve es plano con pendientes menores del 3%, con problemas de encharcamiento debido a desbordamiento de los ríos que circundan.

Los suelos son poco evolucionados y se forman a partir de aluviones, están dedicados a la ganadería extensiva y pequeños cultivos de sorgo, arroz y soya. Son suelos superficiales a moderadamente profundos, imperfecto a probablemente drenados, texturas medias a moderadamente finas, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad moderada. En el área aparece la fase Cea con pendiente de 0 a 3%.

4.2.7. Asociación Barragán - Picota. (BA): los suelos que integran esta asociación se localizan en pequeñas terrazas formadas por los ríos Barragán y Quindío; en altitudes que oscilan entre 1000 y 1200 msnm, dentro del clima medio húmedo. El relieve es ligeramente ondulado, con pendientes menores del 7% y erosión ligera.

Son suelos poco a medianamente evolucionados; se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales e inclusiones de cenizas volcánicas; actualmente se utilizan para la ganadería y pequeños cultivos de yuca.

En general son moderadamente profundos a profundos, bien a imperfectamente drenados, texturas finas a medias, moderadamente ácidos, fertilidad moderada a

alta y erosión ligera. En el área se presenta la fase Baab1, con pendiente de 0 - 3 y 3 - 7% y erosión ligera.

4.3. USO ACTUAL DE LA TIERRA Y CAPACIDAD DE USO.

El departamento del Quindío tiene una gran actividad agropecuaria, aunque limitada en algunas áreas, debido a lo accidentado del terreno y las condiciones adversas del clima². Dentro de la cuenca de la quebrada Cristales se presentan dos tipos de usos del suelo, principalmente:

* Cultivos transitorios y perennes tecnificados: estos cultivos están constituidos principalmente por sorgo, maíz, soya, fríjol, yuca, cítricos, plátano, maracuya y caña panelera, con algunos sectores en pastos. Se encuentran al sur y sur - occidente del municipio de La Tebaida y representan alrededor de un 25% del área total de estudio.

* Cultivos perennes tecnificados: estos cultivos agrupan los cultivos de café sin sombrero de las variedades caturra y Colombia, principalmente, algunas veces asociadas con plátano, banano y frutales; además se presentan cultivos de yuca y cítricos. Dentro de la cuenca se encuentran al norte y oriente de La Tebaida y sur de Armenia, cubriendo aproximadamente un 75% del área total.

² EPINEL Y MONTENEGRO. Formaciones vegetales en Colombia Bogotá p 99 – 115.

El objetivo de la clasificación de tierras por su capacidad de uso es agrupar los suelos que teniendo características comunes y las mismas limitaciones, responden en forma similar a los mismos tratamientos en cuanto al uso y manejo.

La clasificación se hizo siguiendo el sistema establecido por el departamento de Agricultura de los Estados Unidos, con algunas modificaciones propuestas por la subdirección de Agrología del IGAC. Los suelos se agrupan en clases y subclases. Las clases se indican con números romanos van del I a la VII; la clase I no tiene limitación alguna para su uso agropecuario, por poseer limitaciones extremas. Las subclases son grupos de fases dentro de las unidades cartográficas, que tienen el mismo grado de limitaciones dominantes para su uso agrícola. Se reconocen dentro del nivel de subclase, cuatro limitaciones:

- 1) Riesgos por erosión (e).
- 2) Exceso de humedad (h)
- 3) Limitaciones de la zona radicular (s)
- 4) Limitaciones climáticas (c).

De acuerdo al estudio del IGAC titulado "Suelos del Departamento del Quindío", en la cuenca de la quebrada Cristales, presentan las siguientes clases y subclases.

4.3.1. Tierras de clase II. Los suelos de esta clase tienen pocas limitaciones y requieren prácticas fáciles de conservación para prevenir la erosión por el agua o por el viento.

* Suelo IIe: está integrada por las unidades Clab1 de la consociación Armenia. Los suelos son profundos a moderadamente profundos, bien a moderadamente bien drenados, de texturas moderadamente finas, reacción moderadamente ácida, fertilidad natural a moderada a alta y erosión ligera. Esta subclase de suelo se encuentra al norte y nor - oriente del municipio de La Tebaida y en inmediaciones de la hacienda El Ocaso.

* Suelo IIIe: está integrada por la unidad Tbab1 de la asociación Tebaida - Alejandría, localizada en la parte distal del abanico torrencial de Armenia. Los suelos de esta subclase tienen limitaciones para su explotación agropecuaria por susceptibilidad a la erosión y deficiencia de humedad. Esta subclase de suelo se encuentra en la parte alta de la cuenca de la quebrada Cristales y al oriente de la misma.

4.3.2. Tierras de la clase III. Los suelos de esta clase tienen mas restricciones para su uso que los de la clase II y las prácticas de conservación son más difíciles de aplicar y mantener.

* Suelo IIIec: está conformada por la unidad TBbc1 de la asociación Tebaida - Alejandría, con disecciones profundas causadas por corrientes de agua. Los suelos están limitados por su explotación agropecuaria por susceptibilidad a la erosión y deficiencia de humedad. En la cuenca de la quebrada Cristales se ubican hacia el occidente del municipio de La Tebaida, en las quebradas La Argentina y La Jaramilla.

* Suelo IIIsh: integran esta subclase la unidad Cea de la asociación Ceilán - Danubio y las unidades Qua, Quab y Quab1 de la asociación Quindio - Guarinó.

Estos suelos están limitados para su uso por poca profundidad efectiva debido al nivel freático fluctuante. Se encuentran ubicados en la parte baja de la cuenca, al sur de la misma zona de su desembocadura con el río La Vieja.

4.3.3. Tierras de Clase IV. Estas tierras tienen limitaciones severas que restringen la elección de cultivos a sembrar y requieren manejo cuidadoso para su conservación.

* Suelo Ivc: pertenecen a esta subclase Clcd1, Cld1, Clde1 de la consociación Armenia. Debido a las pendientes fuertes y a la alta susceptibilidad a la erosión, al trabajarlos es necesario hacer prácticas intensas de conservación de suelos. Se encuentran en una pequeña porción aguas debajo de la confluencia de las quebradas Cristales, Tatrabas y El chispero.

4.3.4. Tierras de la clase VI. Las tierras de esta clase tienen limitaciones severas que las hacen inadecuadas para la explotación de muchos cultivos. El uso debe orientarse hacia cultivos perennes bajo sombrero, pastoreo y conservación de la vida silvestre.

* Suelo Visec: esta integrada por la unidad Alde2 de la asociación Alejandría - Isabela. Los suelos son superficiales a moderadamente profundos, limitados por piedras u horizontes endurecidos; bien drenados, de texturas medias a finas, fuerte a moderadamente ácidos y de fertilidad moderada. Se ubican en la parte

baja de la cuenca e involucra las zonas de las quebradas El Cántaro, La Argentina y la Jaramilla, al norte de su confluencia con la quebrada Cristales.

4.4. GEOMORFOLOGIA

4.4.1. Fisiografía. El Departamento del Quindío se ubica sobre el flanco y el piedemonte occidental de la cordillera central, y en el límite oriental del valle del río Cauca, estando conformado por tres unidades geomorfológicas³ diferentes que corresponden a **(Anexo – Mapa 5)**:

- * Una zona montañosa en el flanco occidental de la cordillera central, muy quebrada y de altas pendientes topográficas.
- * Una zona ondulada y denominada Cono de Armenia, Abanico de Armenia o Valle del Río Quindío, en el piedemonte occidental de la cordillera central, moderadamente quebrada a suave e inclinada hacia el Valle del Río la Vieja.
- * Una zona plana a suavemente ondulada en el Valle del Río la Vieja, expresión geomorfológica que se asocia con los inicios del Valle del Río Cauca.

La fisiografía que se presenta en el área de la subcuenca de la quebrada Cristales es homogénea y corresponde con aquella geomorfología suavemente ondulada a plana que caracteriza a la parte occidental del departamento del Quindío; esto se debe a la presencia de una geoforma regional muy particular sobre el flanco y piedemonte de la cordillera Central que se conoce como el abanico de Armenia, que corresponde (aproximadamente al 90%) y sólo su parte

³ IGAG. Suelos de Colombia Bogotá 1995 p 417 – 439.

Sur descansa sobre el Valle del Río la Vieja, con alturas que oscilan entre 1.400 msnm, en la parte Norte del área y 1.100 msnm, en la parte Sur.

Esta expresión fisiográfica está directamente relacionada con las unidades roca - sedimento aflorante en el área de estudio; ya que las características geomorfológicas son un reflejo de las unidades geológicas más superficiales. La homogeneidad del paisaje, manifiesta de por sí una uniformidad en la distribución de las rocas.

La unidad geomorfológica dominante (abanico de Armenia), es cortada bruscamente y a manera de escarpe vertical por los inicios de los valles de los ríos Quindío y La Vieja, los que también se han asociado con la presencia de estructuras regionales como la Falla de Armenia, en el cañón del río Quindío, o con la presencia de un alineamiento local en la parte sur del área de estudio. En estos lugares de cambio entre unidades geomorfológicas, donde se realizaron los recorridos de campo en 1994 por parte de INGEOMINAS, tendientes a determinar las características estratigráficas del Glacis del Quindío (**Anexo – Mapa 6**), (**Anexo – Fotografía 5**).

La subcuenca de la quebrada Cristales se ubica entonces sobre la parte media y distal del abanico de Armenia, incluyendo el paso de éste hacia el valle del río La Vieja, cuyas unidades litológicas aflorantes corresponden a la unidad estratigráfica informal conocida como depósitos de Glacis del Quindío.

Hacia la parte sur - occidental del área de estudio hacen su aparición depósitos inconsolidados del cuaternario cuyo origen se debe a la actividad fluvial de los ríos La Vieja y Quindío y la desembocadura de la quebrada Cristales.

En cuanto a la expresión geomorfológica de las fallas que atraviesan la subcuenca, es de anotar que su identificación se dificulta por la existencia de

depósitos piroclásticos muy recientes que enmascaran los posibles inicios al nivel de fotointerpretación y por la ausencia de rasgos de campo (**Anexo – Figura 4**).

4.4.2. Corrientes superficiales. Las corrientes que drenan el área de estudio se presentan paralelas y sub-paralelas unas a las otras como la quebrada la Jaramilla, el Cántaro, la Argentina en la parte sur; hacia la parte central la quebrada Cristales, a la cual llegan numerosos afluentes de la parte nororiental del área tal como la quebrada el Rhin, los Angeles, Germania y Tatabras.

El Río Quindío limita el área en su parte nororiental y Sur presentando un cauce meandriforme con fenómenos de escurrimiento concentrado (pendiente del 12 al 25%), a difusos (pendientes < 7%), respectivamente.

4.4.3. Estratigrafía. En el Departamento del Quindio afloran litounidades ígneas, metamórficas y sedimentarias con edades desde el Precámbrico hasta el reciente, en las cuales, debido a las dificultades para obtener edades precisas, se ha desarrollado una nomenclatura de carácter litoestratigráfico, muchas veces local y que aparecen en mapas y publicaciones sin una definición del sentido en que ha sido empleada, siendo difícil a través de la bibliografía existente, conocer su significado.

Se considera de mayor importancia el Cenozoico, el cual implica fundamentalmente el carácter litoestratigráfico para cada unidad descrita, teniendo en cuenta la edad asignada en la leyenda del mapa geológico.

* CENOZOICO

La sedimentación terciaria hacia el flanco occidental de la cordillera central esta relacionada al Valle del Cauca, especialmente en el valle del río la vieja y es típicamente continental. Diques y stoks de menos de 2 Km², rocas hipoabisales andesíticas, intruyen los complejos Cajamarca, Quebrada grande y Arquia.⁴

Los depósitos cuaternarios son principalmente conos o abanicos y terrazas de origen volcánico, volcanoclasticos, glacio-fluvial y fluvial.

- Miembro cinta de piedra(Tocp): esta unidad aflora en el valle del río la vieja, en el extremo occidental del departamento. Corresponde a la parte superior de la formación Cauca superior y esta limitado en el tope por la formación la paila, aunque gran parte de esta formación esta cubierta por los flujos de lodo y depósitos piroclasticos, siendo difícil determinar las relaciones con las unidades consideradas al sur - oeste, en el Valle del Cauca.

Esta conformado por una serie de areniscas verdosas hasta pardo rojizas con intercalaciones de arcillolitas duras. Las areniscas son friables, con algunas interestratificaciones de conglomerados polimicticos y de arcillolitas verdosas; en los conglomerados los clastos están mal seleccionados, son subangulares a subredondeados predominando los de cuarzo lechoso, chert negro, rocas verdes y ocasionalmente de sedimentitas arcillosas en una matriz areno-arcillosa. Las arcillolitas son laminares , abigarradas con estratificación lenticular y en bancos de poco espesor.

El miembro cinta de piedra ha sido considerado como del oligoceno superior(Van Der Hammer, 1958).

⁴ HUMBERTO GONZALES y ALBERTO NÚÑEZ. Geología y recursos minerales. Edición INGEOMINAS.

- Formación la paila (Tmp): aflora en el extremo occidental del departamento en el valle del río la vieja, suprayaciendo en discordia al miembro cinta de piedra de la formación Cauca superior y corresponde en gran parte, a la denominada formación la Pobreza.

- Esta área esta constituida por bancos gruesos de conglomerados con selección regular, arenisca y arcillolitas de color pardo; la parte inferior se caracteriza por la presencia de tobas dacíticas y en la base conglomerados polimicticos y arenas sueltas con intercalaciones de arcillolitas duras.

Los conglomerados están compuestos por cantos subredondeados de tamaño variable de cuarzo lechoso, chert negro y gris, diabasas y andesitas en una matriz areno-arcillosa. Las areniscas son cuarzo de grano grueso a fino en estratos lenticulares con estratificación cruzada a gran escala . Las arcillolitas forman lentes pequeños y nódulos en los conglomerados y areniscas.

Según datos palinologicos de Van Der Hammer (1958) esta formación a sido asignada al mioceno inferior; sin embargo, Schwin(1969) sugiere una edad Miocena medio para la misma secuencia en el río Guadalajara (Valle).

- Rocas hipoabisales (Tadh): diques y Stocks, menores de 2 Km², de rocas hipoabisales porfídicas, intruyen los complejos Cajamarca, Quebrada grande y Arquia; los mas conocidos son los de Salento, la Cabaña (Carretera Calarca la Línea) y Río verde (adelante de la bifurcación de la carretera hacia Pijao y Córdoba). Son rocas holocristalinas masivas de textura afanítica a porfiritica, de composición intermedia, andesítica a dacítica, ocasionalmente con estructura columna. Los fenocristales, de tamaño variable, son de plagioclasa con hornblenda y cuarzo subordinados; este ultimo mineral es esencial en las rocas dacíticas.

Aunque no existen dataciones radiométricas de estas rocas en el departamento, por su posición geotectónica y relaciones estratigráficas se correlacionan con cuerpos similares que afloran al sur y norte del área considerada y cuyas edades corresponden al terciario medio a superior.

4.4.4. Glacis del Quindío (TQgp): cerca de un 35% del área del departamento esta cubierto por un depósito volcano-sedimentario de edad Plioceno-Pleistoceno y origen múltiple, que ha recibido los nombres de flujo de lodo del Quindío (Mosquera, 1978) y Formación Armenia (Mccourt et al, 1984^a). Sin embargo, el carácter heterogéneo de la acumulación y la ausencia de secciones estratigráficas bien diferenciadas y continuas, hacen que se prefieran el termino mas amplio de Glacis del Quindío; en general esta secuencia se caracteriza por una morfología ondulada con una inclinación suave hacia el valle del río la vieja.

Esta gran acumulación se originó en la cima de la cordillera central, en los volcanes Nevado del Quindío, Nevado Santa Isabel y Cerro Santa Rosa, entre otros, y en los glaciares que en el Plioceno-Pleistoceno los cubrían. Las erupciones volcánicas ocasionaron deshielos y formación de lahares (flujos de lodo) que descendieron por los ríos Quindío y Espejo, principalmente. Adicionalmente glaciares, avenidas torrenciales y depósitos piroclásticos, quizás de caída y flujo, contribuyeron al origen de esta secuencia que tiene, en algunos sitios, mas de 100 metros de espesor. Hacia la cima de la cordillera, cerca de los centros volcánicos, pueden aparecer flujos andesíticos a veces intercalados con los flujos de lodo y relleno de valles glaciares preexistentes (**Anexo – Figura 5**).

- Depósitos piroclásticos (Qto): rocas piroclásticas, especialmente cenizas, forman un manto de espesor variable en casi toda el área del departamento. Sin

embargo, en el mapa solo se ha representado las zonas de mayor espesor especialmente en la parte alta de la cordillera central. Estas cenizas provienen de los volcanes del Complejo Ruíz Tolima, sin que haya hecho una diferenciación para cada una de las capas.

Las secuencias más espesas están constituidas por capas de ceniza y lapilli, en parte intercaladas con lahares, de composición andesítica, localmente más ácida, y de lapilli pumítico con abundantes cristales de plagioclasa y en menor proporción de magnetita, circón, hipersteno, hornblenda, oxihornblenda, biotita y cuarzo.

La edad de estas acumulaciones se ha considerado como del pleistoceno-holoceno.

- Depósito glaciares (Qq): hacia la parte alta de la cordillera central en el extremo nor - oriental del departamento, pueden reconocerse algunas geoformas glaciares tales como circos, valles en U, morrenas terminales y laterales y rocas estriadas.

Según Herd, las evidencias de campo y las dataciones indican, al menos, dos avances de los glaciares durante el pleistoceno y uno durante el Holoceno. Estos depósitos corresponden a una cubierta de detritos glaciares compuesta por diferentes clases de depósitos glaciares.

- Aluviones recientes (Qar): depósito aluviales del cuaternario más reciente se encuentran en el valle de los ríos Barragán y la Vieja en el sector occidental y sur - occidental del departamento. En su mayor parte están constituidos por bloques, gravas, arenas y limos, en diversas proporciones, en una matriz areno-arcillosa a limo-arenosa y cuya composición indica como fuente las rocas de la cordillera central.

Además, se encuentran algunos depósitos coluviales, no indicados en el mapa, producto de la erosión y la fuerza de la gravedad, ayudados en la mayoría de los casos por la actividad humana.

De los diferentes sitios visitados y por cartografía se evidencia continuidad en la secuencia sedimentaria y bajos grados de alteración que permiten la caracterización estratigráfica de las unidades litológica y depósitos inconsolidados aflorantes en la subcuenca, entre ellos el sector de Portugalito, Maravelez, central hidroeléctrica El Bosque y barrios bosque de pinares en la ciudad de Armenia. Es de anotar que hacia la parte norte de la subcuenca, zona cercana a la ciudad de Armenia, los afloramientos son escasos (**Anexo – Fotografía 6**).

4.5. HIDROLOGIA

El estudio hidrológico comprendió el análisis climático, el análisis de caudales, el balance hídrico del área y una descomposición de hidrogramas para determinar volúmenes de flujo base o subterráneo que está aportando al acuífero durante el año.

También se revaluó la recarga potencial del acuífero proveniente de la precipitación, estimada por el estudio de INGEOMINAS y la C.R.Q. para así conocer los requerimientos de aguas subterráneas para un período determinado.

Se empleó la metodología propuesta en el programa Balhid (Rodríguez, 1990) el cual desarrolla el método de " Penman Grandley ", el cual se basa en un balance de humedad del suelo y determina la cantidad de agua disponible para recarga de los acuíferos.

La serie de datos históricos, climatológicos, pluviométricos e hidrométricos se recopiló de estaciones existentes, las cuales se caracterizan por tener pocos años, estar incompletos o ser inconsistentes sus datos.

El cálculo de la evapotranspiración potencial se calculó mediante los métodos de Thornwaite y Penman modificado. La escorrentía directa se calculó con base en el análisis hidrológico de hidrogramas.

El estudio semidetallado y general de suelos del Departamento del Quindío realizado por el IGAG en 1988, permitió conocer los diferentes tipos de suelos presentes en el área; con los datos de las variables antes mencionadas se elaboró un balance de humedad para los suelos del área.

4.5.1. Análisis climático de la cuenca. El análisis climático de la cuenca de la quebrada Cristales se realiza basándose en las estaciones pluviométricas, pluviográficas, meteorológicas y climatológicas del IDEAM relacionadas en la **(Tabla 4)**.

Tabla 4

Estaciones Pluviométricas y climatológicas.

ESTACION	CODIGO	TIPO	MUNICIPIO	COORDENADAS GEOGRAFICAS		ELEVACION	AÑOS REGISTRO
				Latitud	Longitud		
La Argentina	2612044	PM	La Tebaida	N 4 °26	W 75° 46	1200	78-94
Apto. El Edén	2612506	SP	Armenia	N 4° 28	W 75° 46	1204	49-98
La Miranda	2612055	PM	La Tebaida	N 4° 26	W 75° 50	1220	82-94
La Bella	2612507	CO	Calarcá	N 4° 31	W 75°40	1450	50-96
Tucumán	2612052	PM	Armenia	N 4° 32	W 75°44	1250	81-90
La Pradera	2612050	PM	Armenia	N 4° 28	W 75° 43	1350	82-94
El Paraíso	2612053	PM	Calarcá	N 4° 30	W 75° 42	1200	82-90
Quebrada Negra	2612054	PM	Calarcá	N 4° 31	W 75° 38	1500	81-94
El Sena	2612509	ME	Armenia	N 4° 32	W 75° 30	1550	61-90

En términos generales la zona está bajo la influencia de la circulación atmosférica tropical. El sistema general de circulación está definido, esquemáticamente, por la presencia de centros de alta presión en los subtrópicos y una depresión entre los dos centros, llamada zona de convergencia intertropical ZCIT.

El relieve juega un papel importante en las condiciones climáticas regionales, ya que los procesos de convección, condensación y la actividad de los vientos regionales y locales, depende en gran medida de la orientación de las cadenas montañosas y de las diferentes alturas⁵.

4.5.2. Precipitación. El régimen de precipitación está determinado a nivel macroclimático por la zona de convergencia intertropical (ZCIT), el cual es un fenómeno a escala planetaria que se forma paralelamente al Ecuador entre los 5° Latitud N y 10° Latitud N por el flujo convergente de los vientos Alisios de ambos hemisferios. La mayor actividad de la ZCIT trae condiciones de alta nubosidad y fuertes precipitaciones en los meses de abril - mayo y octubre - noviembre, con temporadas secas en diciembre - febrero y julio - agosto (CENICAFE, 1986). La distribución general de las lluvias es bimodal debido a la ZCIT, ocasionando dos épocas lluviosas en el año, sin que exista una variación apreciable entre ambas épocas. Para la estación la Miranda, el promedio de lluvias es de 1793 mm, con periodos definidos de lluvia en marzo-diciembre, con un incremento en julio. La estación Aeropuerto el Edén, tiene un promedio anual de 1927 mm, y de 2035, con periodos de lluvia en marzo-mayo y octubre-diciembre. La diferencias en los promedios de los eventos lluviosos se pueden deber a los distintos años muestreados, siendo mayor en la estación la Miranda.

4.5.2.1. Distribución temporal de la precipitación. Para el análisis de la

⁵ C.R.Q .Centro de documentación. Informe estudio hidrogeológico de un área del municipio de la Tebaida Perira 1995 p 18 – 25.

distribución temporal de la precipitación se utilizaron cinco estaciones que se encuentran dentro del área de estudio (**Tabla 5**).

Tabla 5

Valores totales mensuales y anuales de precipitación

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
LA PRADERA	155	139.9	203.5	267.6	187.8	108.1	86	104.6	194.6	312	212	160.6	2131.7
EL PARAISO	165.4	152.2	222.7	285.1	208.8	92.6	66.8	109.3	206.3	317.8	281.7	182	2290.7
APTO EL EDEN	114.9	128.3	178.5	250.6	214.3	134.1	86.9	90.6	156.7	253.3	256.6	151	2015.8
LA MIRANDA	113.2	126.1	158.1	216.9	184.4	85.4	88.2	108.1	147.7	260.7	201.4	118.4	1808.6
LA ARGENTINA	138.7	107.6	157	241.2	168.8	93.9	81.5	85.7	149.4	237.1	220.4	153.2	1834.5

Tal como se observa en la (**Gráfica 1**), la distribución temporal de la precipitación es de tipo bimodal en toda la zona, con marcado descenso en los meses de julio y agosto. Los períodos húmedos se presentan en octubre, noviembre y abril. El mayor valor total mensual corresponde a la estación el Paraíso (317,8 mm). Los períodos secos se presentan entre julio - agosto y enero - febrero, correspondiendo el menor valor total mensual al mes de julio la estación Paraíso (66,8 mm).

4.5.2.2. Distribución espacial de la precipitación. En el mapa de Isoyetas anuales (**Anexo - Mapa 7**), se observa que las cantidades máximas de precipitación que exceden los 2300 mm se localizan hacia el sur de Armenia y los valores menores, cercanos a los 1850 mm se ubican hacia el sur - oeste de la localidad de la Tebaida.

Para determinar la precipitación media anual de toda el área se recurre a la siguiente metodología:

- 1) Determinación de las áreas entre isoyetas.
- 2) Cálculo de la precipitación promedio entre cada una de las isoyetas, y el valor obtenido se multiplicó con el área respectiva, para así determinar una lámina de agua para cada una de las áreas.
- 3) Finalmente se realizó un promedio de las láminas de agua, para así determinar la precipitación media anual del área que se estimó en 1963,7 mm y sus resultados se observan en la **(Tabla 6)**.

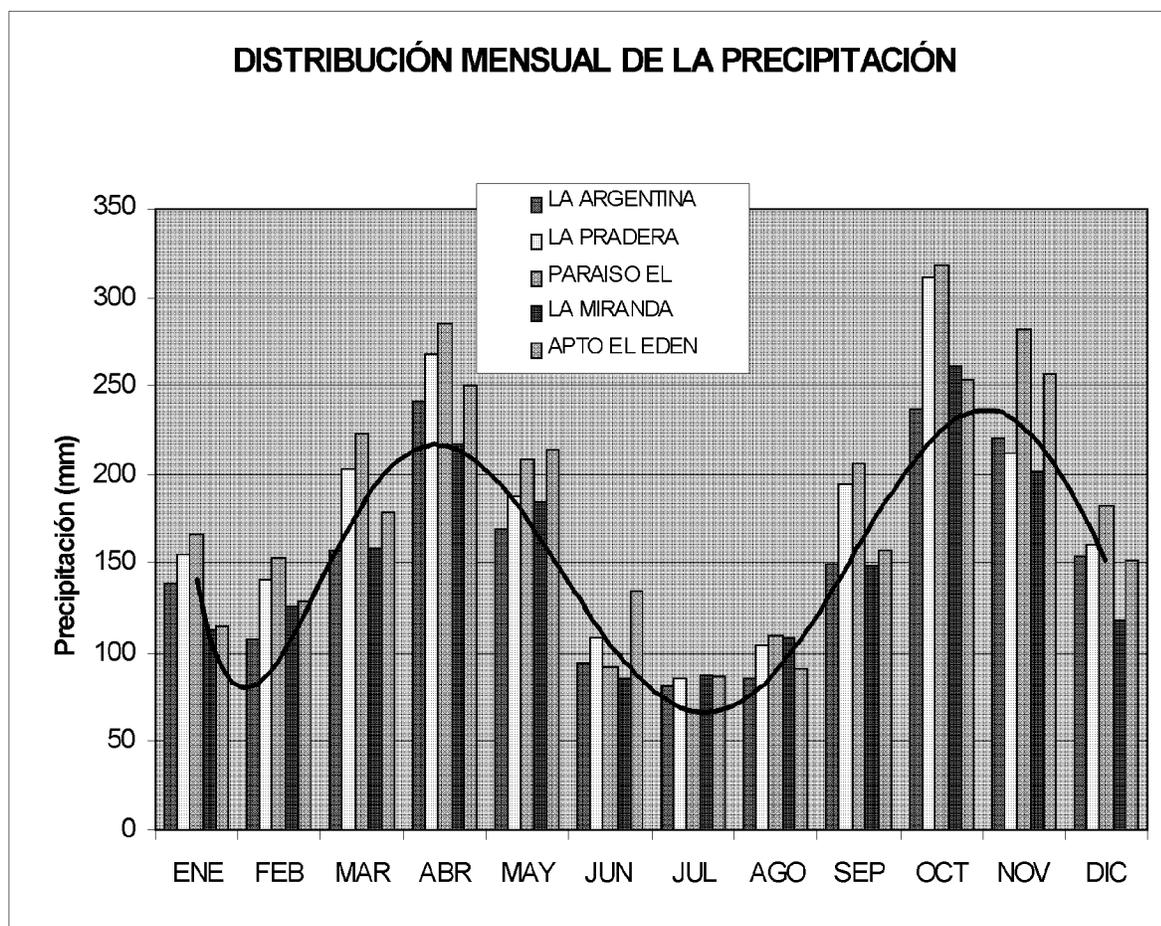
Tabla 6

Cálculo de la precipitación media de la cuenca de la Quebrada Cristales

ISOYETAS	A_i (km ²)	A_i/AT	P_{prom} (mm)	$A_i/AT * P_{prom}$ (mm)
2350-2300	0.4	0.0042	2325	9.765
2300-2250	1.8	0.019	2275	43.225
2250-2200	5.58	0.059	2225	131.275
2200-2150	6.4	0.068	2175	147.9
2150-2100	5.5	0.059	2125	125.375
2100-2050	7.3	0.078	2075	161.85
2050-2000	7.5	0.080	2025	162
2000-1950	11	0.118	1975	233
1950-1900	9.2	0.098	1925	188.68
1900-1850	12.8	0.137	1875	256.9
1850-1800	25.72	0.276	1825	503.7

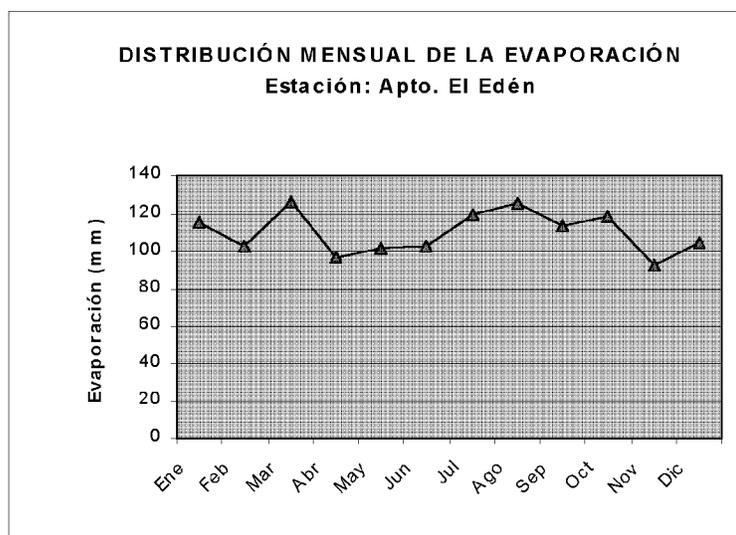
$$\Sigma = 1963.7 \text{ mm}$$

Gráfico 1



4.5.3. Evaporación. Los datos medios mensuales registrados en el tanque de evaporación tipo A, de la estación sinóptica principal del aeropuerto el Edén, se presentan en la **(Gráfica 2)**. Los valores oscilan entre 92 y 126 mm, registrándose el mayor valor en el mes de marzo y el menor en el mes de noviembre **(Gráfica 2)**.

Gráfica 2



4.5.4. Evapotranspiración (ETP). La evapotranspiración potencial se define como la pérdida de agua que sufre un terreno totalmente cubierto por vegetación o cultivo verde de poca altura, por evaporación del suelo y transpiración de las plantas, sin que exista limitación de aguas. Para el área de estudio se ha calculado la ETP con el método de Thornthwaite, utilizando los registros climáticos disponibles de la estación del aeropuerto el Edén; posteriormente se realizó la corrección en función de la latitud por mes correspondiente (Tabla 8). Cabe destacar que es difícil trabajar con una serie completa para los años comprendidos entre 1952 a 1993 para todas las variables que involucra el cálculo de la evapotranspiración potencial; sin embargo se hizo una aproximación a partir de los valores promedios multianuales de datos reportados por el HIMAT. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizaron los métodos de Penman modificado y Thornthwaite (**Tabla 7**).

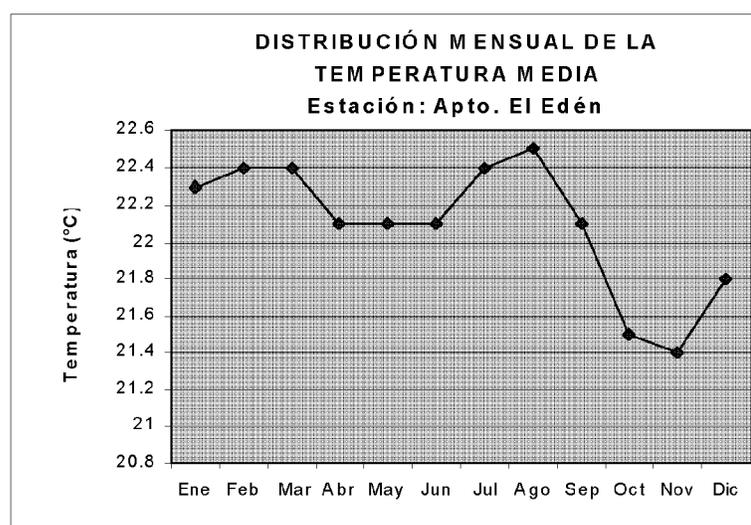
Tabla 7

Cálculos de la ETP

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	SUMA	a
Temperatura (°C)	22.3	22.4	22.4	22.1	22.1	22.1	22.4	22.5	22.1	21.5	21.4	21.8		
Indice calórico	9.62	9.68	9.68	9.49	9.49	9.49	9.68	9.75	9.49	9.10	9.04	9.29	113.80	2.53
ETP	8.75	8.85	8.85	8.55	8.55	8.55	8.85	8.95	8.55	7.98	7.89	8.26	102.59	
ETP correg(cm)	8.92	8.23	9.11	8.72	9.07	8.81	9.38	9.40	8.64	8.22	7.81	8.43	104.74	
ETP (mm)	89.25	82.30	91.15	87.24	90.66	88.10	93.80	93.97	86.39	82.18	78.06	84.28	1047.39	

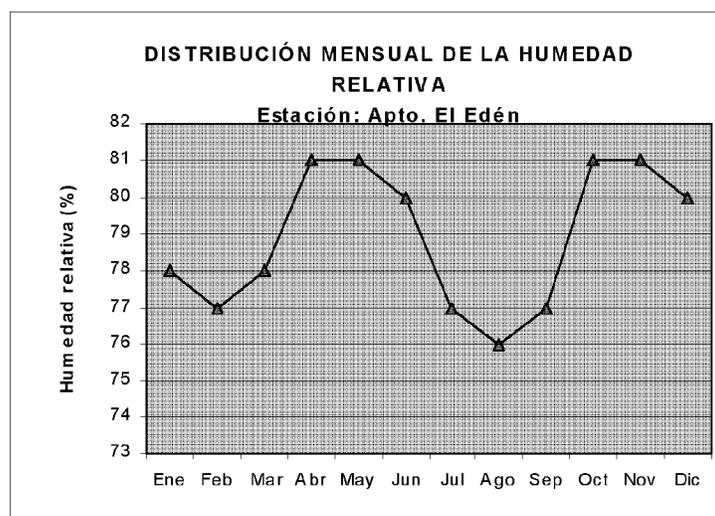
4.5.5. Temperatura. Con base en los registros de la estación aeropuerto el Edén puede observarse que dentro del área de estudio no se presentan grandes variaciones en la temperatura del aire. Los valores máximos se observan hacia el mes de agosto, cuando la media alcanza un valor 22,5°C y los valores mínimos se presentan en noviembre, cuando su valor alcanza 21,4°C (**gráfica 3**).

Gráfica 3



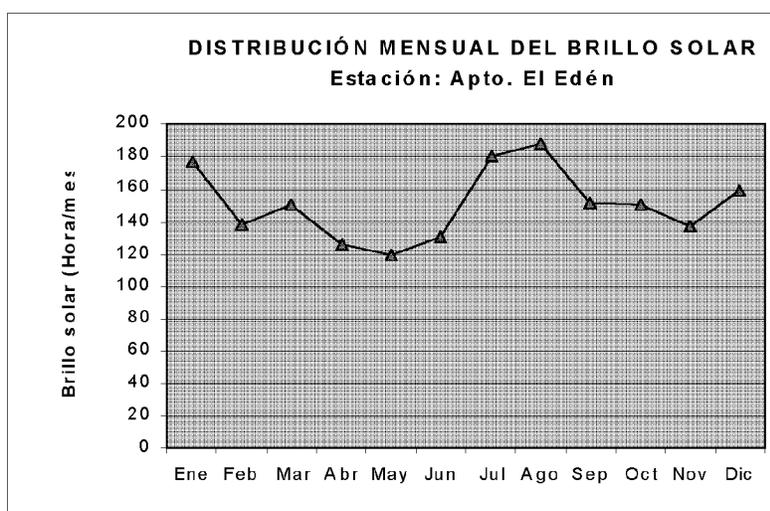
4.5.6. Humedad relativa. La humedad relativa media mensual oscila entre 76 y 81%. Para los meses de octubre y noviembre alcanza este último valor. El valor más bajo se presenta en el mes de agosto (**Gráfica 4**).

Gráfica 4



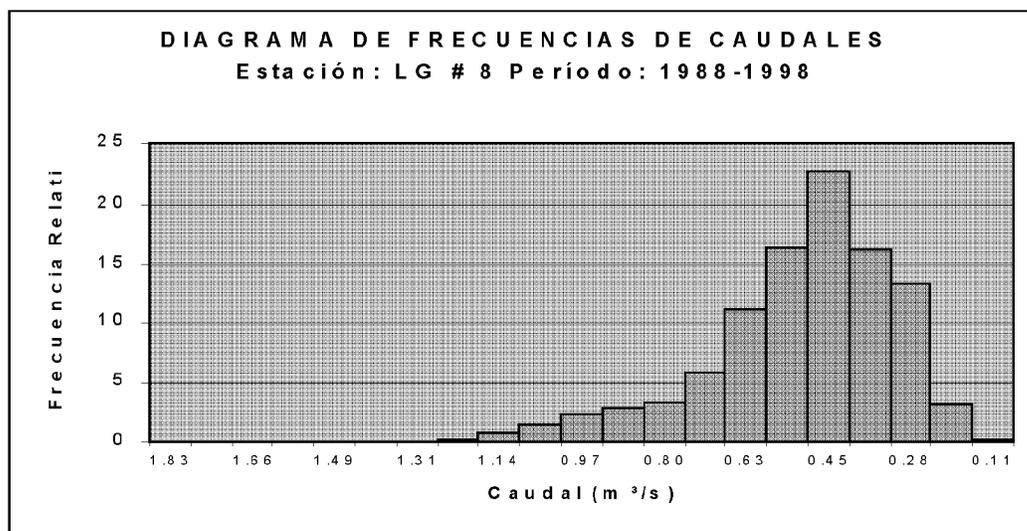
4.5.7. Brillo solar. Los valores de brillo solar mensual varían entre 120 y 129 hora/mes. Los mayores registros se obtienen en los meses de enero, julio y agosto. Para los meses de abril y mayo se obtienen los menores registros (**Gráfica 5**)

Gráfica 5



4.5.8. Análisis del régimen de caudales. El análisis del régimen de caudales se realiza a partir de la información diaria registrada en la estación limnigráfica operada por la C.R.Q. desde 1988, donde el caudal medio máximo corresponden a $1.83 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal medio a $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ HIMAT (**gráfica 6**).

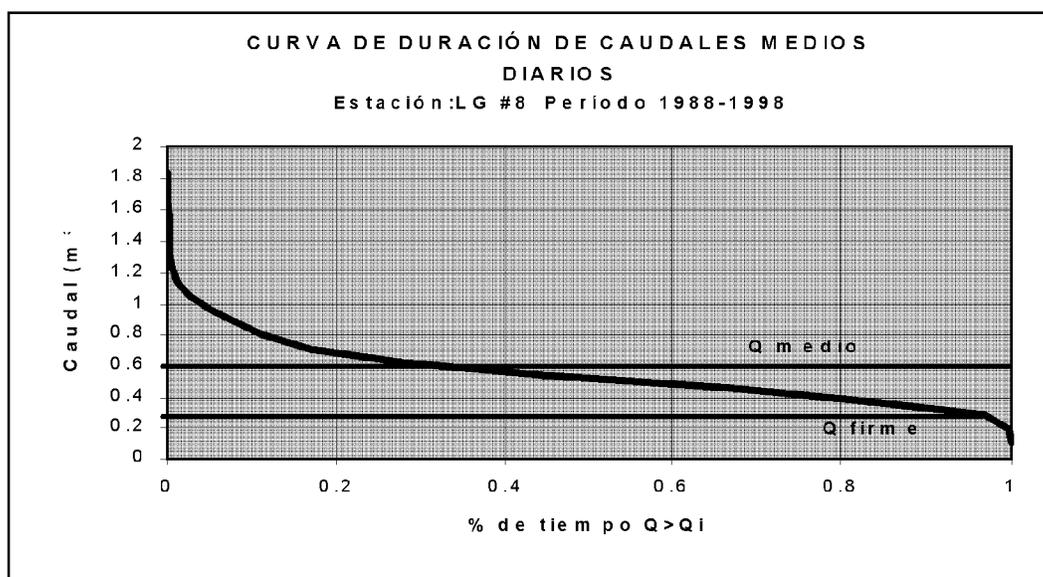
Gráfica 6



4.5.9. Análisis del diagrama de frecuencias. En el diagrama de frecuencia puede observarse que los caudales más frecuentes oscilan entre 0,28 y 0,63 m³/s. HIMAT. La distribución es asimétrica presentándose con más frecuencia los valores mínimos que los máximos.

4.5.10. Curva de duración de caudales. La curva de duración de caudales se define para caudales medios diarios, graficando los valores Q_i contra la probabilidad de ocurrencia. Período comprendido entre 1988 - 1998 HIMAT.(Gráfica 7, Tabla 8).

Gráfica No 7



De la anterior gráfica se deduce que es una cuenca de montaña correspondiente a un río pequeño, cuyas crecientes no duran mucho. La cuenca se caracteriza por tener buen drenaje y buena retención de agua, además la corriente es permanente.

El caudal firme se estimó como $Q_{95\%}$ y corresponde a $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal medio calculado como el área bajo la curva es de $0,60 \text{ m}^3/\text{s}$, este es la demanda máxima que se puede garantizar. El caudal medio equivale a $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.5.10.1. Estimación de la escorrentía subterránea anual. En la cuenca de la

Quebrada Cristales no hay elementos que produzcan una escorrentía superficial diferida y además no existe una irregular repartición espacial en las lluvias que originan la escorrentía.

Existen diversos métodos utilizados en los últimos años, pero el método más exacto, aunque también el más laborioso es el de separación por hidrogramas

Tabla 8

**Cálculo de la curva de duración de caudales Quebrada Cristales.
Estación LG #8**

RANGO DE CLASE	RANGO DE CLASE	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA ABS. ACUMULADA	FREC. ACUM RELATIVA	PROBABILIDAD
1.83	1	1	1	0.03032141	0.047619048
1.744	2	0	1	0.03032141	0.095238095
1.658	3	0	1	0.03032141	0.142857143
1.572	4	0	1	0.03032141	0.19047619
1.486	5	0	1	0.03032141	0.238095238
1.4	6	0	1	0.03032141	0.285714286
1.314	7	0	1	0.03032141	0.333333333
1.228	8	0	1	0.03032141	0.380952381
1.142	9	0	1	0.03032141	0.428571429
1.056	10	0	1	0.03032141	0.476190476
0.97	11	0	1	0.03032141	0.523809524
0.884	12	0	1	0.03032141	0.571428571
0.798	13	0	1	0.03032141	0.619047619
0.712	14	0	1	0.03032141	0.666666667
0.626	15	0	1	0.03032141	0.714285714
0.54	16	0	1	0.03032141	0.761904762
0.454	17	0	1	0.03032141	0.80952381
0.368	18	0	1	0.03032141	0.857142857
0.282	19	0	1	0.03032141	0.904761905
0.196	20	0	1	0.03032141	0.952380952
0.11	21	0	1	0.03032141	1
		1			

En la **(Gráfica 8)**, se representa el caudal de la quebrada Cristales correspondiente a una tormenta. En los momentos anteriores a la lluvia se supone que toda el agua es de origen subterráneo. En el momento A, en que comienza la lluvia, una parte del flujo es debida al agua caída sobre el propio cauce y después empieza a llegar el agua de la escorrentía superficial y de la subsuperficial. El tramo AB se denomina ascendente; el punto B es la cresta (más que un punto suele ser una zona) y el tramo BCDE, descendente o de agotamiento.

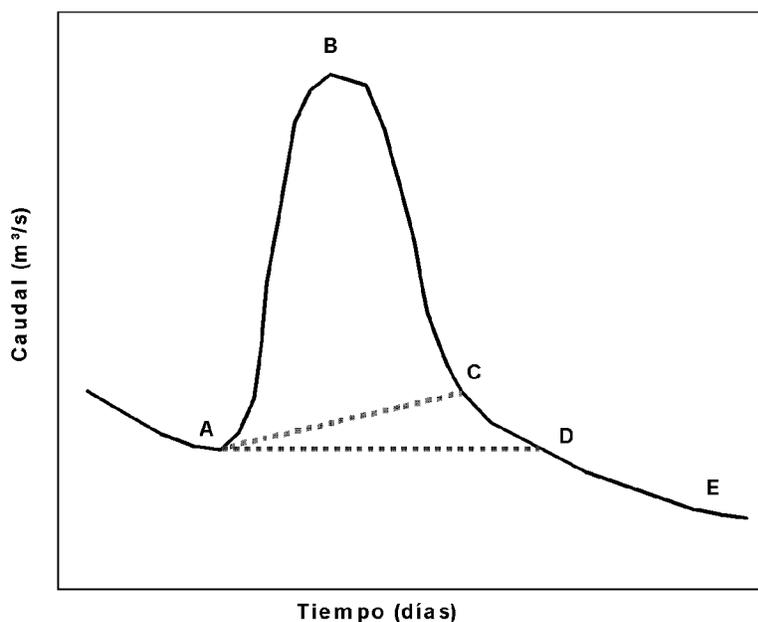
La práctica común es separar el caudal que representa el hidrograma en sólo dos componentes, englobando en la escorrentía la precipitación sobre el cauce y la escorrentía subsuperficial.

Existen varios métodos para la descomposición de hidrogramas. El procedimiento más sencillo para separar el flujo base, es trazar una línea recta horizontal desde el punto A hasta el punto D; la escorrentía directa o superficial correspondiente a la tormenta estaría representado por el área ABD. Este procedimiento equivale a suponer que el flujo base se mantiene constante hasta que ha descargado toda la escorrentía superficial, muchos consideran esta apreciación muy grosera y el punto D resulta demasiado alejado.

Otro método consiste en considerar el punto C el de máxima curvatura, y unirlo directamente con el punto A, y esto equivale a suponer un incremento de flujo base debido al aumento de la escorrentía directa, que varía la situación más aproximada con la realidad. (Toebes y Durivaev, 1970). Ver **(Gráfica 8)**.

Grafica 8

Hidrograma de una tormenta en la Quebrada Cristales . Métodos



Este último método fue el seleccionado para descomponer el hidrograma de los registros de caudal diario de la estación LG#8.

Por lo general no es suficiente analizar un único año, sino que debe estudiarse los hidrogramas de un año húmedo, un año medio y otro seco. Para este análisis el año húmedo corresponde a 1991, el medio a 1997 y el seco a 1994.

Además, con objeto de evitar interpretaciones básicamente erróneas, fue útil, tener en cuenta las condiciones hidrológicas (lagos, zonas pantanosas, régimen de precipitaciones, entre otros), e hidrogeología (situación de los acuíferos, traveses subterráneos de otras cuencas). Con frecuencia habrá que plantearse el análisis como parte de un balance hídrico mas general, en que deberán tenerse

en cuenta las variaciones del volumen de agua almacenada en los embalses superficiales y subterráneos, eventualmente, en la zona de humedad del suelo.

La escorrentía subterránea anual, como es lógico, varía mucho de unas regiones a otras, aunque con frecuencia, resulta más elevada de lo que muchos piensan.

4.5.11. Escorrentía directa. Los valores de escorrentía directa para el cálculo del balance hídrico se obtuvieron de datos de la estación limnigráfica # 8, sobre la Quebrada Cristales, única presente en el área. Con los valores de los caudales medios diarios (m³/seg) se elaboraron hidrogramas para los años 1987 - 1993. Cabe destacar que la falta de valores y la poca confiabilidad en la toma de los mismos no garantizan el análisis para los dos años específicos referentes al más seco y al más húmedo (**Tabla 9**).

Tabla 9

Valores de lámina de escorrentía directa mensual

	Enero	Feb	Marz	Abri	Mayo	Juni	Juli	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Escorrentía directa	5.43	0.85	2.74	3.82	5.0	0.47	0.37	0.94	2.55	3.30	6.42	9.45

4.5.12. Movimiento del agua subterránea. El mapa de líneas equipotenciales para pozos muestra la tendencia regional del movimiento del agua subterránea hacia el río la vieja en su sector sur siguiendo la dirección de depositación del abanico formado por la formación Glacis del Quindio y se divide en dos direcciones

(Figura 9) hacia el suroeste y hacia el oeste. Las variaciones de estas tendencias son efectos del control estructural ejercido por la falla Montenegro (Cauca - Almaguer), al controlar el río espejo y levantar un bloque al occidente del área estudiada.

4.5.13. Zonas de recarga. Existen dos zonas de recarga para las aguas subterráneas del área. La primera proviene de la recarga superficial que se produce por la infiltración de la precipitación y de la escorrentía a través de los suelos.

La red de flujo de las aguas subterráneas de los acuíferos profundos indica que el flujo proviene del río Quindío, el cual se encuentra controlado estructuralmente, constituyéndose en otra zona de recarga potencial.

4.6. BALANCE HIDRICO

4.6.1. Generalidades y principios de establecimiento. El balance hídrico global tiene por objeto principal establecer las entradas y salidas del agua a la cuenca en un periodo de tiempo determinado.

Para ello hay que tener en cuenta el ciclo hidrológico, determinando cada uno de sus componentes y tratando de establecer un balance anual, teniendo en cuenta la ecuación general:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \text{Cambio de almacenamiento}$$

Esta simple relación del balance de agua, es la base de la ecuación del ciclo hidrológico.

$$P = E + R + I$$

donde:

- P = Precipitación.
- E = $E_d + E_t$ = Evapotranspiración.
- E_d = Evaporación directa.
- E_t = Transpiración.
- R = $R_1 + R_2$ = Caudal total
- R_1 = Escorrentía superficial.
- R_2 = Flujo base.
- I = Infiltración.

De estos parámetros, la precipitación fue calculada para el área de estudio por medio del método de las isoyetas, dando como resultado una precipitación anual de 1963.7 mm.

El otro parámetro a tener en cuenta es la evapotranspiración real (ET), no utilizándose la ETP (evapotranspiración potencial), ya que ésta es un límite

superior de la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera, debe determinarse la evapotranspiración real y para esto debe tenerse en cuenta no sólo ese límite sino el agua que efectivamente existe en la zona. Y con la condición:

$$ET \leq ETP$$

Es decir la evapotranspiración real menor o igual que la evapotranspiración potencial.

Algunos autores han propuesto fórmulas para calcular la evapotranspiración real en función de variables climáticas como precipitación, temperatura, entre otras. Una de las más utilizadas es la fórmula de Coutagne, la cual se eligió para el cálculo de la evapotranspiración real en la cuenca de la quebrada Cristales, para valores de precipitación comprendidos entre $1/8\lambda$ y 1λ

$$\lambda = 1 / 0.8 + 0.14 t$$

t = temperatura media anual en °C

Countagne propone la fórmula

$$ET = P - \lambda P^2$$

ET = Evapotranspiración real en m/año

P = Precipitación en m/año.

Haciendo el cálculo para el área de estudio se determinó una ETR de 998 mm/año.

El último parámetro a involucrar es la escorrentía de la cual hay que tener en cuenta que dentro del área de estudio, la única estación limnigráfica que se encontraba sobre la quebrada no estaba situada al cierre de la cuenca en su desembocadura en el río La Vieja. La estación LG#8 está ubicada al final de la cuenca de la quebrada Cristales.

Para efectos del balance hídrico se requería generar los datos de caudal medio anual y flujo base anual al final de la cuenca; para lo cual se asumió una relación de área con el caudal, y teniendo en cuenta que las características de la zona en la cuenca baja siguieron un patrón similar al de la cuenca alta.

De la anterior relación resultó que el caudal medio anual de toda la cuenca de la quebrada Cristales es de 1.85 m³/s, y el volumen de flujo base medio anual es de 36.773.500 m³/año.

En resumen los datos para el balance hídrico son:

Precipitación = 1964 mm

Evapotranspiración = 998 mm

Caudal medio anual = 630 mm

Caudal superficial = 236 mm

Flujo Base = 394 mm

De la primera ecuación del balance, se descompone el caudal total en caudal superficial y flujo base, obteniéndose la siguiente ecuación

$$P = ET + R1 + R2 + I$$

De acuerdo con los anteriores datos la infiltración N será igual a:

$$I = P - ET - R1 - R2 = 336 \text{ mm}$$

El volumen de recarga por infiltración anual es del orden de 3.315.000 m³/año.

También se realizó un balance hídrico climático mensual para la estación climatológica que se encuentra dentro del área de estudio en el aeropuerto El Edén (Tabla 10, Gráfica 10).

Tabla 10

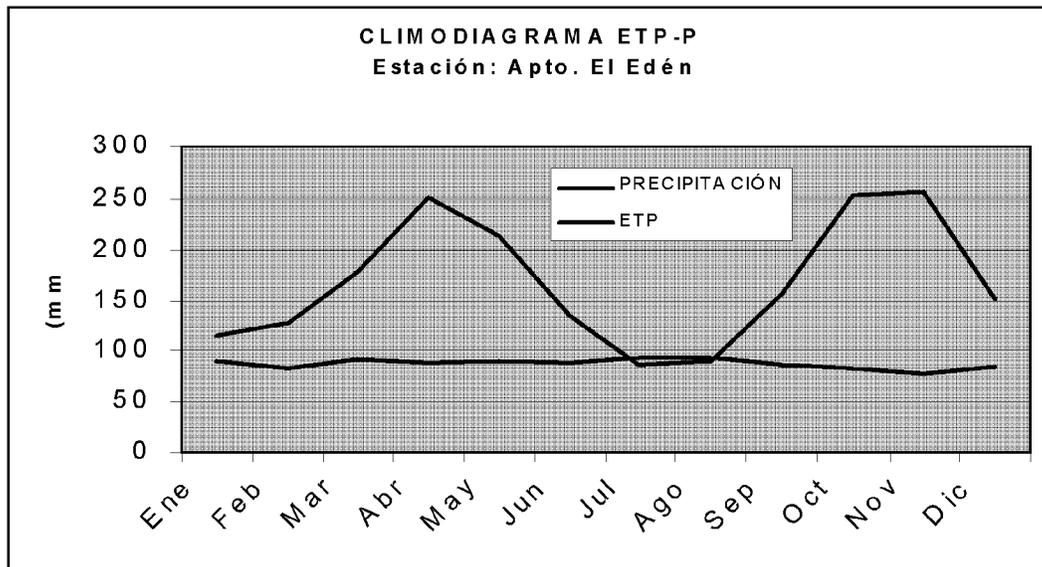
Balance hídrico estación Aeropuerto El Edén

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PRECIPITACIÓN	114.9	128.3	178.5	250.6	214.3	134.1	86.9	90.6	156.7	253.3	256.6	151
ETP	89.25	82.3	91.15	87.24	90.66	88.1	93.8	93.97	86.39	82.18	78.06	84.28
P-ETP	25.65	46	87.35	163.4	123.6	46	-6.9	-3.37	70.31	171.1	178.5	66.72
HUMEDAD SUELO	100	100	100	100	100	100	93.1	89.73	100	100	100	100
EXCESOS	25.65	46	87.35	163.4	123.6	46			79.73	171.1	156.6	66.72
DÉFICIT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR	89.25	82.3	91.15	87.24	90.66	88.1	93.8	93.97	86.39	82.18	78.06	84.28

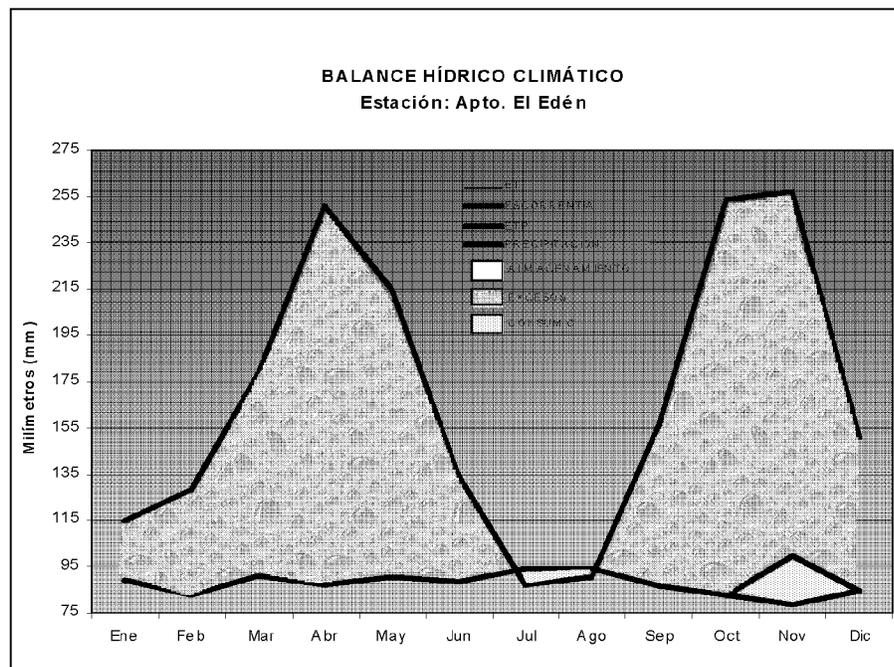
De acuerdo con el climodiagrama⁶ obtenido de la (Gráfica 9) y el balance calculado, podemos concluir que durante todo el año la cuenca de la quebrada Cristales no presenta deficiencias de agua, exceptuando un déficit leve entre los meses de julio y agosto. La renovación de la humedad del suelo se presenta durante el primer bimestre del año y entre septiembre y octubre. El suelo permanece totalmente saturado la mayor parte del año.

⁶ MARTINEZ CARLOS EDUARDO. Modelo hidrogeológico conceptual y formulación de las bases del modelo matemático del acuífero Glacis del Quindío. Bogotá 1999 p 36 – 38.

Gráfica 9



Gráfica 10



4.7. HIDROGEOLOGIA

El área de estudio la cual corresponde a la subcuenca de la quebrada cristales se caracteriza por presentar una geomorfología suavemente ondulada a plana y hace parte de una geomorfa regional muy particular sobre el flanco y piedemonte de la cordillera central, donde afloran unidades roca-sedimento de edad cuaternaria.

La subcuenca de la Quebrada Cristales se ubica sobre la parte media y distal del abanico de Armenia, incluyendo el paso de este hacia el Valle del Río La Vieja, cuyas unidades litológicas aflorantes corresponden con las unidades roca-sedimento conocidas con el nombre de Glasis del Quindío (TQgp). Deposito de Llanura Aluvial (Qal) y Deposito de Terrazas Aluvial (Qta).

El área es drenada por corrientes que forman un patrón de drenaje paralelo y subparalelo tal como la Quebrada Jaramilla. El Cantor y la Argentina en su parte sur, la quebrada Cristales la cual corre en dirección N-S en la parte central del área recolectando todo el drenaje proveniente de la zona nororiental tal como la Quebrada El Rhin, Los Angeles, Germania y Tatabras. En el sector sur del área y específicamente en inmediaciones de la Hacienda Maravelez La Quebrada Cristales toma un rumbo este-oeste desembocando posteriormente en el río La Vieja.

4.7.1. Unidades hidrogeológicas. Con base en las características litológicas de las unidades geológicas presentes en el área, su tipo de porosidad, grado de

permeabilidad, en la calidad físico - química del agua para consumo humano como para riego en ella almacenada y en su importancia como acuíferos se elaboró el mapa hidrogeológico (**Anexo – Mapa 8**), donde se diferenció un grupo hidrogeológico fundamental conformado por tres sistemas de acuíferos; la dirección aproximada del flujo de agua subterránea de los pozos estudiados con la información referente a su profundidad, nivel estático, caudal y clasificación del agua para riego. A continuación se hace una descripción de las unidades hidrogeológicas.

*** Sedimentos y rocas porosas semiconsolidadas con importancia hidrogeológica relativamente grande a pequeña:** en esta categoría se delimitan tres sistemas de acuíferos constituidos por sedimentos y rocas semiconsolidadas del cuaternario denominadas : i) depósitos Glacis del Quindío (TQgp); ii) depósitos de terraza aluvial (Qta) y iii) depósitos de llanura aluvial (Qal). El primer sistema acuífero y de mayor importancia hidrogeológica corresponde a los depósitos del Glacis del Quindío, que se extiende desde el nororiente, hasta el sur del área, identificado en el mapa hidrogeológico con la secuencia alternante de sedimentos y rocas sedimentarias semiconsolidadas de origen fluvial y rocas volcánicas de origen explosivos que conforman paquetes de estratos cuyo espesor conocido varían entre 150 a 200 m. Su extensión es de 83.5 Km² aproximadamente.

La secuencia aflorante de los depósitos del Glacis del Quindío (TQgp)n, en la parte norte del área se caracteriza por presentar niveles de arenas volcánicas finas, medias hasta muy gruesas, con abundantes feldespatos y anfíboles, grises a blanco friables, interestratificada hacia su base con una arcilla arenosa volcánica y en su parte más superior con una capa orgánica desarrollada a partir de un estrato de ceniza volcánica.

En la parte centro - oriental la secuencia corresponde a una alternancia de brechas volcánicas o tobas líticas constituidas por fragmentos angulares de andesita, dacitas en una matriz rojiza masiva (vidrio volcánico?)

En la parte central del área se presenta un grueso paquete de arenas volcánicas de grano fino a medio infrayacidas por un nivel arcilloso rojizo a pardo masivo.

Hacia el suroriente del área la secuencia se torna más dendrítica y semiconsolidada presentandose una alternancia de conglomerados clastosopórtados constituidos por cantos redondeados de andesita - dacitas, tamaño grava a bloque, envueltos en una matriz tamaño arena media a gruesa y areniscas de grano fino - medio conglomeráticas con laminación plana paralela.

La prospección geoelectrica mostró un modelo de cuatro capas de gran extensión regional tanto en superficie como en profundidad. La capa más superficial tiene resistividades que varían tomando valores desde 43 Ohm-m (SEV 13) hasta 800 Ohm-m (SEV 25 y 26) en la parte sur y nororiental del área respectivamente con un espesor que varía entre 4 (SEV 26) y 24 (SEV 25), metros en la parte nororiental del área. Litológicamente se correlacionan con un suelo arcilloso alterado interestratificado en arenas finas con una matriz arcillosas.

La segunda capa tienen resistividades que oscilan entre 15 Ohm-m (SEV1) hasta 75 Ohm-m (SEV18) en la parte central y centrooriental del área respectivamente, con un espesor que varía entre 20 (SEV1) y 50 (SEV18 y 19) en la parte centro oriental y centro occidental del área. Litológicamente se correlaciona con arenas de grano medio a grueso, gravas finas con una matriz arcillosa. La mayor parte de los aljibes y pozos de hasta 70 m de profundidad captan esta capa acuífera.

La tercera capa presenta los valores más altos de resistividad que oscila entre 100 Ohm-m (SEV 7) y 500 Ohm-m (SEV25) en la parte sur y nororiental del área

respectivamente, con un espesor que varía desde 40 Ohm-m (SEV 25 y 26) hasta 110 (SEV 22 y 16) en la parte nororiental y central del área. Litológicamente se correlacionan con intercalaciones de conglomerados, tobas, flujos de ceniza y flujos de escombros. Los pozos más profundos del área como 243ID-29 Anapoima, 243ID-102 el Arco, y 243ID-30 la Marina captan estos acuíferos.

La cuarta capa o basamento geoelectrico, presenta resistividades que oscilan entre 15 Ohm-m (SEV 1 y 25) hasta 65 Ohm-m (SEV 17) en la parte central y nororiental del área. La profundidad del techo va desde 94 (SEV 27) hasta 155 metros (SEV 7) en la parte sur y 155 metros (en los SEV 16 y 22) en la parte centro oriental del área. Los pozos mencionados anteriormente captan niveles de estos acuíferos .

El sistema acuífero TQgp, es de tipo **semi libre a confinado, de extensión regional, con permeabilidad moderada a alta, de origen fluvial y volcánico**. El nivel estático de los pozos que la captan oscilan entre 16 a 48.7 m de profundidad y en los aljibes entre 1.0 a 46.0 m.

INGEOMINAS, 1994 estimó la recarga del acuífero realizada a través de la infiltración del agua precipitada directamente sobre los suelos en un área de 83.5 Km² con un volumen de 81278.9×10^3 m³/año; así como del agua proveniente de las quebradas que drenan al área a través de zonas de micro - fallas locales recientes. La descarga ocurre a través de pozos con caudales que oscilan entre 0.9 a 46.0 Lps. El flujo subterráneo es controlado por las condiciones geológicas y tectónicas locales y regionales. Es así como un flujo subsuperficial proviene con dirección NE-SW pasando por la cabecera municipal de la Tebaida hacia la vereda la Argentina donde convergen las líneas de flujo; hacia el oriente de el Aeropuerto el Eden converge un flujo que se localiza hacia la Finca el Silencio y finalmente hacia el norte se observa otro flujo que converge hacia la Finca la Unión aproximadamente.

El agua con tratamiento es apta para consumo humano y para riego se clasifica como C1S1. Es de origen bicarbonatada, de tipo cálcico-Magnésica y sodica, dulce (conductividad específica menor de 1000 micromhos/cms) o sea con un contenido bajo a medio en los principales iones en solución. En cuanto a su dureza se clasifica como blanda o moderadamente dura, con un contenido de CaCO_3 en mg/L entre 10 y 93 mg/L, valores admisibles en el agua para uso doméstico. El agua de los aljibes 243ID- 20.24.45 y 108 no es apta para consumo doméstico porque su contenido de NO_3 es superior a 45 mg/l, valor no recomendable de agua potable.

El segundo sistema acuífero en orden de importancia está representado por los depósitos de llanura aluvial (Qal) que se encuentra principalmente al sur del área sobre la planicie de inundación de la quebrada Cristales y el río la vieja. Litológicamente se encuentra constituido por arcillas, limos, arenas y gravas en diversas proporciones en una matriz areno-arcillosa a limo-arenosa. El ambiente de depositación de este sistema acuífero es de orden continental de tipo fluvial y el origen de los materiales provienen de la descomposición y posterior transporte de las unidades roca-sedimentos aflorantes tanto en el área como de las estribaciones occidental de la cordillera central.

El estudio geoelectrico señala un espesor conocido de 200 m en la parte del área (SEV 5 y 4) donde se presentan cuatro niveles de diferentes espesor. La parte inicial tienen resistividades del orden de 40.70 Ohm-m, en su parte intermedia altas hasta de 200 Ohm-m y al final de los sondeos se encuentran resistividades de 20 Ohm-m.

La recarga del acuífero provienen de la precipitación y se efectúa sobre un área de 11.1 Km^2 con un volumen de $8371.19 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$, (INGEOMINAS, 1994). No existen pozos o aljibes a través de los cuales se realice la descarga y la dirección

del flujo subterráneo regional se desconoce. No se conoce la calidad físico - química de las aguas subterráneas almacenada en sus acuíferos.

El sistema constituido por los depósitos de terraza aluvial (Qta) es el de menor importancia hidrogeológica debido a la poca extensión de los mismos. Su composición litológica es similar a la de los depósitos aluviales. Se infieren la presencia de acuíferos de tipo libre, de extensión limitada, recargada principalmente por el agua proveniente de la precipitación en la cual se ha estimado sobre un área de 0.5 Km², con un volumen de 486.7 x 10³ m³/año, (INGEOMINAS, 1994). Su espesor no se conoce al igual que la calidad físico - química de sus aguas subterráneas, esto último debido a la no presencia de puntos de agua sobre este sistema.

4.7.2. Características hidrogeológicas del sistema acuífero, Glacis del Quindio. El depósito del Glacis del Quindio (TQgp) constituye el sistema acuífero de mayor interés. A continuación se hace una descripción de las características más importantes de este sistema acuífero:

Extensión : Regional, de gran importancia hidrogeológica

No de pozos perforados: 12, lo cual equivale al 9% del total de puntos de Agua inventariados en el área.

Profundidades captadas:

Pozo	Intervalo (profundidad) m	Espesor (filtros) m
243ID-28	43-173.5	66
243 ID-30	49-142	60
243ID-102	28-56	28
243 ID-103	30-52	22
243 IIC-007	32-76	44

Tubería utilizada Diámetros: de 12" y 8" acero al carbón
de 12", 8" y 6" acero inoxidable
de 6" hierro galvanizado.

Caudales, niveles estáticos y dinámicos:

Pozo		Q (Lps)	NE (m)	ND (m)
243ID-28	Anapoima	74.0	16.7	36.00
243ID-30	La Marina	21.0	27.45	35.00
243ID-102	El Arco	18.0	32.51	43.92
243ID-103	El Horizonte	4.0	36.39	41.51
243IIC-007	Parque Recreacional	4.5	22.20	57.00

Parámetros hidráulicos:

Pozo	Transmisividad (m ² /día) Promedio	Capacidad específica Lps/m
------	---	-------------------------------

243ID-28	Anapoima	300	3.80
243ID-30	La Marina	200	3.50
243ID-102	El Arco	200	1.57
243ID- 103	El Horizonte	38	0.80
243II-C 007	Parque Recreacional	20	0.12

Resistividad de los niveles acuíferos según la geoeléctrica:

Capa	Resistividad (Ohm-m)	Tipo de captación
1	43-800	Aljibes más superficiales
2	15-75	Aljibes y pozos hasta de 70 m
3	100-500	Pozos profundos
4	15-65	Pozos profundos

Espesor del acuífero total: Variable, pero el conocido puede llegar hasta 200 m.

Clasificación del agua para riego: C1S1, o sea que se puede usar para irrigación en casi todos los suelos, sin riesgo de que se produzcan niveles perjudiciales de sodio intercambiables.

El sistema acuífero que presenta las mayores características hidrogeológicas para explotar el recurso agua subterránea para consumo humano e irrigación corresponden a los depósitos del Glacis del Quindio (TQgp).

A partir de la correlación litológica de los pozos 243ID-28 Anapoima, 243ID-30 La Marina, y 243ID-29 Cicolsa, se ha estimado el volumen potencial del agua subterránea almacenado aprovechable en la unidad interior y en el área de influencia de estos pozos teniendo en cuenta la presencia de un acuífero multicapas hasta de 145 m de profundidad y la siguientes aproximaciones (**Anexo – Figura 4**).

	Espesor Promedio(m)	Porosidad efectiva (Según Custodio y Llamas, 1983)	Area de Influencia Km ²	Volumen del agua almacenada. Apro Vechada.x 106m³
Capa acuífera 1	20	0.03	14	8.4
Capa acuífera 2	36	0.05	14	25.2
Capa acuífera 3	24	0.03	14	10.08
Capa acuífera 4	8	0.05	14	5.6
Capa acuífera 5	43	0.03	14	18.06
Volumen total				67.34 x 106 m ³

Cabe destacarse que el volumen almacenado por elasticidad del acuífero no se calculó porque su valor es despreciable con relación al volumen almacenado aprovechable calculado con base en la porosidad efectiva.

4.8. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.

4.8.1. Inventario de pozos. El área de estudio comprendida al noreste y sur del municipio de La Tebaida, se han **realizado** inventarios de puntos de agua (pozos aljibes y manantiales) por parte de la CRQ – INGEOMINAS, a partir de los cuales y para los propósitos del presente estudio se seleccionaron los que reflejaban el modelo hidrogeológico conceptual del Municipio de la Tebaida, durante el mes de Abril de 2000 con el objetivo de zonificar el área de vulnerabilidad a la contaminación y determinar la zona de protección de las aguas subterráneas de los mismos, así como verificar el potencial del recurso hídrico subterráneo, y su calidad físico-química

Para la realización del inventario se utilizaron planos topográficos escala 1:25.000 de IGAC, donde se localiza cada punto de agua identificado con el número de la plancha correspondiente, seguido por el orden del número de punto de agua inventariado dentro de esa plancha. Para la nomenclatura se utilizó la recomendada por la C.R.Q., basada en el código del DANE, donde se identifica el municipio de ubicación de la * fuente, es así como el 001, 401, y 470 pertenecen a Armenia, la Tebaida y Montenegro respectivamente. Las medidas del nivel de agua y profundidad de los pozos se referencian con respecto al nivel del terreno. **(Anexo – Cuadro 1a, 1b, 1c, 1d).**

La evaluación de los inventarios realizados indica que para el área del presente estudio se registraron un total de 124 puntos de agua, correspondientes a 12 pozos, 108 aljibes y 3 manantiales **(Anexo – Mapa 2).**

4.8.2. Pozos. En el área de estudio se inventariaron 12 pozos los cuales constituyen un 9% de los puntos inventariados. Dichos pozos captan a diferente profundidad niveles acuíferos de la unidad Glacis del Quindío (TQgp). Los pozos

que abastecen actualmente al acueducto de La Tebaida y están siendo administrados por la Empresa Sanitaria del Quindío S.A. (ESAQUIN), cada uno aporta el siguiente caudal para el acueducto urbano:

- Anapoima: 243ID-28	74.0 Lps
- La marina: 243ID-30	21.0 Lps
- Cicolsa: 243ID-29	20.0 Lps
- El Edén: 243ID-104	40.0 Lps

Los restantes pozos:

- El Arco: 243ID-102	18.0 Lps
- El Horizonte: 243ID-103	4.0 Lps
- Parque Recreacional: 243IIC-007	4.5 Lps
- Cristales 1: 243ID-26	1.0 Lps
- Cristales 2: 243ID-027	5.0 Lps
- La Elvira: 423ID-44	20.0 Lps
- Betulia: 243ID-47	0.5 Lps
- Club Campestre: 243ID-53	8.0 Lps

El pozo 2431D - 28 Anapoima; fue construido en 1998 por la firma Pozos Ltda y Hugo Delgado en convenio con la federación de cafeteros del Quindio. Presenta una profundidad de 176 metros y esta revestido con tubería de acero al carbón de 12" y 8" (telescopio) y filtros Roscoe Moss de acero al cobre y Jhonson de acero inoxidable de 12" y 8", explotándose con un caudal de 74.0 Lps aproximadamente para 1994. **(Anexo – Fotografía 7)**

El pozo 2431D - 30 la Marina; fue construido en 1981 por la firma Pozos Ltda. Presenta una profundidad de 143.0 metros y está revestido con tubería de acero inoxidable en 12 " y 18", filtros Roscoe Moss y Cañoat de acero al carbón; explotándose con un caudal de 21.0 Lps aproximadamente en 1994.

Cabe destacar que los pozos anteriores presentan problemas de corrosión e incrustaciones que reflejan por una patina o costra de óxido de hierro dura o gelatinosa sobre su sistema de bombeo y por el color del agua. **(Anexo – Fotografía 8)**

El pozo 243ID - 102 El Arco; fue perforado y construido por la compañía SERVIPOLE en 1972, para el Comité de Cafeteros del Quindío, y en la actualidad pertenece al beneficiadero el Arco. El pozo presenta una profundidad de 56.0 m; se encuentra revestido con tubería y filtros de acero inoxidable de 6" ranurado con acetileno, utilizándose para abastecimiento doméstico e irrigación con un caudal de 18.0 Lps. **(Anexo – Fotografía 9)**

El pozo 2431D - 103 El Horizonte; fue perforado y construido por la compañía SERVIPOLE en 1972, par el Comité de Cafeteros del Quindío y en la actualidad pertenece al beneficiadero el Horizonte. El pozo presenta una profundidad de 54 m; se encuentra revestido con tubería y filtros de acero inoxidable de 6" ranurados con acetileno; explotándose con un caudal de 4.0 Lps. **(Anexo – Fotografía 10)**

El pozo 243IIC-107 Parque Recreacional; fue perforado y construido por la compañía SERVIPOLE en 1972, para el Comité de Cafeteros del Quindío y en la actualidad pertenece y abastece el Parque Recreacional Popular de la Sociedad de Mejoras Públicas de Armenia. El pozo presenta una profundidad de 76.0 m; se

encuentra revestido con tuberías y filtros de acero inoxidable de 6" ranurados con acetileno, explotándose con un caudal de 4.0 Lps. **(Anexo - Fotografía 11)**

El pozo 243ID-104 El Edén, fue construido por la firma Independence en 1996., abastece el acueducto del municipio de la Tebaida y se encuentra en los predios de ESAQUIN, S.A., de donde directamente pasa a la planta de tratamiento. El pozo presenta una profundidad de 160 m y la bomba se encuentra a 60 m. El caudal del pozo es de 40 Lps en régimen permanente, pero su caudal óptimo es de 60 Lps.

Los pozos 243ID-26 Cristales I y 243D-27 Cristales II, presentan profundidades de 84 y 163 m, respectivamente, explotándose con caudales de 1.0 Lps y 5.0 Lps; utilizándose el agua para el consumo humano e irrigación (beneficiadero del café) de la finca Cristales, situada al sur-oriente del municipio de la Tebaida .

El pozo 243ID-29 Cicolsa, fue perforado y construido por la compañía de Hugo Delgado y Asociados en 1980, para el Comité de Cafeteros del Quindío, pero en la actualidad dicho pozo pertenece legalmente a la empresa Cicolsa (cítricos Colombianos S.A.). El pozo presenta una profundidad de 132 m; se encuentra revestido con tubería y filtros de acero inoxidable de 8", y se explota con un caudal de 20 Lps aproximadamente. Eventualmente este pozo aporta al acueducto de la Tebaida un caudal de 5 Lps. El caudal del pozo en régimen permanente es de 39 Lps y la bomba sumergible de 15 HP se encuentra a 35 m de profundidad

El pozo 243ID-44 La Elvira, presenta una profundidad de 84 m; se encuentra revestido con tubería y filtros de acero inoxidable de 8", y se explota con un caudal de 20 Lps aproximadamente. El agua se utiliza para abastecimiento doméstico e irrigación

El pozo 243ID-47 La Betulia, presenta una profundidad de 65m, revestido con tubería de 6" y se explota con un caudal de 0.5 Lps para abastecimiento doméstico e irrigación.

El pozo 243ID-53 Club Campestre, presenta una profundidad de 60 m, aproximadamente, revestido con tubería de hierro galvanizado de 6", explotándose con un caudal de 8.0 Lps para abastecimiento doméstico y uso recreacional (piscinas).

4.8.3. Aljibes. Los aljibes 108, constituyen el 88.6% inventariados, se caracterizan frecuentemente por no estar revestidos u ocasionalmente con ladrillos o anillos de cemento. Presentan diámetros que oscilan entre 0.8 y 3.0; explotándose ya sea obteniendo el agua con baldes, bombas manuales o motobombas eléctricas o de combustible (**Anexo – Cuadros 1a,1b,1c,1d**).

Los aljibes captan el agua de acuíferos superficiales o ligeramente profundos de la unidad geológica Glacis del Quindío (TQgp). Es así como un 8.25% de los aljibes captan niveles hasta de 10.0 m de profundidad; con caudales que oscilan entre 1.1. y 1.8 Lps. Un 45.87% de los aljibes captan un nivel acuífero entre 10 a 20 m, de profundidad, con caudales que oscilan entre 0.1 a 4.0 Lps.

Niveles acuíferos entre 20 y 30 m de profundidad son captados por un 41.28% de los aljibes, con caudales que oscilan entre 0.1 a 1.8 Lps. Un 2.75% captan un nivel acuífero entre 30 y 40 m de profundidad, con caudales menores de 1.0 Lps.

Aljibes con profundidades entre 30 y 40 m, no se reportaron durante el inventario y un aljibe 0.91% presenta profundidades > de 50m, como el ubicado en la hacienda el Cinco, el cual se explota con un caudal de 1.5 Lps, aproximadamente.

Destacamos que la población rural del municipio de la Tebaida se abastece con aguas provenientes de un acueducto por gravedad, por lo que un 95% de los aljibes inventariados se encuentran en reserva; utilizándose en caso de emergencia para abastecimiento doméstico y uso agrícola.

4.8.4. Manantiales. En el área de estudio se inventariaron tres manantiales, dos de tipo filtración (243D-49) y (243IIIB-2) y una de tipo contacto (243IIIB-1), los cuales en todas las épocas climáticas conservan flujo.

El manantial 243ID-49 la Marsella, se encuentra ubicado en la finca la Marsella en una zona baja; asociado al contiguo nacimiento de un drenaje de cauce aluvial juvenil; presenta un caudal de 0.9 Lps y su agua no se utiliza, fluyendo libremente hacia la parte suroccidente del predio.

El manantial 243IIIB-2 Portugalito, aporta un caudal de 2.25 Lps, utilizándose para abastecimiento doméstico e irrigación en la finca Portugalito.

El manantial 243IIB-1 Maravelez, fluye a través del contacto entre un nivel de arcillolitas y gravas en una matriz limo-arenosa; aflorante en la parte sur del área sobre predios de la finca la Rivera y Maravelez, utilizándose como abrevadero de animales. **(Anexo - Fotografía 11).**

4.8.5. Abastecimiento actual de agua. El municipio de la Tebaida se abastece de las aguas subterráneas que aportan los pozos: de Anapoima, la Marina y El el Edén, y adicionalmente se une el sistema de captación superficial de la quebrada Cristales. El uso de este sistema es esporádico, de acuerdo a las emergencias presentadas en los pozos. Estas aguas son recibidas en el acueducto municipal, ubicado en el sector Nororiental, aproximadamente a 1.8 Km del casco urbano y manejada por la Empresa Sanitaria del Quindío S.A. (E.S.P). Se reciben aproximadamente 70 Lps de los pozos, no estando a plenitud de su capacidad y entrando sus aguas a la planta de tratamiento. Según el operario para satisfacer las necesidades del municipio son suficientes 60 Lps. Para el tratamiento del agua, utilizan únicamente el proceso de cloración, porque según el fontanero, el agua es de muy buena calidad y solamente se necesita eliminar algunas bacterias. El acueducto consta de un canal que recibe las aguas de los pozos, se abren las entradas de acuerdo a las necesidades y dependiendo las horas del día, luego se miden los caudales a través de una canaleta Parshall, en su zona turbulenta se aplica el cloro líquido, luego ésta es conducida a un tanque sedimentador y mediante una caída de aproximadamente 5m es recogida y depositada en un tanque de 20x15x5 para de ahí ser distribuida a la comunidad.

El cubrimiento del acueducto se restringe a la cabecera municipal y algunas veredas próximas al mismo; por ésta razón la población rural periférica se ha visto en la necesidad de abastecerse por medio de sistemas de captación superficial generalmente deficientes y aprovechando las aguas subterráneas mediante la construcción de aljibes, con profundidades máximas de 30 a 40 m, y con el consiguiente peligro de la contaminación de sus aguas, a través de los pesticidas y productos agrícolas utilizados para el mejoramiento y protección de sus cultivos.

4.9 . GEOELECTRICA

Dependiendo del tipo de arreglo polar, se tienen varias clases de SEV, entre los que sobresalen los dispositivos Wenner y Schlumberger, siendo este último el más usado actualmente y el que se utiliza en esta evaluación hidrogeológica.

Se utilizó la información obtenida de la C.R.Q., de 26 sondeos eléctrico vertical (SEV), hechos y distribuidos en un área, entre 200 y 500 metros de profundidad de investigación ideal, en la zona de trabajo.

El equipo empleado fue un terrameter ABEM SAS 300C y el software utilizado fue el REXIS PLUS V 2.3 de Interpex Ltda., que se basa en la Standard Graphs For Resistivity Prospecting de la EAEG, desarrollada por Koefoed como método directo.

4.9.1. Interpretación. A partir de las curvas de campo se obtuvieron modelos de capas con las resistividades, ajustándolas mediante inversión directa y generando una serie de modelos alternativos, definiéndose los más adecuados. Igualmente la generación de modelos alternativos se muestra con su análisis de equivalencia, secciones y correlaciones eléctricas. Las curvas interpretadas se correlacionaron con el fin de obtener secciones geoeléctricas del subsuelo, las cuales muestran la continuidad y discontinuidad especial de las capas.

Se elaboraron mapas de isorresistividad para AB/2 50, 100, m, utilizando un Software (Surfer V 4.15), basado en el método geoestadístico de Kriging .

Para cada uno de estos mapas se observaron variaciones de las resistividades con respecto a la profundidad; sin embargo se presentan unos valores muy altos hacia el sur este del área de trabajo, los cuales se pueden interpretar como un basamento resistivo.

En síntesis, podemos decir que la formación Armenia se convierte en los depósitos de mayor interés hidrogeológico, con porosidad primaria entre el 10 y 20 % (Aristizabal y Gómez, 1990), consecuencia de las variaciones granulométricas, constituyéndose en un acuífero de extensión regional, confinado por la capa de ceniza suprayacente.

4.9.2. Métodos geofísicos. Según referencias de la C.R.Q., los sondeos realizados durante el primer semestre de 1994 y validados en terreno en febrero de 1999 se pudo constatar que nos encontrábamos frente a un acuífero de extensión regional.

De los 26 sondeos y de los 6 perfiles realizados en 1994 se tomaron 7 sondeos eléctricos verticales que conforman el perfil A - A'.

Aparte de este perfil se realizaron otros cinco en el área de los cuales cuatro tenían una orientación SW - NE y una dirección EW.

El perfil A - A' tiene una orientación SW - NE, y une los centros de medición SEV 7,3,22,17,26 y 25. Se puede definir de acuerdo al sondeo cuatro capas:

→ Capa No 1: es la capa más superficial, tiene resistividades que oscilan entre los 100 (SEV 17) y 800 (SEV 25 y 26) Ohm-m., con un espesor que varía entre 4

(SEV26) y 24 m (SEV 25). Litológicamente es correlacionable con un suelo alterado arcilloso con un suelo alterado arcilloso. Y arenas finas con matriz arcillosa.

→ Capa No 2: tiene resistividades bajas que van desde 38 (SEV 7) hasta 60 (SEV 17) Ohm-m, con un espesor entre 25 (SEV 7 y 17) y 48 m (SEV 26). Litológicamente es correlacionable con arena de grano medio a grueso, cuarzosa y sedimentos volcánicos. Esta capa constituye el nivel de la tabla acuífera más superficial de la región, generalmente los aljibes encontrados en el área de estudio están relacionados con esta capa.

→ Capa No 3: presenta los valores más altos de resistividad que oscilan entre 100 (SEV 7) y 500 (SEV 25) Ohm-m, con espesores desde 40 (SEV 25 y 26) hasta 110 m (SEV 22). Esta capa litológicamente se relaciona con intercalaciones de conglomerados, tobas, flujos de ceniza y flujos de escombros. Esta capa por constitución presenta algunos niveles de agua subterránea.

→ Capa No 4: esta capa se denomina el basamento geoelectrico por ser la última en detectar. Presenta resistividades bajas que oscilan entre 15 (SEV 35) y 65 (SEV 7) Ohm-m. La profundidad del techo va desde 94 (SEV7) hasta 155 (SEV 22 y 16) m. Litológicamente es correlacionable con unas intercalaciones de arenas, cantos y arcillas. Por los antecedentes del inventario de pozos y aljibes, y de acuerdo con los valores de resistividad, esta capa coincide con los acuíferos más profundos que están siendo explotados.

En el (**Anexo - Figura 6**) se puede observar el perfil A - A' y las cuatro capas anteriormente descritas. Los datos para la realización del perfil geoelectrico fueron tomados del informe de INGEOMINAS - CRQ de 1994.

4.9.3. Mapas de isorresistividad. Se realizaron dos mapas de isorresistividad a profundidades de 50 y 100 m, con el fin de ver el comportamiento de las resistividades arealmente. En el mapa de isorresistividad a 50 m (**Anexo – Mapa 9 y 10**), se ven claramente tres zonas que se diferencian por los valores de resistividad, de las cuales se puede deducir las áreas más óptimas para la explotación de las aguas subterráneas presentes en la zona. El contacto geoelectrico de la segunda capa con resistividad de 70 Ohm.m., delimita el área de estudio en cuatro zonas de interés hidrogeológico. La zona de mayor importancia se encuentra en la zona central, donde los pozos existentes tienen buenos caudales, además en el área con mayor densidad de información geoelectrica, alcanzando resistividades hasta de 200 Ohm.m., como segunda alternativa, a pesar de que la densidad de información geoelectrica es deficiente en la zona sur, donde se evidencian resistividades superiores a 70 Ohm.m., la tercera zona se encuentra en la parte occidental y nororiental del área de estudio, y presenta resistividades inferiores a 60 Ohm.m, valores que permiten deducir que las posibilidades de encontrar acuíferos de interés son muy pocas.

El mapa de isorresistividad a 100 metros de profundidad, muestra que existe un acuífero de extensión regional en el área presentando resistividades hasta de 280 Ohm.m., al oriente del aeropuerto de la Tebaida. La resistividad disminuye hacia los bordes nororiental y suroriental donde presentan resistividades menores de 60 Ohm.m. Lo anterior confirma que en una profundidad existen posibilidades de encontrar acuífero donde se extraigan volúmenes de agua en cantidad aceptable. De otra parte las líneas de isorresistividad indican que el rumbo de las capas tienen una orientación NW - SE y la inclinación de los estratos es SW, por lo tanto se espera que la escorrentía subterránea tenga ésta misma dirección. Además en la figura 12 se puede corroborar un brazo de la falla del Cauca - Almaguer que tienen una dirección SW - NE, teniendo una leve curvatura a la altura del aeropuerto del Edén.

4.9.4. Factor de formación. El parámetro de formación es la relación de la resistividad de una capa geológica con la resistividad del agua y sirve para dar un concepto preliminar sobre la calidad del agua.

Con base en el análisis físico - químico del agua y de las capas geoeléctricas, se deduce que la resistividad promedio del agua es de 50 Ohm.m., la resistividad promedio de la capa No2 que tiene interés hidrogeológico es de 60 Ohm.m., por lo tanto el factor de formación de ésta capa es de 1.1, esto indica el material depositado en ésta capa puede corresponder a arenas con limos o a gravas con matriz arcillosa. Caso similar se presenta para la capa No 4, donde las resistividades de estas son similares a la capa No 2.

Para la capa No 3 la resistividad promedio es de 170 Ohm.m, entonces el factor de formación de ésta capa es de 3.4, esto implica que el material presente en esta capa son gravas de grano medio a grueso con matriz arenosa, esta condición hace que esta capa sea la de mayor interés en esta zona.

Si buscamos la resistividad del agua con base en las resistividades de las capas geológicas y los factores de formación de esta, encontramos que la resistividad del agua para las capa No 2 y 3 son de 20 y 30 Ohm.m, respectivamente. Con base en éste análisis se deduce que la calidad del agua es buena y es apta para el consumo humano.

4.10. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS

Con el objeto de conocer los parámetros hidráulico de los acuíferos captados por los pozos de mediana a gran profundidad en el Municipio se revisaron las pruebas de bombeo realizadas por la CRQ.

4.10.1. Pruebas de bombeo

Los pruebas de bombeo a caudal constante , de larga duración con sus respectivas recuperaciones que se presentan en el (**Anexo – Cuadros 1a, 1b, 1c, 1d**), permitieron conocer la trasmisividad, la conductividad hidráulica, los radios de influencia para condiciones de regimen permanente o estable , utilizando los métodos de Jacob y Theis.

4.11. HIDROGEOQUIMICA

En la región del municipio de la Tebaida el agua que se explota principalmente es de la formación geológica denominada Glacis del Quindio.

En el mes de mayo de 1994 la C.R.Q., hizo un muestreo en 63 captaciones de agua subterránea, correspondientes a pozos, aljibes, manantiales y aguas superficiales; la profundidad de los primeros varía entre 56 y 176 metros, y la de los segundos entre 7.8 y 28 metros, donde el 45% de los puntos de muestreo

tienen profundidad menor de 40 metros. Las muestra se analizaron en el laboratorio de química ambiental de INGEOMINAS.

En el mes de febrero de 1999 (IDEAM) nuevamente se realizaron muestreos en 8 captaciones de agua subterráneas, de las cuales 5 correspondían al área de estudio de la cuenca de la quebrada Cristales. Estas captaciones corresponden a cuatro pozos del campo de explotación para el acueducto del municipio de la Tebaida.

Las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea almacenada en los pozos y las fracturas de las rocas por donde circula, están controladas principalmente por los siguientes factores: composición mineralógica de la roca, del suelo y de la zona no saturada; tipo de material geológico; procesos físicos; tamizado, sedimentación y absorción, procesos bioquímicos: acción de los microorganismos sobre la materia orgánica y los solutos a un determinado potencial de óxido - reducción; régimen hidrológico: precipitación, temperatura y modelo del flujo del agua subterránea.

En (**Tabla 11**), se presentan los puntos de agua que fueron muestreados en 1994; de ese análisis sólo se tomaron los datos de conductividad eléctrica, los cuales eran muy importantes más adelante para determinar líneas de flujo.

Igualmente en la (**Tabla 12**), se relacionan los resultados del análisis de la muestras tomadas en los pozos de Cicolsa, El Edén, La marina y Anapoima en febrero de 1999, después del terremoto ocurrido en esta zona.

Tabla 11

Resultados del análisis de conductividad Marzo de 1994

No identificación	Tipo	Nombre	Conductividad (moho/cm)
243ID-28	P	Anapoima	259
243ID-30	P	La Marina	181
243ID-102	P	El Arco	150
243ID-103	P	El Horizonte	199
243IIC-007	P	Parque Recreacional	129
243ID-005	A	El Cinco	175
243ID-040	A	La Argentina	138
243ID-042	A	Andalucia	82.7
243ID-051	A	San Jorge	112
243ID-055	A	Bonanza	75.9
243ID-060	A	Q. de San Sabastian	72.3

Tabla 12

Resultados de los análisis de la calidad del agua. Febrero de 1999

PARÁMETRO	Pozo Anapoima	Pozo Cicolsa	Pozo El Edén	Pozo La Marina
pH (Unidades)	8.02	6.11	6.93	6.82
Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	145.75	99.33	103.92	149.48
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	86	92	96	94
Calcio (mg/l Ca)	13.63	16.83	12.83	16.03
Dureza calcio (mg/l CaCO ₃)	34	42	32	40
D. Q. O . (mg/l O ₂)	4.3	4	5.2	4.3
Turbiedad (NTU)	<1	<1	1	1
Sólidos totales (mg/l)	228.3	149	196.8	187.9
Sólidos disueltos (mg/l)	200.9	191.8	170.4	158.1
Sólidos suspendidos (mg/l)	27.4	181.5	26.4	29.8
Fósforo (mg/l N- NO ₂)	0.34	<0.005	<0.005	<0.005
Nitritos (mg/l N-NO ₂)	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Nitratos (mg/l N- NO ₃)	0.11	1.1	1.05	0.81
Nitrógeno Amonia (mg/l N-NH ₃)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Hierro Total (mg/l Fe)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Coliformes Total (NMP/100 ml)	9	<3	<3	4
Coliformes Fecal (NMP/100ml)	9	<3	<3	4
Temperatura (C°)	23.8	22.2	22.4	22
Color (Und Pt-Co)	10	5	5	10
Conductividad (moho/cm)	256	149	166	170

4.11.1. Redes de Flujo subterráneo. El movimiento y otras características del agua subterránea pueden determinarse cuantitativamente por gráficos conocidos como redes de flujo. Una red de flujo está integrada por dos familias de curvas; una familia la integra las líneas de flujo que representa el camino seguido por las partículas de agua en su movimiento acuífero. Interceptando estas líneas y en ángulo recto se tiene la familia de curvas conocidas como equipotenciales (o isopiezas) que representan la superficie a los contornos de la tabla de agua. Dentro del estudio se interpolaron los datos de niveles piezométricos de los pozos tomados en febrero de 1994, para así generar la red de flujo. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en el **(Anexo – Mapa 11)**, de donde se deduce: la dirección del flujo de agua subterránea se dirige desde el sur de Armenia con dirección sur occidente hacia la desembocadura de la quebrada Cristales.

La dirección del movimiento del agua subterránea indicada por las líneas de flujo señala su procedencia u origen así como su destino final dentro del área estudiada, determinando que la zona de recarga está ubicada en la cuenca alta de la quebrada Cristales, en las partes más altas del área de estudio de la zona de la cordillera Central. Y la zona de descarga se encuentra hacia el centro de la zona de estudio, en el campo de pozos al oriente del municipio de La Tebaida en inmediaciones del aeropuerto El Edén, donde se ve claramente una zona de intenso bombeo.

A partir de los datos del análisis de calidad de agua de las **(Tablas 11 y 12)** se realizaron redes de flujo, con las isoclinas de conductividad que indican la dirección del flujo de aguas subterráneas con los datos de conductividad eléctrica de pozos y aljibes.

La conductividad eléctrica crece con el contenido de iones disueltos por eso a medida que el agua subterránea recorre más área aumenta su contenido de

iones, de ahí la posibilidad de identificar zonas de recarga y de descarga y por consiguiente direcciones de flujo. En el **(Anexo – Mapa 14)** se puede observar que la zona de recarga de acuerdo a las líneas de isoconductividad generadas por los datos de los pozos se encontraría en la parte alta de la cuenca de la quebrada Cristales, lo que validaría los resultados del mapa de isopiezas. Sin embargo en este mapa también se identifican algunos flujos locales que parten al este de la vereda La Argentina y se dirigen con dirección hacia el municipio de La Tebaida.

En los **(Anexo – Mapas 12 y 13)**, se realizaron las líneas de isoconductividad para dos períodos diferentes, uno para febrero de 1994 y el otro para febrero de 1999, en el área del campo de pozos cercana al municipio de La Tebaida. Se puede concluir que los valores de conductividad no han variado considerablemente en estos 5 años. Se observa en ambos mapas una red de flujo que se dirige hacia el nordeste de La Tebaida, en cercanías al pozo de Anapoima. El origen de este flujo si ha variado, pues en febrero de 1994 partía cerca al pozo del Arco y de ahí se dirigía al norte. En febrero de 1999 el origen de este flujo se ha desplazado hacia el nordeste en inmediaciones de la planta de Cicolsa.

Con las líneas de isoconductividad de los aljibes se pudo determinar las direcciones de flujo del acuífero libre del Glacis del Quindío. Las zonas de recarga se ubican al nordeste de La Tebaida, en el área de la pista de aterrizaje del aeropuerto El Edén y en la zona aledaña a la inspección de policía El Caimo. Las zonas de descarga se ubican hacia el área de Portugalito, vereda La Argentina y hacienda Buenavista. Las zonas de recarga, descarga y redes de flujo pueden apreciarse en el **(Anexo – Mapa 15)**.

5. MODELO CONCEPTUAL PARA DEFINIR LAS ZONAS DE PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

5.1. METODOLOGÍA

El proyecto realizado para la implementación del modelo hidrogeológico conceptual es de tipo descriptivo – evaluativo, en donde a partir del análisis cualitativo y cuantitativo de la información hidrogeológica y temática relacionada , se determina la vulnerabilidad del acuífero y posteriormente se implementa el método de delineación manual y semi – analítico, donde se incluyen las zonas de protección del acuífero.

5.1.1. Recopilación de la información. La información primaria se trabajó en campo, al interior del área en superficie de los pozos y aljibes que captan los acuíferos subsuperficiales y subterráneos , para identificar las actividades basadas en el uso del suelo y de la explotación del recurso hídrico, como posibles generadores potenciales de contaminación; Igualmente mediante información secundaria, se analiza, aplicando técnicas convencionales, los métodos geológicos, geofísicos de superficie y subsuperficie, de hidrología superficial y subterránea, hidroquímicos e hidráulicos, soportados a partir de cartografía

básica, a escalas adecuadas que incluyen mapas topográficos y temáticos georeferenciados.

5.1.2. Diseño experimental. Por corresponder a una metodología descriptiva – evaluativa, de carácter cualitativa y cuantitativa, se presenta un modelo hidrogeológico conceptual basado en el análisis, evaluación y generación de información hidrogeológica, con base en la interpretación de pruebas confiables de bombeo en pozos de mediana a gran profundidad , para el cálculo de los parámetros hidráulicos de los acuíferos, los cuales son el soporte para la definición de las zonas de protección de los mismos. Para los aljibes se consideraron los parametros hidraulicos de los acuíferos mas superficiales captados con base en el modelo hidrogeologico conceptual del Glacis del Quindío.

5.2. CONCEPTOS SOBRE LA VULNERABILIDAD DE UN ACUIFERO A LA CONTAMINACIÓN.

La vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación se establece por la facilidad con la cual ingresan las sustancias contaminantes al acuífero mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada(ZNS).

Foster (1987) sugiere que la definición más confiable de la "vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos" debe ser la medida de:

- * El grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero.
- * El grado de atenuación a la contaminación que posean los estratos de la zona no saturada (retención o reacción fisicoquímica).

Así, la susceptibilidad de los acuíferos a la contaminación, se considera como una función de las propiedades intrínsecas del suelo y del estrato litológico que comprende la zona no saturada.

5.2.1. Evaluación de la vulnerabilidad

El método utilizado para la predicción de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, está clasificado dentro del grupo de los métodos de indexación y superposición (Adams, 1994).

Este método de indexación⁷ combina un conjunto de características o atributos físicos del suelo, la zona no saturada y los acuíferos, a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad. Los métodos de indexación se basan en la combinación de varios mapas de los diferentes atributos fisiográficos, a los cuales se les ha asignado valores de peso; este método es el más utilizado para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación general.

⁷ C.V.C Definición de riesgo de vulnerabilidad Cali 1998. p 16 – 18.

5.2.2. Método de evaluación de parámetros “GODS”

El sistema de indexación de parámetros "GODS", (Foster 1987), C.V.C., e INGEOMINAS 1998, plantea escalas de valores para 4 de los principales elementos que condicionan la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, de acuerdo al papel que desempeñan en los procesos de atenuación, transformación y transporte de contaminantes en el subsuelo.

Esta valoración tiene por objeto combinar parámetros cuantificables, como la profundidad del agua, con aquellos que son simplemente cualitativos como las características litológicas de la zona no saturada.

Los cuatro parámetros considerados en este sistema de indexación son:

- * **Groundwater:** Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero, y establece las siguientes categorías: no confinado, no confinado- cubierto, semiconfinado, confinado y sin presencia de acuífero.
- * **Overall:** Este parámetro incluye una caracterización global de la zona que suprayace el acuífero, en cuanto a la naturaleza litológica, al grado de consolidación y el fracturamiento de la roca.
- * **Depth:** Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante, en acuíferos cautivos.
- * **Tipos de Suelos:** Este parámetro incluye la clasificación de los suelos de acuerdo a sus características texturales.

En el método “GODS”, se han establecido valores numéricos para cada uno de los parámetros anteriores, de acuerdo con su contribución en la defensa de los

acuíferos a la contaminación. Las escalas de valores presentan una graduación entre cero y uno, siendo menor en cuanto más contribuyan las características del parámetro en la atenuación de contaminantes.

El grado de vulnerabilidad, se determina multiplicando los valores asignados a cada parámetro, obteniéndose índices totales entre 0 y 1, donde el cero "0", representa un grado de vulnerabilidad despreciable y el "1" la máxima vulnerabilidad a la contaminación (**Anexo – Figura 7**).

Según los anteriores autores, los valores logrados en la indexación de parámetros del Método “**GODS**”, es posible definir las siguientes categorías de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación:

- * Vulnerabilidad Extrema: Con valores de indexación entre 0.7 y 1.0, se consideran acuíferos vulnerables a la mayoría de los contaminantes y con un impacto relativamente rápido.
- * Vulnerabilidad Alta: Con valores de indexación entre 0.5 y 0.7, son acuíferos vulnerables a contaminantes muy absorbibles y/o fácilmente transportables
- * Vulnerabilidad Moderada: Con valores de indexación entre 0.3 y 0.5, son acuíferos vulnerables a mediano plazo a la mayoría de contaminantes.
- * Vulnerabilidad Baja: Con valores de indexación entre 0.1 y 0.3, son acuíferos vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes.
- * Vulnerabilidad Muy Baja: Con valores de indexación menores a 0.1, en estos acuíferos, las capas confinantes no permiten un flujo significativo al acuífero.
- * Vulnerabilidad Nula: No existe peligro de contaminación.

5.2.3. Resultado de la vulnerabilidad del acuífero Glacis del Quindío

Como resultado de la aplicación del método “**GODS**” se presentan dos mapas; uno de vulnerabilidad del acuífero subsuperficial libre y el otro del acuífero multicasas confinado profundo del Glacis del Quindío para el Municipio de La Tebaida

El Mapa 16 en anexo muestra la valoración de la vulnerabilidad a partir de la indexación de los parámetros del “GODS”, que para el acuífero subsuperficial captado principalmente por los aljibes involucra el resultado de la multiplicación de los cuatro parámetros de evaluación que condicionan la vulnerabilidad; obteniéndose los siguientes valores para las siguientes categorías:

Condición del acuífero de tipo libre: 1

Sustrato litológico de arenas, arcillas y/o gravas de origen volcánico: 0.7

Profundidad de la tabla de agua entre 20 y 50 metros: 0.7

Características texturales de la zona no saturada correspondientes a suelos franco arcillosos: 0.6

Vulnerabilidad del acuífero subsuperficial: Moderada (0.3)

El Mapa 17 en anexo muestra la valoración de la vulnerabilidad a partir de la indexación de los parámetros del GODS, que para los acuíferos multicasas profundos captado principalmente por los pozos de mediana a gran profundidad involucra el resultado de la multiplicación de los cuatro parámetros de evaluación que condicionan la vulnerabilidad; obteniéndose los siguientes valores para las siguientes categorías:

Condición del acuífero de tipo confinado: 0.3

Sustrato litológico de arenas, arcillas y/o gravas de origen volcánico: 0.7

Profundidad de la tabla de agua entre 20 y 50 metros: 0.6

Características texturales de la zona no saturada correspondientes a suelos franco arcillosos: 0.6

Vulnerabilidad del acuífero multicapas profundo: Muy baja a baja (0.07)

Así mismo presentamos en el **(Cuadro 2)**, una matriz, para un grado de variable de control de la carga contaminante del subsuelo, según la vulnerabilidad del acuífero y que nos serviría para el análisis final de resultados.

5.3. CONCEPTO SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS DEL AGUA

El movimiento relativamente lento del agua subterránea a través del subsuelo, le permite mantenerse en contacto prolongado y estrecho con los minerales que constituyen la corteza terrestre. Estos minerales son solubles en mayor o menor grado, aumentando el contenido mineral del agua conforme se desplaza, hasta que se alcanza un balanceo o equilibrio de las sustancias en solución.

Las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua subterránea almacenada en los pozos y las fracturas de las rocas por donde circula, están controladas principalmente por los siguientes factores: composición mineralógica (de la roca, del suelo y de la zona no saturada); tipo de material geológico (procesos físicos, tamizado, sedimentación y absorción); procesos bioquímicos (acción de los microorganismos sobre la materia orgánica y los solutos a un

determinado potencial de óxido reducción); régimen hidrológico (precipitación, temperatura y modelo del flujo del agua subterránea.

5.3.1. Evaluación general

Se llevo a cabo el análisis de los resultados obtenidos en el muestreo realizado por la C.R.Q., en el año 1999, para los parámetros más sobresalientes, en los pozos profundos de La Marina, Anapoima, Cicolsa y Parque recreacional; de los aljibes no se encontró reporte alguno de muestreo.

El acuífero de los depósitos Glacis del Quindío se explota mediante aljibes y pozos con caudales de hasta 45 lps; utilizándose el agua principalmente para consumo humano e irrigaciones. El espesor conocido es de 200 metros y la calidad fisicoquímica de las aguas indica que es apta para el consumo humano y para riego se clasifica como C1S1 o sea que se puede utilizar en la mayoría de los suelos y cultivos con poca probabilidad de salinización e intercambio de niveles nocivos de sodio. El agua del acuífero es de tipo carbonatado cálcica-magnésica.

El 82% del agua subterránea aprovechada en el municipio, es utilizada para el consumo humano y en labores domésticas; sin embargo también tienen algunos usos de tipo agrícola y pecuario.

Es importante anotar que los pozos que surten de agua al acueducto de la Tebaida, son sometidas únicamente al tratamiento de desinfección con cloro. En los aljibes, el agua es conducida después de su extracción, a tanques de almacenamiento y luego distribuida para su consumo; en algunos casos se surten

más de cuatro o cinco fincas o casas de campo, a través de mangueras o redes improvisadas, tanto para consumo humano, doméstico y diferentes usos agropecuarios.

Después de aplicar el Decreto 475 de 1998, el cuál regula las actividades relacionadas con la calidad del agua potable, para consumo humano, y hacer el respectivo análisis de la muestra tomada para los cuatro pozos, podemos concluir:

5. Las aguas suministradas y aprovechadas de los pozos son aptas para el consumo humano, independientemente de las características de agua cruda y de su procedencia. Podemos ver la admisibilidad según la norma **(Anexo - Cuadro 3)**.
5. La mayoría de las concentraciones de elementos se presentan con valores bajos; ciertos datos anómalos de algunos parámetros son puntuales.
6. Para los aljibes, se presentaron problemas bacteriológicos que deben corregirse a través de tratamientos convencionales en casos específicos, como en las fincas y casas de campo. También pueden ser aprovechadas tanto las aguas de pozos como de aljibes para uso agrícola sin ningún problema.
7. Por lo general las aguas subterráneas no contienen materia en suspensión, son claras, sin color y de temperatura constante, caso que se presentan en los pozos analizados.
8. Los sólidos totales analizados nos muestran un predominio de valores anómalos en algunos pozos, debido posiblemente a la turbiedad, efecto del sistema de bombeo, ya que, en el momento de la arrancada forma

turbulencia, no logrando estabilizarse, y/o a los tipos de filtros utilizados, cuando existen.

9. Los valores de conductividad eléctrica varían entre 71 m Ohm/cm hasta 231 m Ohm/cm. El agua químicamente pura ostenta una conductividad eléctrica muy baja.; sin embargo, con la adición de una pequeña cantidad de mineral disuelto la conductividad aumenta. Esto tiene lugar cuando el material disuelto se separa en iones que llevan sus cargas negativas y positivas; a mayor conductividad más grande será la oportunidad para darse en una acción electro – química. La conductividad del agua también aumenta directamente con la presencia de sólidos disueltos. En general los valores de conductividad para el área de trabajo son muy bajos lo que refleja el carácter dulce del agua.

10. El carácter cálcico - magnésico y viceversa se atribuye a la composición mineralógica de las rocas que conforman los sedimentos de la formación Glacis del Quindío, de composición muy heterogénea, ya que reciben aportes de bloques de rocas ígneas de composición dacitas y andesitas principalmente y rocas básicas que aportan calcio y magnesio en proporciones apreciables. En general las aguas subterráneas del área de estudio presentan una buena calidad química donde predominan un tipo de agua bicarbonatada con carácter calcio-magnésico. La mayoría de las concentraciones de elementos se presentan con valores bajos; ciertos datos anómalas de algunos parámetros son puntuales.

5.4. EVALUACIÓN AMBIENTAL

Con el objeto de conocer con más detalle los puntos de agua seleccionados y su entorno estudiado, se efectuó una visita de campo, donde durante el recorrido se hace una descripción detallada del entorno, su localización, uso del agua, aspectos medioambientales (protección del sitio y de la fuente) y calidad del agua (sistemas de tratamiento, fuentes de contaminación).

La disposición en el terreno de los pozos y aljibes en relación con el entorno, son factores determinantes en la calidad del agua, principalmente en el aspecto bacteriológico. Por ellos se evaluaron la protección del sitio o entorno, la protección del pozo y aljibe, el tipo de fuente contaminante y la descarga de aguas residuales aspectos que son muy cualitativos.

Fuentes y agentes contaminantes. Las aguas residuales y los desechos sólidos producto de las diversas actividades que desarrolla el hombre en esta zona, nos sirven como indicadores de posible contaminación de la fuente hídrica.

Contaminación Bacteriana. De acuerdo a los resultados anteriores, la presencia de coliformes en los aljibes estaría relacionada con la localización actual de estas fuentes y a la inadecuada protección del sitio y sus alrededores.

5. Las aguas residuales domésticas pueden ser el factor más usual de contaminación (**Anexo – Fotografía 13**), principalmente debido a que la mayoría de las fuentes de agua están muy cerca de las áreas de habitación de los moradores de la región, que carecen de instalaciones adecuadas para la evacuación y tratamiento de los desechos, los cuales están siendo eliminados principalmente mediante pozos sépticos. Tubería de descarga de aguas servidas que se encuentran cerca de los pozos, y por efectos de tuberías rotas, en mal estado o deterioradas por el tiempo, podrían también infiltrarse en el subsuelo.

6. La localización indebida de algunos aljibes en bajos topográficos, sin la protección adecuada, que en períodos de lluvias se alimentan de aguas de escorrentía que han estado en contacto con desechos orgánicos o que simplemente están contaminadas. También muchos pozos sépticos que están al lado o por encima topográficamente de los aljibes , pero en contacto hidráulico en el subsuelo por la dirección de flujo de las aguas subsuperficiales **(Anexo – Fotografía 14)**.
7. La deficiente protección de los aljibes y pozos , la carencia de tapas y estructuras elevadas del suelo, permitirán el ingreso de diferentes animales y hojas y de residuos sólidos y metálicos, que se descomponen y oxidan en el interior de éstos.
8. La falta de aseo en los alrededores y la construcción de hoyos de desperdicios o basureros enterrados (fosas), podría influir en algún tipo de contaminación por infiltración a través de los suelos o por flujo a través de las zonas de recarga.
9. El cementerio de la Tebaida que se encuentra muy cerca de la zona de captura de las aguas subsuperficiales de aljibes y pozos **(Anexo – Fotografía 15)**.
10. En cuanto a la actividad pecuaria, el criadero de animales domésticos, la instalación de ordeños, marraneras, gallineros entre otros, que están muy cerca de los aljibes, podrían dar como resultado contaminación bacteriana.
11. Los aljibes situados en medio de potreros donde pastorea el ganado, estarían influenciados por la infiltración de contaminantes provenientes de los excrementos.

12. Las aguas de la Quebrada Cristales, sufren de contaminación bacteriana debido a que recibe aguas servidas de poblaciones como la Tebaida y de las fincas por donde atraviesa la cuenca; es importante destacar el contacto hidráulico reconocido en los hidrogramas entre la Quebrada Cristales y capas acuíferas subsuperficiales del Glacis del Quindío.

13. El beneficio del café, es otra fuente de carga contaminante para las aguas superficiales. Las tecnologías actuales de beneficio tienen un alto consumo de agua, tanto para el despulpado del café, como para la fermentación y lavado, lo que aportan grandes cantidades de sólidos disueltos, materia orgánica en suspensión, azúcares, taninos, etc, haciendo que el DQO se incremente.

Otros contaminantes especiales. - Tanques y depósitos de almacenamiento de combustibles y agroquímicos: El derramamiento de aceite, gasolina, ACPM o algún producto agroquímico podría infiltrarse y alcanzar la tabla de aguas.

- Lixiviación de suelos cultivados: El mayor uso actual del suelo es el cultivo del café, lo que hace que las fumigaciones y aplicación de abonos produzcan.

- Las aguas lluvias que por escorrentía son arrastradas hacia la subsuperficie en caminos y carreteras con contaminantes peligrosos (grasas y aceites).

- Residuos contaminantes, además de la pérdida o migración de nutrientes y elementos del suelo. La utilización de insecticidas, herbicidas y fungicidas cada vez más poderosos para contrarrestar ciertas plagas (como la broca) hace que la potencialidad de contaminación se incrementen mucho más.

- El botadero de basura a cielo abierto, situado hacia la parte suroccidental puede ser un causante en potencia de lixiviados que pueden con la infiltración alcanzar la tabla de agua en algunos pozos y aljibes.
- La estaciones de servicio de la Tebaida, donde se almacenan combustibles en tanques subterráneos, podrían causar contaminación química por migración.
- Es importante anotar que la migración de los contaminantes desde la superficie hasta los pozos tienden a ser un proceso lento en muchos acuíferos, restringidos localmente a sus zonas de recarga, y pueden demorar muchos años o décadas, antes de que el impacto total de un contaminante persistente se haga notorio en las captaciones de aguas subterráneas.

De acuerdo al esquema conceptual para la evaluación preliminar del riesgo de contaminación, las aguas subterráneas de la formación GLACIS DEL QUINDÍO, por sus características geohidrológicas presentan un bajo o muy bajo grado de vulnerabilidad de contaminación por estar protegido por una espesa capa de ceniza volcánica alterada a arcilla, que atenúa la contaminación.

En el área de estudio, esta capa de ceniza, que es la zona no saturada se reviste de gran importancia, ya que es la primera línea de defensa natural contra la contaminación del acuífero superior y allí presenta además un ambiente favorable para atenuar o eliminar dichos contaminantes por medio de la intercepción, sorción y eliminación de microorganismos patógenos; la atenuación de metales pesados y otras sustancias químicas inorgánicas, mediante precipitación, sorción o intercambio de cationes; la sorción y biodegradación de muchos hidrocarburos y compuestos orgánicos naturales y sintéticos.

Sin embargo, desde el punto de vista de la perforación de los aljibes se vulnera esta protección natural, exponiendo el acuífero más superficial, de tal

manera que cualquier tipo de contaminación puede entrar directamente a éste. Dicho riesgo se incrementa al no sellarse apropiadamente los aljibes, y pozos que han sido abandonados, los cuales en algunos casos se emplean como pozos sépticos o como fosas para basuras. El porcentaje de aljibes abandonados para zona son elevados, incrementándose el riesgo de contaminación.

El río cristales, por tener un control estructural sobre el área de estudio, posiblemente infiltra parte de sus aguas en el subsuelo, lo que provocaría una contaminación directa de los acuíferos.

5.5. DEFINICION DE LAS ZONAS DE PROTECCIÓN DEL ACUIFERO GLACIS DEL QUINDIO.

La definición de las zonas de protección de las fuentes para aljibes como para los pozos de mediana a gran profundidad se basa en el riesgo que una actividad representa para la calidad de las aguas subsuperficiales y subterráneas. Adaptamos el enfoque basado en tres zonas adoptado por la Agencia Ambiental del Reino Unido, para la protección de las fuentes de agua subterránea. Anteponemos que existen otros criterios para definir las zonas de protección, con algunas variaciones. En nuestro caso se dividió en tres zonas: una interior, una exterior, y la zona de captura del pozo como de los aljibes analizados. **(Anexo – Figura 8).**

5.5.1 Zona de protección interior. El propósito de la zona de protección interior es impedir la contaminación biológica por agentes patógenos (virus y bacterias). Dada las circunstancias ecológicas naturales, topográfica y de explotación de los suelos del área, ésta zona la definimos por la distancia equivalente a un tiempo de flujo horizontal de 50 y 400 días. Este se basa en la investigación según el criterio de degradación biológica (Adams y Foster, 1992).

Como elemento adicional de la protección, definimos un radio de 50 m para la zona interior.

5.5.2. Zona de protección exterior. Las zonas de protección exterior está definida por el tiempo de recorrido de 400 días o por el área requerida para proporcionar el 25% de la extracción de los pozos o aljibes.

La zona exterior se describe como la distancia mínima requerida para permitir el retardo, dilución y atenuación de los contaminantes que se degradarán lentamente. Usualmente no se define para los acuíferos confinados, dado que el estrato confinante brinda protección.

5.5.3. Zona de captura de las fuentes. La zona de captura de las fuentes se define como la superficie necesaria para soportar en el largo plazo el caudal de extracción autorizado. Si el acuífero es confinado, la zona de captura de las fuentes puede estar ubicada a alguna distancia del pozo fuente.

La definición precisa de las zonas de protección son muy complejas por la gran cantidad de información que se requiere, para nuestro trabajo de investigación se contó con información primaria y secundaria de tipo hidrogeológico que incluye los siguientes aspectos:

- * tipo de acuífero
- * geología y ambiente:
- * meteorológica
- * hidrogeológica
- * otros factores

5.5.4. Métodos utilizados. La definición de las zonas de protección de las fuentes se basa en el riesgo que una actividad representa para la calidad del agua con relación con su proximidad a pozos y aljibes.

Las zonas a proteger, sirven igualmente para determinar la vulnerabilidad y riesgo de las fuentes para desarrollo futuro y posterior uso de la tierra en las zonas donde se encuentran dicho acuífero.

Para escoger el método de delineación correcto, se tuvo en cuenta:

- 1) La información geológica e hidrogeológica disponible.
- 2) Los recursos humanos y financieros disponibles.
- 3) La necesidad prioritaria de definición de las zonas de protección debido a sus beneficios para la salud y usos del agua para otras actividades.

Así mismo se estableció que con éste método de definición, el acuífero debe estar en estado de equilibrio, esto supone que la extracción y la recarga como se pudo a analizar, no cambian en función del tiempo; lo anterior lo confirma la estabilidad en la precipitación en el acuífero trabajado. Es importante tener en cuenta igualmente que dicho acuífero no está sobre - explotado.

Después de recopilada, y analizada la información existente sobre las características del Glacis del Quindío, determinamos que los métodos a utilizar de acuerdo a las condiciones de los pozos y aljibes, **son los métodos simples de cálculos manuales y los semianalíticos**, ya que no requieren la aplicación de técnicas especiales y complejas de modelación de las aguas subterráneas.

El modelo conceptual es el diseño básico del modelo; esto nos garantiza que la interpretación hidrogeológica y la modelación de las aguas subterráneas deben combinarse en estos procesos de definición de las zonas de protección. Debemos aclarar que existen otras formas simples de definición de las zonas de protección.

5.5.4.1. Método manual. En los enfoque más simples con respecto a la delineación de las zonas de protección se utiliza un método de flujo volumétrico. Se asume además que el flujo del pozo y o aljibe es radial.

Así mismo manifestamos que estas ecuaciones requieren muchos supuestos simplificadores concernientes a la naturaleza del acuífero y el caudal del agua subterránea. Sin embargo, este método proporciona un conocimiento rápido y poco costoso con respecto al probable tamaño de la zonas de protección, aun cuando la forma circular de las zonas sea muy simplista.

5.5.4.2. **Ecuaciones básicas:** para un enfoque simple, con respecto a la delineación de las zonas de protección utilizamos el método de flujo volumétrico. Se asume que el flujo al pozo es radial.

La zona de captura de la fuente del área A es entregada por una relación de equilibrio de flujo.

$$A = Q/R$$

Donde Q es la extracción autorizada diaria y R es la recarga diaria efectiva, el caudal de recarga distribuido que llega al acuífero.

El radio, r, de esta zona circular se calcula a partir de:

$$r = (Q/R)$$

Las áreas de la zona de tiempo de recorrido (zonas de 50 y 400 días) pueden calcularse utilizando una simple relación que no considera la recarga al acuífero.

$$A = Qt/bn$$

A es el área para t días. El espesor del acuífero esta representado por b y n es la porosidad efectiva. Nuevamente, esta relación puede ser utilizada para calcular el radio para ciertos tiempos de recorrido:

$$R = (Qt/bn)$$

5.5.4.3. Soluciones analíticas: Como pertenece a un acuífero confinado por lo tanto posee un gradiente hidráulico uniforme, y se aplica una solución analítica para especificar la zona de captura (Fetter YEAR, P501):

$$Y/x + \tan(2(Kbiy/Q)) = 0$$

Donde:

X e y = las coordenadas cartesianas donde el pozo y o aljibe es 0,0

Q = caudal de bombeo del pozo.

K = la conductividad hidráulica del acuífero.

B = el espesor del acuífero

I = el gradiente hidráulico en la dirección x.

Esta ecuación describe la línea del límite de la zona de captura (**Anexo – Figura 9**). El ancho máximo de la zona de captura aguas arriba, Y1, es dado por:

$$Y1 = Q/2Kbi$$

La distancia al punto de estancamiento X1 es dada por:

$$X1 = Q/2(Kbi)$$

Para cada uno de los pozos y aljibes trabajados los resultados matemáticos fueron (**Anexo – Cuadros 4,5,6 y 7**), (**Anexo – Cálculos matemáticos**).

5.5.4.4. **Método semi – analítico:** Programa WHPA (Wellhead Protection Area).

Este es un programa de aguas subterráneas desarrollado por la agencia de protección Ambiental Norteamericana para ayudar a la definición de las zonas de protección (WHPA, 1993).

La principal ventaja que observamos al trabajar con este programa fue: la facilidad de usar con un interfaz de usuario simple; la desventaja, es que sólo permite analizar sistemas hidrogeológicos simplificados y que el programa fue desarrollado para el sistema operativo DOS, los resultados en cuanto los

impresos y gráficos no es excepcional. El programa WHPA se puede ejecutar prácticamente en cualquier PC.

El WHPA consiste en una serie de módulos individuales que realizan los siguientes procesos:

- * cálculo de los patrones de flujo regionales
- * cálculo del descenso dinámico de un pozo bombeado
- * suposición de la influencia del bombeo sobre el patrón de flujo regional
- * cálculo de las velocidades a partir de la conductividad hidráulica y los gradientes de las aguas subterráneas
- * rastreo del movimiento de partículas a través del campo de velocidad para determinar las rutas que toma el agua hacia el pozo y aljibe.

Los supuesto básicos establecidos, después de haber analizado la información existente sobre el Glacis del Quindío, para el modelo WHPA son las siguientes:

- * el acuífero del Glacis del Quindío es regional y uniforme

- * el flujo de aguas subterráneas es bidimensional
- * los pozos profundos penetran completamente el acuífero
- * los límites impermeables o de recarga, penetran completamente el flujo de agua subterránea se presenta en un dimensión con un gradiente uniforme.

Módulo RESSQC

Este módulo define las zonas de tiempo de recorrido para múltiple pozos en el acuífero uniforme con un gradiente hidráulico uniforme, caso del Glacis del Quindío. La información utilizada fue:

- * unidades para cálculo, metros
- * dimensiones del área de estudio, coordenadas x e y mínimas y máximas
- * número de pozos y aljibes bombeados
- * número de pozos o aljibes de recarga
- * transmisividad del acuífero
- * porosidad
- * gradiente hidráulico y dirección
- * para cada pozo bombeado o de recarga:
 - ubicación
 - caudal de bombeo (o de recarga)
 - radio del pozo y /o aljibe.
 - número de trayectoria a trazar
 - intervalo de tiempo en el cual calcular las posiciones de las partícula.
- * Tiempo para el cálculo de los resultados

Se tuvo en cuenta, que además de las propiedades de los pozos y los acuíferos, existían una serie de parámetros relacionados con la precisión con la cual se realiza el cálculo. El modelo WHPA es limitado en cuanto al número de puntos discretos del área de estudio para la cual se pueden calcular soluciones.

El módulo RESSQC, constituye un método rápido de definición de las zonas de tiempo de recorrido. Dado que la recarga distribuida no se incluye en la solución, la fuente final del pozo para los pozos de bombeo es el flujo regional de agua subterránea. Este módulo es ideal para las zonas de tiempo de recorrido, pero las zonas de captura siempre se extenderán hasta el límite. Una posible técnica para permitir la definición de las zonas de captura de las fuentes consiste en limitar las rutas una vez que cubren un área igual a aquella requerida para proporcionar recarga al pozo.

Procedimiento:

Definimos las zonas de tiempo de recorrido de 50 y 400 días, y estimamos la zona de captura, como la zona de tiempo recorrido, desde el momento en que comenzó a operar el pozo y/o aljibe para efecto de la modelación; después ingresamos la información en el programa WHPA (**Anexo – Esquemas Modelación pozos y aljibes**).

5.6. EVALUACION DE LAS ZONAS DE CAPTURA DE POZOS Y ALJIBES QUE CAPTAN LAS CAPAS ACUIFERAS SUBSUPERFICIALES Y SUBTERRANEAS DEL GLACIS DEL QUINDIO EN EL SUBSUELO DEL MUNICIPIO DE LA TEBAIDA.

La aplicación de los métodos manuales, analíticos y semianalíticos para definir las zonas de protección de los pozos y aljibes que abastecen actualmente el municipio de la Tebaida en su zona urbana y los aljibes representativos en su zona rural que captan las aguas subsuperficiales y/o tabla de agua o nivel freático permiten deducir que su tamaño, y la forma dependen de una diversidad de factores hidráulicos e hidrogeológicos y del tipo de zona a definir.

Es así como la geometría de las zonas de captura para los pozos Anapoima, La Marina, el Arco, El Horizonte y el Parque Recreacional dependen de su caudal de bombeo, la recarga directa a través de los suelos y proveniente de la precipitación, la conductividad hidráulica, la porosidad efectiva y/o el coeficiente de almacenamiento para los acuíferos libres, el espesor de filtro captado, el gradiente hidráulico, su magnitud y dirección.

En el (**Anexo – Cuadro 4,5,6 y 7**), se presentan los resultados de los métodos manual y soluciones analíticas obtenidos para la zona de protección de los pozos y aljibes en los que se pueden destacar los siguientes aspectos:

* Si tomamos como referencia el pozo de Anapoima observamos que la forma y el tamaño de sus zonas de captura y protección para tiempos de recorrido de 50 y 400 días de recorrido son mucho mayores que para los otros pozos debido a muchos factores tales como su espesor captado (63 metros), el cual es duplicado hasta dos veces y medio el espesor captado por los pozos el Arco, el Parque Recreacional y EL Horizonte.

* La influencia de la porosidad efectiva utilizada en los métodos de delineación de las zonas de captura para los pozos a pesar de que teóricamente esta relacionado con la velocidad utilizada para calcular los tiempos de recorrido, no refleja cambios significativos para el tamaño y la forma de las zonas de protección de las zonas de recorrido para los pozos de Anapoima, y La Marina debido a que

es el mismo valor asumido, excepto el Pozo del Arco donde se obtuvieron velocidades anómalas del orden de 11 mt/día, y por ende sus zonas de recorrido para 50 y 400 días. Es importante destacar que la porosidad asumida para todos los pozos es del orden de 0.03 según Custodio y Llamas (1983), por lo que se pueden estar subestimando valores regionales, aún subregionales a locales por porosidad secundaria, induciendo o no a la definición de zonas más grandes o más pequeñas de protección de lo necesario.

* La Conducta Hidráulica de los pozos que abastecen el municipio de la Tebaida influyen en la forma, el ancho y la extensión gradiente abajo de las zonas de protección; tal como se observa en el **(Anexo – Cuadro 5)**, donde observamos que el Pozo de Anapoima presenta un ancho y una distancia al punto de stagnación de su zona de captura mucho mayor que los otros pozos.

* El gradiente hidráulico utilizado para todos los pozos es del mismo orden de magnitud por lo que no reflejan cambios apreciables en la delimitación de las zonas de protección por este factor hidráulico. Es importante destacar que la isopiezas utilizadas corresponden al año 1998, asumiéndose un estado de equilibrio para la delineación de las zonas de protección, situación que no es del todo cierta por la influencia de unos pozos con otros por interferencia hidráulica.

* La magnitud del caudal del bombeo de los pozos influye directamente en la forma de las zonas de protección, siendo mayor en los pozos que se explotan con los mayores caudales, tal es el caso de los pozos Anapoima y La Marina.

* La recarga por infiltración estimada a través de los suelos y utilizada para definir el área de la zona de captura es del mismo orden de magnitud para todos los pozos por lo que este parámetro aparentemente no refleja o aparentemente tiene relativamente poca influencia en las áreas de zonas de protección relacionada

con el tiempo. Es importante recordar que las zonas de tiempo de recorrido son menos sensibles a los errores de la recarga.

* La zona de recarga utilizada para delimitar las zonas de captura para diferentes tiempos de viaje es el área de drenaje de la Quebrada Cristales la cual influye en la forma de las zonas de protección y reducen su área, particularmente en las zonas de captura. Es importante destacar que su verificación en el modelo no puede verificarse mediante la comparación con los datos de terreno.

La evaluación de los aljibes que captan la tabla de agua o nivel freático en el Municipio de La Tebaida se realizó a partir de la disponibilidad de información del subsuelo y del modelo geoeléctrico de la zona no saturada hasta la tabla de agua, el espesor y resistividad de las dos primeras capa geoeléctricas. Para tal fin se seleccionaron aljibes representativos de las secciones geoeléctricas disponibles para las capas mas subsuperficiales del Glacis del Quindío. Los aljibes seleccionados corresponden a EL Cinco, EL Salto, La Irlanda, La Argentina, Andalucía , Villa Cristina, EL Sinai, Bonanaza, Quintas de San Sebastián, San Sebastian.

Los parámetros hidráulicos de las capas subsuperficiales se asumieron con base al modelo hidrogeológico del subsuelo , es así como la porosidad efectiva de la primera capa acuífera que es captada por los aljibes se asumió similar al de un acuífero de tipo libre, y el gradiente hidráulico del orden de 0.01, tratando de esta manera de simular condiciones de flujo subsuperficiales creadas por el bombeo de los pozos de mediana a gran profundidad. Es importante destacar que los aljibes se simulaban con un régimen de bombeo permanente para generar un escenario crítico para la definición de sus zonas de captura.

En el **(Anexo – Cuadro 6 y 7)**, se presentan los resultados obtenidos para la definición de la zona de protección de los aljibes por medio del método manual, y

las soluciones analíticas y semianalíticas, en la que se pueden destacar los siguientes aspectos:

* Los aljibes que se bombean con los mayores caudales tales como los el de Andalucía, El Salto y El Cinco (corte geoelectrico AA') presentan las mayores zonas de captura dentro de sus rangos de los parámetros hidráulicos. El aljibe Andalucía presenta de acuerdo al método manual el mayor tamaño y forma de su zona de protección para tiempo de recorrido de 50 y 400 días, equivalentes a 178 y 500 m respectivamente, y menor a estos valores para los aljibes restantes seleccionados

* La influencia de la porosidad efectiva utilizada en los métodos de delineación de las zonas de captura de los aljibes a pesar de que teóricamente esta relacionado con la velocidad utilizada para calcular los tiempos de recorrido, no refleja cambios significativos para el tamaño y la forma de las zonas de protección tal como sucede con los pozos de mediana a gran profundidad descritos anteriormente. Es importante destacar que la porosidad asumida para todos los aljibes es del orden de 0.03 según Custodio y Llamas (1983), para depósitos volcánico - sedimentarios poco consolidados.

* La Conducta Hidráulica de los aljibes que abastecen el municipio de la Tebaida influyen en la forma, el ancho y la extensión gradiente abajo de las zonas de protección; tal como se observa en el **(Anexo – Cuadro 7)**, en la que la solución analítica de los aljibes que se bombean con los mayores caudales como la Andalucía, El Cinco y EL Salto presentan un ancho y una distancia al punto de estancamiento de su zona de captura mucho mayor que los otros aljibes seleccionados.

* El gradiente hidráulico utilizado para todos los aljibes es del mismo orden de magnitud por lo que no reflejan cambios apreciables en la delimitación de sus zonas de protección.

* La recarga por infiltración estimada a través de los suelos y utilizada para definir el área de la zona de captura es del mismo orden de magnitud para todos los aljibes por lo que este parámetro aparentemente tampoco refleja o tiene relativamente poca influencia en las áreas de zonas de protección relacionada con el tiempo. Es importante recordar que las zonas de tiempo de recorrido son menos sensibles a los errores de la recarga.

5.7. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE.

El análisis de incertidumbre es una técnica para medir los probables errores presentes en la definición de las zonas de protección. Es probable que se haya estimado uno o más de los parámetros usados para definir la zona de protección. Otros parámetros pueden corresponder a valores medidos, pero estos también están asociados a errores.

El análisis de incertidumbre muestra la manera en que difieren las zonas de protección; difieren si los parámetros serían en cantidades establecidas. Por ejemplo la recarga del acuífero es un parámetro difícil de estimar incluso con información meteorológica detallada. El posible error en las estimaciones de la recarga pueden ser entre 20 y 50%.

En el caso de los métodos de delineación simples descritos anteriormente, los cálculos pueden repetirse con valores de recarga (por ejemplo) 30% más altos y 30% más bajos.

De esta manera puede establecerse la confianza de ciertas áreas de la superficie del suelo dentro de la zona de protección interior o exterior.

Entre los posible parámetros a variar durante los análisis de sensibilidad, incluimos:

- * Porosidad
- * Conductividad hidráulica
- * Espesor del acuífero
- * Caudal de bombeo
- * Gradiente hidráulico
- * Caudal de recarga

El error asociado a cada parámetro existe, por lo tanto no hay que desecharlo; para nuestro caso como fue calculado, entonces el error es mínimo. El caudal de bombeo y el gradiente hidráulico tienen una mayor precisión que la porosidad o la recarga. El juicio realizado por nosotros en el análisis hidrogeológico, nos permite estimar un error mínimo por el conocimiento local que se tenía.

Variando los parámetros cuando la incertidumbre es probable y superponiendo el resultado, puede definirse las zonas de confianza. Si una determinada parte del acuífero siempre se encuentra dentro de la zona de tiempo de recorrido exterior durante el análisis de sensibilidad, es alta la probabilidad y la confianza de que el área se encuentre dentro de la zona exterior. Sin embargo, si el área sólo se

encuentra en la zona cuando se reduce la recarga en un 30%, la confianza es baja.

La determinación de la manera en que las áreas con diferentes grados de confianza se convierten en zonas de protección en el suelo es un aspecto difícil que requiere la habilidad y el juicio del hidrogeólogo o ingeniero expertos.

5.7.1. Factores que controlan la forma de las zonas de protección: el tamaño y la forma de una zona de protección dependieron de diversidad de factores hidráulicos e hidrogeológicos y del tipo de la zona a definir (**Anexo – Figura 10**).

5.7.2. Factores hidrogeológicos que influyen en la zona de protección: la geometría de las zonas de captura dependen de los siguientes factores:

- * caudal de bombeo
- * recarga, directa o inducida
- * conductividad hidráulica
- * porosidad efectiva/almacenamiento no confinado
- * espesor del acuífero
- * gradiente hidráulico, magnitud y dirección

El análisis que se pudo hacer, acerca de la manera en que los diversos parámetros influyen en la forma y el tamaño de las zonas de protección, lo

encontramos en la (**Tabla 15**). En la (**Tabla 16**), se presentan ejemplos de los problemas relacionados con los datos de terreno.

Tabla 15

Manera en que diversos parámetros influyen en la forma y el tamaño de las zonas de protección, según EA 1996.

Parámetro	Influencia
Espesor del acuífero	El volumen del agua en el acuífero y la transmisividad están directamente relacionados con el espesor del acuífero. Por lo tanto, el espesor del acuífero afectará directamente el tamaño y la forma de las zonas de protección de tiempo de recorrido. Una disminución del 50% del espesor del acuífero duplicará aproximadamente el área de una zona de protección de tiempo recorrido.
Porosidad efectiva/almacenamiento no confinado.	El almacenamiento no confinado está directamente relacionado con la velocidad usada para calcular los tiempos de recorrido; por lo tanto, tiene una influencia directa en el tamaño y la forma de las zonas de protección del tiempo recorrido. Una disminución del 50% del almacenamiento no confinado duplicará el tamaño de una zona de protección del tiempo recorrido.
Conductividad hidráulica	La conductividad hidráulica influye en la forma, el ancho y la extensión gradiente debajo de las zonas de protección. Un aumento de la conductividad hidráulica disminuye el ancho de la zona de captura de un pozo.
Gradiente hidráulico	El gradiente hidráulico influye en el ancho y la extensión gradiente debajo de la zona de protección. Cuanto mayor es el gradiente hidráulico, más reducida es la zona de protección.
Caudal de extracción	El caudal de extracción influye directamente en el área de las zonas de protección. La interferencia entre los pozos bombeados puede influir marcadamente en la forma de las zonas de protección.
Recarga anual	El caudal de recarga influye directamente en el área en la zona de captura, pero en general tiene relativamente poca influencia en el área de las zonas relacionadas con el tiempo.

Parámetro	Influencia
Limite – sin flujo Limites – recarga	Los límites sin flujo, las fallas y las divisorias de aguas subterráneas restringen la forma de las zonas de protección. Los límites de recarga influyen en la forma de las zonas de protección y reducen su área, particularmente en las zonas de captura.

Tabla 16

Los posibles problemas relativos a los datos de terreno y su influencia en los modelos y la delineación de las zonas de protección son:

Parámetro	Terreno	Implicación para la delineación de las zonas de protección
Permeabilidad/ Conductividad hidráulica	Puede que solo se disponga de pruebas de bombeo, para las extracciones de agua subterránea de mayor magnitud, que muy probablemente habrán sido ubicadas en las áreas de mayor permeabilidad. Las pruebas de bombeo pueden haberse realizado en diferentes caudales o duración y los valores derivados pueden ser representativos de diferentes volúmenes del acuífero. Se puede calcular una gama de valores de permeabilidad en base a diferentes métodos de análisis de pruebas de bombeo. Los valores de transmisividad sólo pueden haber sido calculados sin referencia al espesor del acuífero.	Los valores del modelo pueden estar sobreestimados o ser inciertos, lo que conduciría a errores en la delineación.
Porosidad efectiva/ almacenamiento no confinado	Puede que se disponga de datos limitados. La prueba de bombeo puede haber sido demasiado breve como para permitir determinar con precisión el almacenamiento no confinado y normalmente el almacenamiento determinado a partir del análisis de las pruebas de bombeo subestiman los valores regionales.	Los valores de las pruebas de bombeo puede subestimar las condiciones de terreno, lo que conduciría a la definición de zonas más grandes de lo necesario.

Parámetro	Terreno	Implicación para la delineación de las zonas de protección
Niveles de las aguas subterráneas	Las curvas de nivel de las aguas subterráneas se trazan frecuentemente a partir de datos limitados de los niveles hídricos y puede que no representen cabalmente las variaciones en las propiedades del acuífero. Los niveles de agua medidos en un pozo pueden ser más representativos de las condiciones locales, como por ejemplo cuando el piezómetro penetra sólo parcialmente. Los niveles de las aguas subterráneas varían en función del tiempo, en tanto que se asume un estado de equilibrio para la delineación de las zonas de protección.	Un modelo en estado de equilibrio no toma en cuenta las variaciones estacionales. La calibración de un modelo depende de los niveles de las aguas subterráneas interpolados.
Espesor del acuífero.	Puede que se disponga de datos limitados de la base de la unidad acuífera o el espesor efectivo de la unidad acuífera.	Una estimación incorrecta del espesor del acuífero conduce a errores en el tamaño de las zonas de protección.
Recarga	La recarga es siempre estimada; cuando el acuífero esta cubierto por otros estratos, se hace más difícil estimar el caudal de recarga. Puede que no se haya considerado la variación de la recarga a través del área del modelo.	Las zonas de captura están directamente relacionadas con el caudal de recarga; los errores de la recarga se traducen en errores de las zonas de captura. La zona de tiempo de recorrido son menos sensibles a los errores de la recarga.
Interacción aguas subterráneas/ Aguas superficiales	Usualmente, la medición en el arroyo/río es limitada y no pueden revelar en detalle la interacción entre el acuífero y el agua superficial.	La interacción entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales en un modelo no puede verificarse mediante la comparación con los datos de terreno.

6. CONCLUSIONES

El drenaje dendrítico, denso, controlado por la litología, evidencia la impermeabilidad de la unidad más superficial, la cual le puede conferir carácter de confinado a semiconfinado a las unidades acuíferas del área.

En el área se reconoce solamente la formación Armenia, o Glacis del Quindío de edad Plioceno-Holoceno, conformada por depósitos de flujos de escombros, flujos piroclásticos, conglomerados de corrientes, arenas y limos fluviales con aportes volcánicos, tobas de caída y localmente limolitas y arcillolitas lacustres, cubiertas por cenizas volcánicas de caída.

La geoeléctrica realizada muestra un subsuelo homogéneo, donde superficialmente se encuentran una capa potente de cenizas volcánicas parcialmente alteradas, que dan un carácter confinante a los acuíferos, suprayaciendo una unidad de depósitos de diferente dinámica, moderadamente resistivo, donde se encuentran los principales acuíferos de la región.

Aunque el balance hídrico se tienen muchas limitaciones por la discontinuidad en las bases de datos climáticos y limnográficos, el orden de magnitud del agua que se puede infiltrar para recarga de acuíferos de la zona es de 336mm/año.

En general, las aguas de la región se caracterizan por ser blandas, aptas para el consumo humano previo proceso de desinfección (cloración) y en casos puntuales con el debido tratamiento y para fines agroindustriales. Se clasifican

químicamente como bicarbonatadas calcico magnésicas, posiblemente debido a las rocas volcánicas del Glacis del Quindio, que conforman los niveles acuíferos del área.

La contaminación presente en la zona es principalmente de tipo bacterial, debida a la incorrecta disposición de los desechos originados por la actividad agrícola y principalmente doméstica.

Los acuíferos subsuperficiales que son captado por los aljibes del área muestran una baja vulnerabilidad a ser contaminados, pero por su alta densidad y a la falta de diseños, en los aljibes, esta vulnerabilidad se puede ver aumentada.

Los manantiales que captan los depositos de Glacis del Quindio (TQgp) en general son de tipo filtración y de contado, de flujo perenne, utilizándose para abastecimiento doméstico, irrigación y como abrevaderos de animales.

7. RECOMENDACIONES

Los balances hídricos que se requieren para cualquier zona del Departamento, deben ser planeados para sistemas definidos por características geográficas (cuencas o subcuencas) y para sitios con bases de datos abundantes.

Realizar mediciones periódicas de los niveles piezométricos en períodos secos y húmedos, previo geoposicionamiento de cada una de las fuentes de aguas subterráneas de los puntos de la red, (pozos y aljibes) para obtener el flujo subsuperficial y subterráneas, definir unas zonas de recarga, tránsito y descarga y precisar el gradiente hidráulico bajo condiciones saturantes y de bombeo; lo que puede definir o precisar las zonas de captura o de protección de pozos y aljibes.

Desarrollar ensayos de acuíferos mediante pruebas de bombeo prolongadas, en pozos y aljibes, con pozos de observación (piezómetros), que permitan obtener parámetros hidráulicos, el comportamiento de la superficie freática y de los conos de abatimiento ante un intenso bombeo, con el fin de determinar posibles interferencias entre pozos, zonas de sobre explotación o barrera estructurales.

Hacer un monitoreo hidroquímico, por lo menos tres veces al año (EPA), en pozos y aljibes, con el fin de vigilar y diagnosticar cualquier tipo de contaminación y detectar variaciones en las concentraciones de diferentes parámetros físico-químicos y bacteriológicos. Además se deben tomar tres o más muestras por sitio e incluir parámetros que indiquen contaminación bacteriológica e industrial de acuerdo a los efluentes del sector.

Hacer un inventario de los tipos de saneamiento básico que se hacen en el sector; Igualmente determinar la localización, diseño y estado de las instalaciones sanitarias y su relación espacial con los puntos de agua de los abastecimientos subterráneos. Se deben ejecutar a la menor brevedad los correctivos necesarios en los sitios donde se carecen de sistemas saneamiento básico apropiado.

Si se tienen botadero a cielo abierto no controlado como alternativa para la disposición final de los residuos sólidos, se hace imperioso la ejecución de un estudio hidrogeológico detallado de la zona donde se planee su construcción, teniendo la certeza de que este no se convertirá en una fuente de carga contaminante a las capas subsuperficiales y profundas del Glacis del Quindío.

Es adecuado seguir implementando nuevas metodologías y técnicas en lo relacionado con el muestreo hidrogeoquímico y en los aspectos geoambientales en los futuros estudios que se desarrollen en la región que permitan detectar variaciones en el carácter químico del agua y determinación de fuentes, agentes y zonas contaminantes.

Es necesario llevar un control de las compañías perforadoras de los pozos profundos y de los constructores de aljibes, con el fin de que hagan los diseños adecuados, especialmente en lo que respecta a los sellos sanitarios. Igualmente se debe controlar la localización tanto de pozos como de aljibes, haciendo estudios hidráulicos detallados.

Se deben sellar apropiadamente los pozos y aljibes que estén abandonados, con el fin de disminuir la vulnerabilidad de los acuíferos y las zonas de protección de los pozos y aljibes, evitando que sean utilizados como sitio de disposición final de los residuos líquidos y sólidos.

Es necesario adelantar programas de protección de las zonas de recarga, para evitar la contaminación de los extensos acuíferos de la zona, por aguas superficiales, como la de la quebrada Cristales, la cual se encuentra en contacto hidráulico con el acuífero Glacis del Quindío.

Difundir y educar a los habitantes del sector sobre el adecuado manejo y las precauciones que se deben tener para evitar la contaminación del agua subterránea y dar la importancia necesaria a dichas aguas como una futura fuente de abastecimiento en la región.

Implementar la debida reglamentación con base en los resultados de los estudios adelantados por la C.R.Q.

Se requiere la construcción de dos o tres piezómetros o pozos de observación que sirvan para monitorear el comportamiento a través del tiempo de los volúmenes de agua almacenado disponible para explotar y la calidad físico química de las aguas subsuperficiales y subterráneas (contaminación) que garanticen la conservación y manejo ambiental del recurso hídrico subterráneo. Los piezómetros tendrían profundidades de 20, 50, 100, y 159 m respectivamente y captarían niveles acuíferos planteados por el modelo hidrogeológico propuesto. Su ubicación definitiva estará circunscrita al área de influencia de los pozos y aljibes de mediana a gran profundidad que son explotados actualmente (parte central del área), teniendo en cuenta la posible interconexión hidráulica que existe entre ellos y la logística del área.

BIBLIOGRAFIA

AGENCIA DE COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON (JICA). Estudio del Plan Maestro sobre el proyecto de desarrollo agrícola integrado de la cuenca del Quindio: Anexo c (geología e hidrología). JICA - C.R.Q. Armenia. 1991. 30 p.

CARDONA, F. J. y ORTIZ, L. M. Aspectos estratigráficos de las unidades del intervalo Plioceno Holoceno entre Pereira y Cartago. Propuesta de definición para la formación Pereira. Tesis (Geólogo). Universidad de Caldas. Facultad de Geología y Minas . Manizales. 1994. 147 p.

CARDONA, Sanchez, F.J. y ORTIZ, López, M. Propuesta de definición para la formación Pereira y su relación con la formación Zarzal. Congreso Colombiano de Geología. Memorias cuarto congreso, Tomo I. Medellin, 1993. 57 p.

CASTRO, M. A. Y GUZMAN, O. Estudio comparativo de fórmulas de evapotranspiración potencial en Colombia. Himat, 1985. Bogotá. 83 p.

CENICAFE. Estudio del clima en la zona cafetera del Quindio y Risaralda. 1986. 312 p.

CODIGO DE LOS RECURSOS NATURALES Y DE NORMAS DE PROTECCION AMBIENTAL. Legislación Actualizada. Notas de Jurisprudencia. Bogotá: Ecoe Ediciones, 1998. 613 p.

COMITE DE CAFETEROS DEL QUINDIO. Acueducto del Edén - La Argentina: Memorias técnicas de los pozos la Gabriela y el Horizonte. Comité de cafeteros del Quindio. Armenia, s.f. 45 p.

C.R.Q. y J.I.C.A. Evaluación de oferta y demanda hídrica para el Quindio. Informe final, Tomo I. Posgrado de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Módulo de Exploración de Aguas Subterráneas. " Cultura del Agua ". Bogotá. CAR. 2000. 40 p.

CORTES, Alberto y Asociados. Censo poblacional la Tebaida. Empresa sanitaria del Quindio. (ESAQUIN). Armenia. 1993. 38 p.

CUSTODIO, E. Gestión y protección de las aguas subterráneas, Curso de actualización profesional, II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Chile. 1995.

DRISCOLL, F.G., Groundwater and Well, 3° Ed. Jhonson Inc. Minnesota. 1988. 75 p.

DUQUE, Adriana. Exploración del recurso hídrico subterráneo en el municipio de la Tebaida (Quindio). Corporación Autónoma Regional del Quindio (C.R.Q.). Armenia, 1994. 70 p.

ENVIRONMENT AGENCY. Policy and Practice For The Protection Of Groundwater. London: The Stationery Office. Second Edition, 1998. 58 p.

ETAYO SERNA, Fernando et al. Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones especiales. INGEOMINAS, No14-I. Bogotá, 1983. 28 p.

FANDIÑO, Enrique. Geofísica adicional para el estudio del agua subterránea en el occidente del Quindío. Comité Departamental de cafeteros del Quindío. Bogotá. 1978. 72 p.

FANDIÑO, Enrique. Geofísica y posibilidades acuíferas del subsuelo en el norte del Quindío. Comité Departamental de Cafeteros del Quindío. 1981. 80 p.

FOSTER, S. C.W. Applied Hydrogeology. Columbus, Ohio: Chales E. Merrill Publishing Co. 1980. 473 p.

FOSTER, S. VENTURA, M., E. HIRATA, R. Contaminación de las aguas subterráneas: un enfoque ejecutivo de la situación de América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. OMS, OPS-HPE, CEPIS; Lima-Perú, 1987. 42 p.

FOSTER, S. E, HIRATA, R. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas; Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima-Perú. 1988. 79 p.

GOMEZ, C. Caracterización Hidrogeoquímica y Análisis Piezométrico del Acuífero de Cerritos, Departamento de Risaralda. División de Aguas. CARDER. 1993. 98 p.

GOMEZ, C. Riesgo Potencial de Contaminación del Acuífero de Cerritos, Departamento de Risaralda, Colombia. III Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, Memorias Tomo I, Armenia. 1994. 82 p.

GOMEZ; C. Diagnóstico de la Calidad y Riesgo de Contaminación del Agua aprovechada de Pozos y Aljibes en la Cuenca del Río Risaralda. PROYECTO CARDER-CANADA, PLANIFICACION TERRITORIAL DE LOS RIOS RISARLDA Y CONSOTA. 1995. 125 p.

GONZALEZ I, Humberto, y NUÑEZ T, Alberto. Mapa geológico generalizado del Departamento del Quindio, geología y recursos minerales . INGEOMINAS, memorias explicativas. Bogotá, 1991. 78p.

HERRICK, D. Quality Water: Its Chemistry and Biology. Water Well Journal (june, 1995) OH, USA. 1988. 44 p.

IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estudio semidetallado y general de suelos del Departamento del Quindio, 1988. Bogotá. 36 p.

IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Características geográficas del Quindio, 1989. Bogotá. 34 p.

INDEPENDENCE. Informe sobre la perforación y construcción de los pozos Cristales I y II, Bogotá,1988, (inérito). 78 p.

INGEOMINAS, Evaluación de amenazas geológicas en el área urbana del municipio de la Tebaida, Quindio. INGEOMINAS. Medellín, 1992. 64 p.

JAMES, Michael E. Estudio sismotectónico en el área del Viejo Caldas. INGEOMINAS. Medellín, 1986. 56 p.

JARAMILLO, D. Informe de interventoría en el pozo la Tebaida No 2. Montajes hidráulicos Ltda. Armenia, 1981. 43 p.

LEWIS, W., FOSTER, S., DRASSAR, B. Análisis de la Contaminación de las Aguas Subterráneas por Sistemas de Saneamiento Básico. CEPIS, OP/OMS. 1984. 81 p.

LEWIS, W., FOSTER, S., DRASSAR, B. Análisis de la Contaminación de las Aguas Subterráneas por Sistemas de Saneamiento Básico. CEPIS, OP/OMS. 1984. 81 p.

LLOYD, J. W. And HEATCHOTE, J. A. Natural inorganic Hydrochemistry in relation to groundwater. Oxford, 1985. 77 p.

MARTINEZ, D, CARLOS. Modelo hidrogeológico conceptual y formulación de las bases del modelo matemático del acuífero Glacis del Quindío (TQgp), en el municipio de la Tebaida, Departamento del Quindío. Fundación Universidad Central. Bogotá, 1999.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente (1986). Manual de Recursos Naturales Renovables. Bogotá, D.E. 87 p.

MINISTERIO DE SALUD (1984), Decreto No 1594: Disposiciones Sanitarias sobre Aguas, Bogotá.

MINISTERIO DE SALUD (1992), El Agua un Recurso Invaluable, Colección Salud Ambiente y Desarrollo, Tomo I, 331 p.

MONTAJES HIDRAULICOS Ltda. Prueba de bombeo del pozo la Correccional, municipio de la Tebaida. Comité de Cafeteros del Quindío. Armenia, 1980. 38 p.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. GEMS: Sistema Mundial de Monitoreo del Ambiente, GEMS/Agua, Guía Operacional, Publicación de CEPIS. 1983. 117 p.

PATIÑO, P. Miguel. Derecho Ambiental Colombiano. Primera edición 1999. Bogotá. 339 p.

POZOS Ltda. Informe técnico de la perforación de un pozo profundo en el municipio de la Tebaida, Departamento del Quindío. Comité de Cafeteros del Quindío. Armenia, 1989. 56 p.

RAMIREZ, B. Yesid. El Derecho Ambiental. Reimpresión 1998. Bogotá. 275 p.

RODRIGUEZ, G. Modelos numéricos aplicados a la hidrología. Balance hídrico. Informe interno. División de hidrogeología, INGEOMINAS, 1990. Bogotá. 78 p.

SHAW, E.M. Hydrology and practice. Second Edition. Van Nostrand Reinhold Co. Ltda. (UK). 1988. 539 p.

SUESCUN, Dario. Estudio Integral de Aguas del Departamento del Quindío. Comité Departamental de Cafeteros del Quindío. Asesoría Colombiana de Profesionales. Medellín, 1976. 89 p.

TENJO, G. Aprovechamiento del Agua Subterránea en el Valle Geográfico del Alto Cauca y su Manejo 1973-1988; Corporación Autónoma Regional del Cauca. (CVC), Subdirección de Recursos Naturales Renovables - Sección de Aguas Subterráneas. 1989. 39 p.

TENJO, G. Control de Explotación de Aguas Subterráneas. Capítulo preparado para el Manual Técnico Administrativo "Política de protección de Acuíferos" OPS/CEPIS. 1990. 142 p.

UNESCO. International Legend For Hidrogeological Map. Paris France. 1983. 65 p.