

**“MODELO HIDROGEOLÓGICO DE ACUÍFEROS EN DEPÓSITOS DEL
CUATERNARIO UBICADOS EN ÁREA RURAL DEL MUNICIPIO DE MANÍ EN
EL DEPARTAMENTO DE CASANARE”**

ANDREA CAROLINA HERNANDEZ ORTEGA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2019

**“MODELO HIDROGEOLÓGICO DE ACUÍFEROS EN DEPÓSITOS DEL
CUATERNARIO UBICADOS EN ÁREA RURAL DEL MUNICIPIO DE MANÍ EN
EL DEPARTAMENTO DE CASANARE”**

ANDREA CAROLINA HERNANDEZ ORTEGA

**TRABAJO DE GRADO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

DIRECTOR:

YULLY KATHERINE ARAQUE NUÑEZ

GEÓLOGA

CO-DIRECTOR:

JERSON VILLAREAL RUIZ

INGENIERO CIVIL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

A Dios en primer lugar, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de mis más anhelados propósitos.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he llegado hasta aquí y me he convertido en lo que soy. Es un orgullo y un privilegio ser su hija.

A mi hermana por estar siempre presente, acompañándome y dándome apoyo moral a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis amigos, por apoyarme cuando lo necesité, por extender su mano en momentos difíciles y por brindarme el apoyo necesario para culminar esta etapa.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
- ESCUELA DE GEOLOGÍA.
- AL INGENIERO JERSON VILLAREAL RUIZ POR ABRIRME LAS PUERTAS, SER UN EXCELENTE GUÍA Y POR HABER COMPARTIDO SUS CONOCIMIENTOS Y CONSEJOS A LO LARGO DE ESTOS ULTIMOS AÑOS DE CARRERA.
- A LA PROFESORA YULLY KATHERINE ARAQUE NUÑEZ POR SU TIEMPO, CONOCIMIENTO Y GUÍA. HA SIDO UN PLACER DESARROLLAR LA ÚLTIMA ETAPA DE MI CARRERA CON USTED.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	18
1 OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
2 GENERALIDADES.....	22
2.1 LOCALIZACIÓN.....	22
3 METODOLOGÍA.....	23
3.1 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES DE CAMPO Y POST - CAMPO.....	25
3.1.1 Estudio Geoeléctrico del área de estudio.....	26
3.1.2 Cartografía geológica del área de estudio.....	28
3.1.3 Inventario de puntos de agua.....	29
3.1.4 Propiedades hidráulicas de los acuíferos.....	29
3.1.5 Caracterización de las unidades hidrogeológicas	33
3.1.6 Caracterización hidroquímica.....	35
Interpretación de análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de muestras de agua subterránea	35
3.1.7 Comportamientos del flujo subterráneo.....	48
3.1.8 Zonas de recarga y descarga	48
3.1.9 Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.....	49
3.1.10 Modelo hidrogeológico	55

4 MARCO DE REFERENCIA	56
4.1 ANTECEDENTES	56
4.2 MARCO TEORICO	57
4.2.1 Ciclo hidrogeológico.....	57
4.2.2 Geología.....	60
5 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO	69
5.1 CLIMA	69
5.2 HIDROLOGÍA.....	70
5.2.1 Rio Meta	71
5.2.2 Rio Cusiana	71
5.2.3 Caño Guariamena.....	72
5.2.4 Caño Casimena	73
5.2.5 Caño Cururupá	73
5.3 ESTUDIO GEOELÉCTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	74
5.4 GEOLOGÍA LOCAL	81
5.4.1 Depósito Aluvial de los Ríos Meta y Cusiana (Qarmc)	83
5.4.2 Depósito de Llanura Aluvial (Qlla).....	84
5.4.3 Depósito Aluvial Reciente “Qar”	85
5.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	86
5.6 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	89
5.7 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS ACUÍFEROS	96
5.7.1 Análisis de las pruebas de bombeo	100
5.7.2 Resultados.....	109

5.8 CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	117
5.8.1 Unidad A1-1.....	120
5.8.2 Unidad A1-2.....	120
5.9 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO	122
5.10 CONEXIONES HIDRÁULICAS	124
5.11 ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA.....	125
5.11.1 Zonas de recarga.....	125
5.11.2 Zonas de descarga	126
5.12 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA	128
5.12.1 Caracterización Fisicoquímica y Bacteriológica	128
5.12.2 Índice de la Calidad del Agua (ICA)	133
5.12.3 Diagrama de Piper	135
5.12.4 Balance Iónico - Diagrama de Stiff.....	140
5.12.5 Índice de Saturación Langelier.....	144
5.13 VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	146
5.14 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	152
6 CONCLUSIONES.....	156
BIBLIOGRAFÍA.....	159

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	22
Figura 2. Bombeo en un acuífero libre.....	30
Figura 3. Diagrama de Piper	42
Figura 4. Diagrama de Piper – Definición de los tipos de aguas.....	43
Figura 5. Secuencia de Chevotareb.....	45
Figura 6. Ciclo Hidrológico.....	59
Figura 7. Perfil geológico esquemático Cuenca de los Llanos Orientales	63
Figura 8. Columna Litoestratigráfica descriptiva del área de estudio.....	64
Figura 9. Columna descriptiva del cuaternario en el área de estudio.....	68
Figura 10. Precipitación media mensual multianual.....	70
Figura 11. Cuerpos de agua.....	74
Figura 12. Sondeos Eléctricos Verticales.....	75
Figura 13. Localización del perfil obtenido de sondeos geoeléctricos	79
Figura 14. Perfil obtenido de sondeos geoeléctricos.....	80
Figura 15. Distribución espacial de las Unidades Geológicas aflorantes en el área de estudio.....	82
Figura 16. Distribución espacial de las Unidades estructurales en el área de estudio.....	88
Figura 17. Localización de pozos y aljibes encontrados en el Área de Estudio.....	95
Figura 18. Localización de Pruebas de Bombeo realizadas en el Área de Estudio	98
Figura 19. Formato Prueba de Bombeo El Medano	102
Figura 20. Gráfico de Descensos vs. Tiempo Bombeo El Medano	103
Figura 21. Solución de Theis Aquifer Test Bombeo El Medano	104
Figura 22. Solución de Cooper - Jacob Aquifer Test Bombeo El Medano.....	105
Figura 23. Formato Prueba de Recuperación El Medano	106

Figura 24. Gráfico de Descensos vs. Tiempo Recuperación El Medano	107
Figura 25. Solución de Theis Recovery Aquifer Test Recuperación El Medano ..	108
Figura 26. Distribución de Unidades Hidrogeológicas en el Área de Estudio	121
Figura 27. Direcciones de flujo de agua subterránea en el Área de Estudio	123
Figura 28. Conexiones hidráulicas	124
Figura 29. Zonas de recarga y descarga en el Área de Estudio	127
Figura 30. Localización de los pozos muestreados para el Área de Estudio	129
Figura 31. Índice de Calidad del Agua	134
Figura 32. Resultados del Diagrama de Piper	136
Figura 33. Gráficas de distribución con base en los resultados del Diagrama de Piper	138
Figura 34. Resultados Diagrama de Stiff	141
Figura 35. Localización resultados Diagrama de Stiff	142
Figura 36. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos	151
Figura 37. Bloque Diagrama de las unidades Hidrogeológicas.	153

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo para llevar a cabo las mediciones de nivel en las pruebas de bombeo / recuperación.	31
Tabla 2. Tipos de ensayo de bombeo a caudal constante y métodos de interpretación a usar en el estudio de acuíferos.....	33
Tabla 3. Unidades hidrogeológicas de acuerdo a la productividad de los acuíferos.....	34
Tabla 4. Productividad de los acuíferos a partir de la capacidad específica.....	34
Tabla 5. Clasificación de la calidad del agua.	38
Tabla 6. Variables y ponderación para el caso de cinco variables.	39
Tabla 7. Clasificación de la Variable “D”, Profundidad del agua subterránea.	51
Tabla 8. Clasificación de la Variable “R”, Recarga neta.	51
Tabla 9. Clasificación de la Variable “A”, Litología del acuífero.....	51
Tabla 10. Clasificación de la Variable “S” Tipo de Suelos.....	52
Tabla 11. Clasificación de la Variable “T”, Topografía.....	52
Tabla 12. Clasificación de la Variable “I”, Naturaleza de la zona no saturada.	53
Tabla 13. Clasificación de la Variable “C”, Conductividad Hidráulica del Acuífero.	53
Tabla 14. Índice de Ponderación.	54
Tabla 15. Grado de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación mediante el método de DRASTIC.	54
Tabla 16. Unidades y espesores unidades geológicas que componen la columna Litoestratigráfica en el área de estudio.	64
Tabla 17. Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales.	75
Tabla 18. Unidades Geoeléctricas para el área de estudio.	76
Tabla 19. Unidades geológicas delimitadas para el Área de estudio	81
Tabla 20. Inventario de puntos de agua del Área de estudio	90

Tabla 21. Registro fotográfico de Inventario de Puntos de Agua	92
Tabla 22. Coordenadas y predios de realización de Pruebas de Bombeo	96
Tabla 23. Coordenadas y predios de realización de Pruebas de Bombeo	97
Tabla 24. Registro fotográfico de Pruebas de Bombeo	99
Tabla 25 Resumen datos empleados en el análisis y capacidad específica de los pozos (Época de lluvias).	101
Tabla 26 Resumen datos empleados en el análisis y capacidad específica de los pozos (Época seca)	101
Tabla 27 Transmisividad y Conductividad estimada (época de lluvia).	110
Tabla 28 Transmisividad y Conductividad promedio estimada (época de lluvia).	111
Tabla 29 Transmisividad y Conductividad estimada (Época seca).....	111
Tabla 30 Transmisividad y Conductividad promedio estimada (Época seca).	112
Tabla 31 Orden de magnitud de K (m/día)).....	114
Tabla 32 Clasificación del Terreno según K (m/día).....	114
Tabla 33 Unidades Hidrogeológicas de acuerdo a la productividad de los acuíferos.....	117
Tabla 34 Productividad de los acuíferos a partir de la capacidad específica.....	118
Tabla 35. Productividad de los acuíferos evaluados	119
Tabla 36. Georreferenciación de los puntos de muestreo	128
Tabla 37. Resultados in situ y de laboratorio de los cuerpos de agua subterránea (Temporada de lluvias)	130
Tabla 38. Resultados in situ y de laboratorio de los cuerpos de agua subterránea (Temporada seca).	132
Tabla 39. Índice de Calidad del Agua (ICA).	134
Tabla 40. Datos utilizados para la elaboración del Diagrama de Piper.	135
Tabla 41. Datos empleados para la elaboración de los Diagramas de Pie.....	137
Tabla 42. Resultados, clasificación de las aguas.	139
Tabla 43. Cálculo del Índice de Saturación de Langelier.	145
Tabla 44. Calculo de índice de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el Área de Estudio.	147

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Terraza aluvial del Río Meta - Qarmc. Sector Finca el Médano.	83
Fotografía 2 Suelo arcilloso en la unidad Qarmc. Sector Finca El Médano.	83
Fotografía 3 Suelos lateríticos ferruginosos en Qlla. Caño sin nombre. Sector Buenavista.	85
Fotografía 4 Morfología del Depósito de Llanura Aluvial (Qlla). Cerca del cauce del Caño Cururupá.	85
Fotografía 5 Extracción ocasional de “ripio”. Sector Finca Manare, cerca del cauce del Río Meta.	85
Fotografía 6 Barras y terrazas. Cauce Caño Casimena. Sector Finca El Paraíso.	86

LISTADO DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD)

Anexo A Inventario de puntos de agua

Anexo B Formatos de Pruebas de Bombeo

Anexo C Resultados del análisis de pruebas de bombeo por método analítico

Anexo D Resultados del análisis de pruebas de bombeo mediante Aquifer Test

Anexo E Hoja de cálculo ICA

Anexo F Hoja de cálculo LSI

Anexo G Hoja de cálculo vulnerabilidad

Anexo H Cartografía

RESUMEN

TÍTULO: MODELO HIDROGEOLÓGICO DE ACUÍFEROS EN DEPÓSITOS DEL CUATERNARIO UBICADOS EN ÁREA RURAL DEL MUNICIPIO DE MANÍ EN EL DEPARTAMENTO DE CASANARE.*

AUTOR: ANDREA CAROLINA HERNANDEZ ORTEGA†

PALABRAS CLAVE: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL, HIDROGEOLOGÍA, ACUÍFERO, CASANARE.

DESCRIPCIÓN:

El municipio de Maní, Casanare es un área en la cual el agua subterránea es un recurso de vital importancia para la comunidad ya que constituye la fuente principal de abastecimiento de este recurso. Por lo anterior, es necesario realizar un estudio que detalle las características hidráulicas de los acuíferos con el fin de plantear un modelo hidrogeológico conceptual que informe del comportamiento real de los acuíferos aprovechados en la zona.

Para el desarrollo del trabajo se consideraron 3 fases, en la primera se revisó la información existente acerca del área de interés y se planificó el trabajo de campo; en la segunda se desarrolló el trabajo de campo correspondiente a reconocimiento geológico, inventario de puntos de agua y ensayos hidráulicos; y en la tercera se realizó la cartografía geológica, análisis de los datos obtenidos durante los ensayos hidráulicos, caracterización de unidades hidrogeológicas, análisis de la interacción del agua subterránea con las rocas que del acuífero, se estableció el comportamiento del flujo subterráneo, las zonas de recarga y descarga y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero estudiado. Tras la fusión de esta información se concretó el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero conformado por los depósitos cuaternarios en el área de estudio.

Se definieron sistemas acuíferos relacionados directamente con las unidades geológicas. La unidad hidrogeológica aprovechada por la comunidad es la unidad A1 – 1, la cual tiene parámetros hidráulicos relacionados con acuíferos buenos, permeables, con buena capacidad para transmitir agua dentro de la Formación y constituidos principalmente por material grueso, tipo arena y grava. La dirección de flujo de agua subterránea predominante es concordante con la topografía del terreno. La composición química del agua subterránea indica que el agua encontrada en la zona de estudio es agua con poca permanencia en el subsuelo proveniente principalmente de recarga por agua lluvia.

* Trabajo de grado.

† Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Directora: Yully Katherine Araque Nuñez, Geóloga.

ABSTRACT

TITLE: HYDROGEOLOGICAL MODEL OF AQUIFERS IN QUATERNARY DEPOSITS LOCATED IN THE RURAL AREA OF THE MUNICIPALITY OF MANÍ CASANARE.*

AUTHOR: ANDREA CAROLINA HERNANDEZ ORTEGA.†

KEYWORDS: CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL, HIDROGEOLOGY, AQUIFER, CASANARE.

DESCRIPTION:

The municipality of Maní, Casanare is an area in which groundwater is a resource of vital importance for the community since it constitutes the main source of supply for this resource. Therefore, it is necessary to develop a study that details the hydraulic characteristics of the aquifers in order to propose a conceptual hydrogeological model that reports the actual behavior of aquifers used in the area.

For the development of the work, 3 phases were considered, in the first, the existing information about the area of interest was reviewed and the fieldwork was planned; In the second, the fieldwork corresponding to geological reconnaissance, inventory of water points and hydraulic tests was developed; and third, geological mapping was performed, analysis of data obtained during hydraulic tests, characterization of hydrogeological units, analysis of the interaction between groundwater and aquifer rocks, behavior of the groundwater flow, the areas of recharge and discharge were established and the vulnerability to contamination of the aquifer was studied. After the fusion of this information, the conceptual hydrogeological model of the aquifer formed by the Quaternary deposits in the study area was specified.

Aquifer systems directly related to the geological units were defined. The hydrogeologic unit used by the community is the unit A1 - 1, which has good hydraulic parameters related to permeable aquifers, with good capacity to transmit water in the formation and composed mainly of sand and gravel type material. The predominant direction of groundwater flow is consistent with the topography of the land. The chemical composition of the groundwater indicates that the water found in the study area is water with little remaining in the subsoil, mainly coming from rainwater recharge.

* Bachelor Thesis.

† Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Directora: Yully Katherine Araque Nuñez, Geóloga.

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas forman parte del ciclo hidrológico y el conocimiento de su estado y dinámica debe ser abordado desde la comprensión de una trama de flujos hídricos que atienda particularidades propias de los medios naturales, permeables y porosos de sedimentos y rocas fracturadas, donde se alojan las reservas de este patrimonio. Estas reservas de aguas que ocurren en el subsuelo en Colombia, corresponden principalmente a ambientes sedimentarios y vulcano clásticos que se han depositado en el tiempo geológico.

El área de estudio se ubica en la provincia hidrogeológica de los llanos orientales que hace parte de las provincias hidrogeológicas pericratónicas, las cuales tienen sistemas acuíferos extensos, continuos y están asociados a depósitos aluviales de gran extensión, terrazas de piedemonte de grandes ríos, entre otros. De acuerdo al Ideam¹ el área de estudio hace parte del sistema acuífero de Yopal – Tauramena, el cual se encuentra localizado en abanicos aluviales de origen torrencial y terrazas.

En consideración a lo anterior este trabajo de grado presenta un estudio hidrogeológico consistente en la caracterización hidráulica de las unidades hidrogeológicas, el comportamiento del agua subterránea y la distribución en espesor y profundidad de las unidades acuíferas que conforman los primeros niveles de los depósitos de tipo cuaternario en un área rural localizada dentro del municipio de Maní en el departamento de Casanare.

El desarrollo del presente trabajo se realizó a partir de una metodología de recolección, procesamiento y análisis de información que contribuyó a elaboración

¹ IDEAM, 2013. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia.

del modelo hidrogeológico conceptual. Se consideraron 3 fases: la primera correspondiente al pre-campo donde se revisó la información de geología, hidrología e hidrogeología existente acerca del área de interés y se efectuó también la planificación del trabajo de campo; en la segunda fase se realizó la visita de campo donde se realizó el reconocimiento del área y desarrollo de ensayos hidráulicos e inventario de puntos de agua; y en la tercera fase se realizó el procesamiento y análisis de la información recolectada en campo junto con la información adquirida en la primera fase, definiendo así el modelo hidrogeológico conceptual de área de estudio.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un modelo hidrogeológico que caracterice las particularidades y el comportamiento hidráulico de los primeros niveles acuíferos localizados en los depósitos de tipo cuaternario en un área rural del municipio de Maní.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar y caracterizar las unidades geológicas y estructurales superficiales presentes en el área de estudio.
- Conocer el aprovechamiento que se hace del recurso hídrico subterráneo en el área de estudio y definir la altura de la tabla de agua a través del inventario de puntos de agua en la zona; información que sirve como base en los cálculos de la hidráulica subterránea.
- Definir de los parámetros hidráulicos de los acuíferos captados por la comunidad mediante ensayos hidráulicos en pozos de agua subterránea y aljibes.
- Analizar la composición iónica de las aguas subterráneas y su interacción con las rocas y minerales presentes en las unidades geológicas acuíferas con las cuales está relacionada.

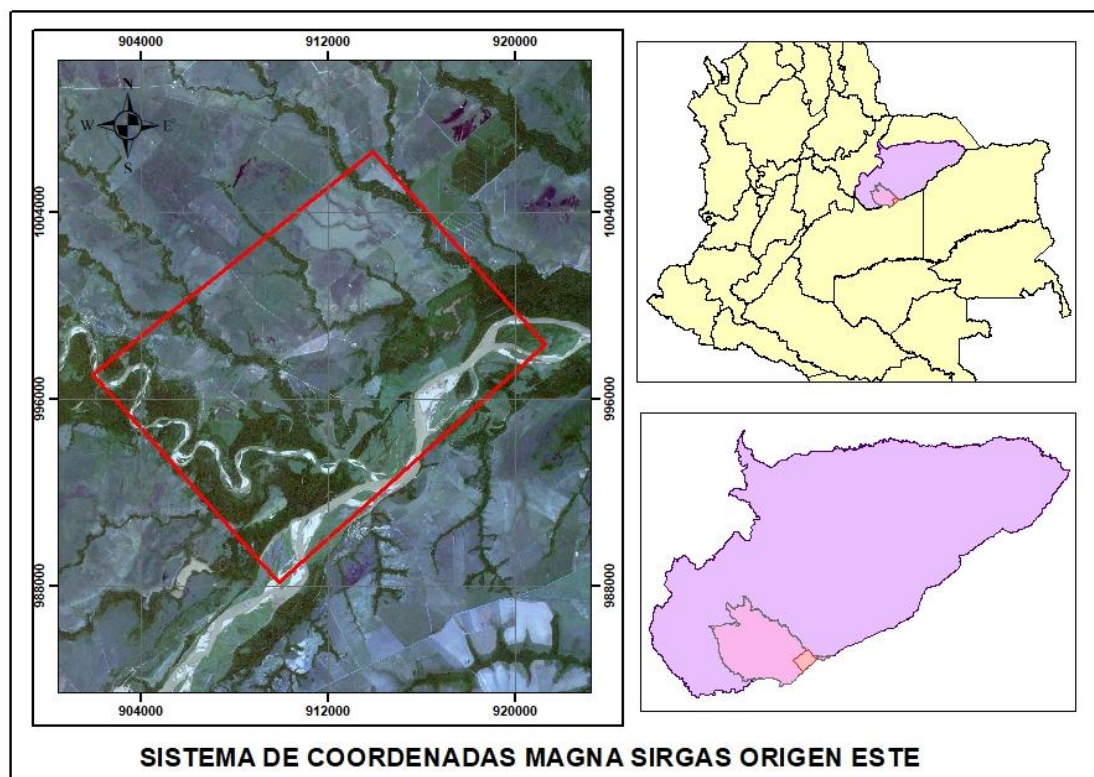
- Describir las características principales de los primeros niveles acuíferos localizados en los depósitos de tipo cuaternario en el área de estudio.

2 GENERALIDADES

2.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio corresponde a un área rural, la cual se localiza en la región Oriental de Colombia, sobre las cuencas de los ríos Cusiana y Meta, en jurisdicción del municipio de Maní, en el departamento de Casanare, la localización del área de estudio se presenta en la Figura 1.

Figura 1. Localización del área de estudio.



3 METODOLOGÍA

Se realizó una investigación que comprendió la recolección, procesamiento y análisis de información que contribuyó a la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual.

Se consideraron 3 Fases:

Primera Fase: Se revisó la información existente acerca del área de interés. Se encontraron algunos estudios ambientales realizados en zonas aledañas al área de estudio, estos fueron realizados por algunas empresas de la industria de hidrocarburos ya que el área de estudio es de interés minero. Se obtuvo también un informe de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados en el área de estudio en el año 2016 y dos informes de resultados de muestreo fisicoquímico y bacteriológico de aguas subterráneas de los años 2016 y 2017. Se encontraron también diversos estudios realizados por Ingeominas, Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), UIS y otras entidades donde se presenta información de la geología de los llanos orientales. Para conocer la topografía del área, se utilizaron las herramientas GoogleEarth y GlobalMapper Trial para generar un Modelo de Elevación Digital (DEM) del área de estudio. Se obtuvo también la imagen satelital Rapideyes 2016, la cual se usó para conocer de manera preliminar las características superficiales de la zona de estudio.

En esta fase se efectuó también la planificación del trabajo de campo de acuerdo a la información que se obtuvo de la zona, dentro de esta planificación se definieron los puntos para la realización de las pruebas de bombeo; la planificación de los

recorridos a realizar con el fin de identificar los rasgos geológicos presentes en el área como lineamientos y características litológicas para definición de unidades y se planificó también la toma de datos para el inventario de puntos de agua.

Segunda Fase: Trabajo de campo, se realizó el reconocimiento del área, la caracterización geológica e hidrogeológica del área, que incluyó la definición de unidades litoestratigráficas presentes en el área, las características estructurales de la zona y la presencia de niveles acuíferos aprovechados por la comunidad. Se realizaron ensayos hidráulicos correspondientes a pruebas de bombeo y recuperación; y el inventario de puntos de agua.

Tercera fase: Trabajo de post campo, en esta fase se realizó la cartografía geológica, el análisis de los datos obtenidos durante los ensayos hidráulicos, definiendo así las propiedades hidráulicas de los acuíferos; se realizó también la caracterización de unidades hidrogeológicas del área de estudio, el análisis de la interacción del agua subterránea con las rocas que conforman el acuífero, se estableció el comportamiento del flujo subterráneo, las zonas de recarga y descarga y la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos estudiados. En el numeral 3.1 se realiza una descripción de cada una de las actividades que se realizaron durante esta fase.

La fusión de esta información dio como resultado un escenario amplio y detallado del comportamiento del agua subterránea en los acuíferos estudiados, concretando un modelo hidrogeológico conceptual de los primeros niveles acuíferos en el área.

3.1 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES DE CAMPO Y POST - CAMPO

La fase inicial está relacionada al reconocimiento geológico del área, el cual consistió en la obtención de los rasgos geológicos regionales (unidades litoestratigráficas y estructuras como fallas y lineamientos) a partir de la recopilación de información secundaria. Se interpretó una imagen satelital suministrada por parte de la compañía AICA S.A.S., RAPIDEYES (2016), la cual cubre toda el área de estudio; a través de esta, se obtuvo la interpretación de las unidades geológicas de superficie y el detalle de los rasgos estructurales (fallas y lineamientos). Posteriormente en la fase de campo se realizaron recorridos con el objetivo de identificar y confirmar los diferentes rasgos geológicos mencionados anteriormente.

Para la exploración de aguas subterráneas es necesario un reconocimiento hidrogeológico del área, para lo cual se realizó el inventario de puntos de agua, en el cual se recolectó la información de todos los puntos de agua subterránea presentes en la zona, entre la información que se recolectó está el tipo de punto, características de la topografía de la zona en la que se encuentra el punto, datos de la construcción del punto, método de extracción del agua, propiedades físico químicas in situ, entre otros.

Para el análisis de las aguas subterráneas se realizó la caracterización de unidades hidrogeológicas, la cual se fundamentó en la identificación, delimitación y caracterización textural y composicional de las formaciones geológicas, información complementada con el correspondiente inventario de puntos de agua subterránea, con esto, se hizo posible la determinación del tipo de acuífero, líneas de flujo y zonas de recarga y descarga de los acuíferos.

La descripción de los acuíferos se complementó con la realización de ensayos hidráulicos, mediante los cuales se definieron las capacidades hidráulicas que poseen los niveles acuíferos.

Se utilizó información secundaria correspondiente a Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados en la zona, suministrada por parte de la compañía AICA S.A.S. La información suministrada por estos SEV se analizó para definir los espesores, continuidad y características litológicas de los acuíferos.

Con el fin de conocer la interacción de las aguas subterráneas con las rocas y minerales presentes en las unidades geológicas acuíferas se analizaron los resultados de muestreos fisicoquímicos y bacteriológicos realizados en algunos puntos de agua subterránea en el área de estudio. La información de muestreos fisicoquímicos y bacteriológicos fue suministrada por parte de la compañía AICA S.A.S.

Con la fusión de la información obtenida de las actividades anteriores se obtuvo como resultado el escenario completo y detallado del comportamiento del agua subterránea en el área de estudio, partiendo de la definición y delimitación de los niveles acuíferos, unidades y propiedades se concretó un **modelo hidrogeológico conceptual** en el área de estudio.

3.1.1 Estudio Geoelectrico del área de estudio

Los Sondeos Eléctricos Verticales, son una herramienta implementada con la finalidad de estudiar los cambios de resistividad en las rocas, esta dependerá

directamente de la litología presente. A través de los SEV, se logran definir las características principales de los niveles acuíferos en el subsuelo, así como los espesores y comportamiento de los estratos, hasta donde se tiene alcance en un punto dado.

Los métodos eléctricos se basan en tres fenómenos y propiedades asociadas con rocas. El primero es la resistividad, la cual es el opuesto a la conductividad eléctrica, esta determina la cantidad de corriente que pasa por una roca al aplicar una diferencia potencial específica. El segundo es la actividad electroquímica causada por los electrolitos que circulan en el subsuelo, esta es la base para los métodos magnéticos, de potencial propio y de polarización inducida. Por último, se tiene la constante dieléctrica, que indica la capacidad que posee un material rocoso de guardar carga eléctrica, y a su vez determina parcialmente la respuesta de formaciones rocosas a las corrientes alternas de alta frecuencia introducida en la tierra, a través de los métodos inductivos o conductivos.

Dado que el área de estudio es un área de interés minero, en el año 2016 se realizó un estudio geoeléctrico en la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) denominado “Estudio geoeléctrico para la determinación de la ubicación de cinco pozos exploratorios para agua subterránea en el bloque morichitos, municipios de Maní y Orocué (Casanare)”, este estudio fue realizado por el Geólogo Camilo Tovar Bonilla.

La realización de los SEV se llevó a cabo utilizando un dispositivo tipo Schlumberger, el cual consiste de un arreglo de 4 electrodos que permiten obtener variaciones de resistividad bajo un punto dado. Para generar el campo eléctrico se introduce al subsuelo corriente eléctrica a través de los 2 electrodos (A y B)

provocando un campo de potenciales, el cual es medido por los otros 2 electrodos de medición.

La profundidad investigada está relacionada con las dimensiones y geometría del dispositivo utilizado. Las lecturas de corriente y de diferencia de potencial permiten calcular la resistividad de los materiales del subsuelo.

3.1.2 Cartografía geológica del área de estudio

Para obtener la cartografía geológica del área de estudio, así como la descripción local tanto de las unidades como de los rasgos geológicos más relevantes inicialmente se obtuvieron los rasgos geológicos regionales (unidades litoestratigráficas y estructuras como fallas y alineamientos) a partir de la recopilación de información secundaria, tomando como base el Mapa Geológico de Colombia (2015) para la cartografía de superficie; así como publicaciones de la ANH para la Cuenca de los Llanos Orientales e informes locales con información litoestratigráfica de las unidades de roca presentes en el subsuelo, de interés para la extracción de hidrocarburos. Se realizó también la interpretación de la imagen satelital RAPIDEYES (2016), la cual cubre toda el área en cuestión. A través de esta, se obtuvo la interpretación de las unidades geológicas de superficie y el detalle de los rasgos estructurales (fallas y lineamientos) que se pudieron observar. Durante la fase de Campo, se hicieron recorridos a pie con el objetivo de identificar los diferentes rasgos geológicos mencionados anteriormente.

En la fase Postcampo se ajustó la cartografía geológica sobre la imagen satelital multiespectral (RAPIDEYE, 2016), con base en los detalles encontrados en campo.

Respecto a la cartografía geológica se presentan los siguientes mapas que se encuentran en el Anexo H del presente estudio:

- Geológico
- Estructural
- Pendientes

3.1.3 Inventario de puntos de agua

El inventario de puntos de agua se realizó visitando todos los predios ubicados en la zona de influencia directa del proyecto, ya que en la zona es común el uso de pozos profundos o aljibes para el abastecimiento de agua. Para cada punto de agua subterránea identificado en el área, se tomó información representativa de este como profundidad, nivel del agua, características de explotación, uso, entre otros. Para consignar esta información, se utilizó el Formulario Único Nacional Para Inventario de Puntos de Agua Subterránea. Esta información hace parte de la línea base para evaluar la disponibilidad del agua en el área de estudio.

3.1.4 Propiedades hidráulicas de los acuíferos

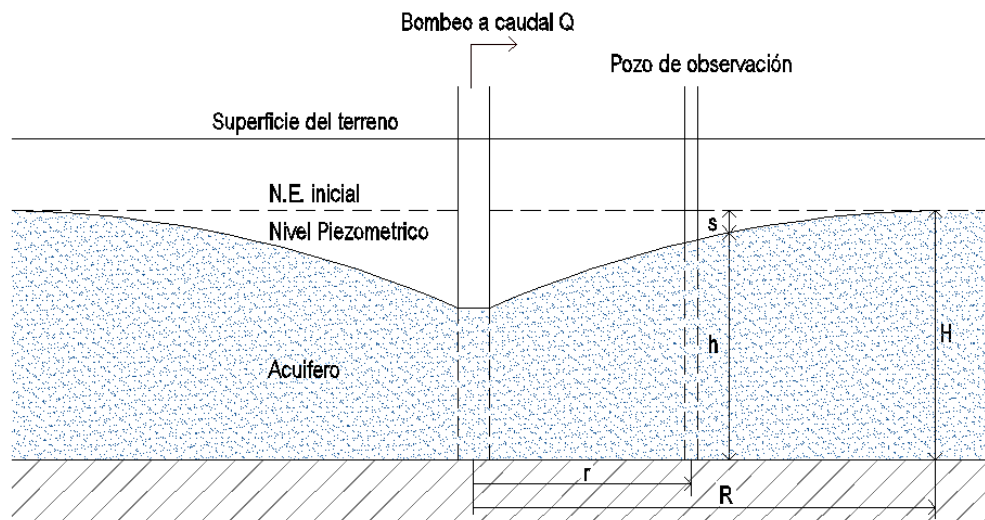
Con la finalidad de determinar las propiedades hidráulicas de los acuíferos en el trabajo de pre-campo se identificaron puntos para realizar pruebas de bombeo y recuperación.

Un ensayo de bombeo consiste en bombear un pozo y observar la evolución temporal de los descensos del nivel de agua en el mismo pozo de bombeo. El

ensayo de recuperación se efectúa a continuación del ensayo de bombeo y consiste en medir la recuperación de niveles una vez se ha detenido el bombeo.

“Al iniciar el bombeo en un pozo el nivel de agua desciende en su interior, debido al gradiente hidráulico provocado en el acuífero se produce un flujo de agua hacia o desde el pozo, originándose una propagación radial de descensos del nivel piezométrico, formando un “cono de bombeo”. Este cono se va profundizando y extendiendo en función del tiempo, del caudal de bombeo y de los parámetros hidrogeológicos del acuífero”².

Figura 2. Bombeo en un acuífero libre.



Donde:

Q : Caudal

s : Descenso

² BATISTA, E. Curso hispanoamericano en hidrología subterránea. Montevideo. 2014.

h: Abatimiento

H: Espesor del acuífero (espesor saturado inicial)

R: Radio de influencia

r: Radio del pozo

Para el registro del abatimiento en los pozos, se empleó una sonda de nivel con señal sonora para medir los niveles de agua. La toma de mediciones de nivel se realizó de acuerdo a lo presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Tiempo para llevar a cabo las mediciones de nivel en las pruebas de bombeo / recuperación.

Tiempo (minutos)		Intervalo
Desde	Hasta	
0	5	Cada 30 segundos
5	10	Cada minuto (1 min)
10	20	Cada dos minutos (2 min)
20	60	Cada cinco minutos (5 min)
60	100	Cada diez minutos (10 min)
100	180	Cada veinte minutos (20 min)
180	480	Cada treinta minutos (30 min)
480	1440	Cada sesenta minutos (60min o 1h)

Los parámetros hidrogeológicos de un acuífero son:

- Coeficiente de almacenamiento (S): Se refiere a la capacidad que tiene un acuífero para almacenar agua y luego cederla. Cuando se trata de un acuífero

libre, es equivalente al valor de la porosidad eficaz; cuando se trata de un acuífero confinado, depende del espesor geológico del acuífero.

- Conductividad Hidráulica (K): Es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico. Su valor es una constante para cada medio y cada fluido en unas mismas condiciones.
- Transmisividad (T): Facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica.

Cualquier valor de los parámetros hidrogeológicos estimados a partir de ensayos hidráulicos está sujetos a dos factores a saber:

- Capacidad de almacenar el agua: con base en parámetros como porosidad y coeficiente de almacenamiento.
- Capacidad de transmitir: basado en la conductividad y transmisividad de las rocas.

Para analizar las pruebas de bombeo y definir parámetros hidráulicos a partir de estas, se utilizaron métodos gráficos en Excel empleando métodos analíticos y se utilizó también el software especializado AquiferTest Pro 2016.1 Trial.

De acuerdo a las características de los pozos bombeados y del comportamiento del acuífero durante la prueba de bombeo se definió el método analítico con el que analizarla para determinar los parámetros hidráulicos del acuífero. Entre los métodos que se pueden utilizar se encuentran los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de ensayo de bombeo a caudal constante y métodos de interpretación a usar en el estudio de acuíferos.

Tipo de acuífero	Tipo de ensayo		Método de análisis
Confinado	Régimen permanente		Fórmula de Thiem
	Régimen variable	Interpretación de descensos	Fórmula de Theis
		Interpretación de recuperación	Aproximación logarítmica de Jacob
			Fórmula de recuperación de Theis
Semiconfinado	Régimen permanente		Fórmula de De Glee o de Jacob-Hantush
	Régimen variable	Int. Descensos	Fórmula de Hantush
		Int. Recuperación	Análisis ascensos teóricos
Libre	Régimen permanente		Fórmula de Thiem (1) y corrección de Jacob
			Fórmula de Dupuit (2)
	Régimen variable	Int. descensos	Fórmula de Theis (3)
			Aproximación logarítmica de Jacob (3)
			Corrección de Dupuit
			Fórmula de Boulton
			Fórmula de Neuman
		Int. recuperación	Fórmula de recuperación de Theis (1)

(1) Para descensos pequeños en comparación con el espesor saturado

(2) Si es admisible la aproximación de Dupuit-Forcheimer

(3) Si los descensos son pequeños en comparación con el espesor saturado y no existe drenaje diferido (es instantáneo).

Fuente: Manzano Arellano, 2008.

3.1.5 Caracterización de las unidades hidrogeológicas

De acuerdo con el análisis de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados dentro del área, se recopiló la información obtenida, junto con la información de la geología local, para realizar una clasificación de los niveles definidos, esto a través de lo expuesto por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (Southern African Developmen Community, S/A) Tabla 3.

Tabla 3. Unidades hidrogeológicas de acuerdo a la productividad de los acuíferos.

Productividad			3. Baja productividad general pero con productividad moderada local	
Tipo de Acuífero	1..Alta Productividad	2. Moderada Productividad		4. Baja Productividad
Acuífero en sedimentos inconsolidados y porosidad primaria	A1	A2	X	X
Acuíferos con porosidad secundaria	B1	B2	X	X
Acuíferos kársticos	C1	C2	X	X
Formaciones de baja permeabilidad.	X	X	D1	D2

Fuente Sothern African Development Community. S/A.

De acuerdo a la información de capacidad específica que se obtuvo a partir de los ensayos hidráulicos y con base en la Tabla 4 se determinó la productividad de las unidades hidrogeológicas.

Tabla 4. Productividad de los acuíferos a partir de la capacidad específica.

Productividad	Capacidad Específica(l/s/m)
Alta	Mayor de 1,1
Mediana	Entre 0,1 y 1,1
Baja	Entre 0,01 y 0,1
Muy Baja	Menor de 0,01

Fuente Sothern African Development Community. S/A.

Con base en esta información y lo que se obtuvo en las pruebas de bombeo, se recopiló la información necesaria de los parámetros que ayudaron a definir las unidades acuíferas dentro del área de estudio.

Para la delimitación de Unidades Hidrogeológicas, se tomó en primera instancia la distribución de las unidades Geológicas y con base en los resultados de cada una de las variables que definen el acuífero, se clasificaron estos niveles y su productividad.

3.1.6 Caracterización hidroquímica

La hidroquímica es una rama que estudia las propiedades químicas del agua superficial y subterránea y su relación con la geología regional. Analiza los iones disueltos en agua y los procesos de interacción del agua y el medio sólido. Estos últimos, dependen de la naturaleza del medio, de la composición del agua original, de las características de la zona no saturada, de la temperatura, de las acciones antrópicas, de los mecanismos de recarga y descarga y de los parámetros fisicoquímicos. El objetivo de este análisis es conocer la composición iónica del agua subterránea y su interacción con las rocas y los minerales presentes en las unidades geológicas acuíferas con las cuales está relacionada.

Interpretación de análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de muestras de agua subterránea

La información de muestreos fisicoquímicos y bacteriológicos de algunos puntos de agua subterránea en el área de estudio necesaria para el desarrollo de los siguientes análisis fue suministrada por parte de la compañía AICA S.A.S.

Las muestras de agua subterránea fueron recolectadas por la Corporación Integral del Medio Ambiente C.I.M.A., en dos diferentes campañas de campo, una en temporada de lluvias entre los días 10 y 13 de diciembre del año 2016, y otra en temporada seca entre los días 25 de enero y 2 de febrero del año 2017. El muestreo de agua subterránea se realizó en tres (3) puntos de muestreo, localizados en el área de estudio, durante las dos campañas de campo se realizó muestreo en los mismos puntos. En los puntos de muestreo se realizó la toma respectiva de muestra para el posterior análisis fisicoquímico y bacteriológico.

La Corporación Integral del Medio Ambiente C.I.M.A., es un laboratorio acreditado por el IDEAM mediante Resolución 2085 del 1 de octubre de 2015, extendida en la Resolución 0918 del 17 de mayo de 2016, bajo la norma NTC ISO 17025/2005, siguiendo los procedimientos estipulados en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed.22. Los análisis fisicoquímicos fueron realizados por los laboratorios: Corporación Integral del Medio Ambiente C.I.M.A., Instituto de Higiene Ambiental, HidroLab y S.G.S., laboratorios también acreditados por el IDEAM.

3.1.6.1 Índice de la Calidad del Agua (ICA)

Los índices de la calidad del agua determinan condiciones físico – químicas y microbiológicas de la calidad de un cuerpo de agua, de alguna manera permite reconocer problemas de contaminación puntual, o en el estado general del agua

(IDEAM, 2010). El propósito de estos índices es simplificar en una expresión numérica las características negativas o positivas de cualquier fuente de agua (Brown, McClelland, Deininger, & Tozer., 1970).

El Índice de calidad del agua es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t .

Los valores calculados del indicador se comparan con los establecidos en tablas de interpretación permitiéndose clasificar la calidad del agua de forma descriptiva en una de cinco categorías (buena, aceptable, regular, mala o muy mala) que a su vez se asocian a un determinado color (azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente).

El indicador se calculó a partir de los datos de concentración de un conjunto de cinco variables que determinaron, en gran parte, la calidad de las aguas mediante la siguiente ecuación:

$$ICA_{njt} = \left(\sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \right)$$

Dónde:

ICA_{njt} : Es el índice de calidad del agua de una determinada corriente en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t , evaluando con base en n variables.

W_i : Es el ponderador o peso relativo de la variable calidad i .

I_{ikjt} : Es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j , registrado durante la medición realizada en el trimestre k , del periodo de tiempo t .

n : Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador.

Los valores optativos que puede llegar a tomar el indicador han sido clasificados en categorías, de acuerdo a ello se clasifica la calidad del agua, a la cual se le ha asociado un color como señal de alerta. Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de la calidad del agua.

Valor del Índice	Clasificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0.00 – 0.25	Muy Mala	Rojo
0.26 – 0.50	Mala	Naranja
0.51 – 0.70	Regular	Amarillo
0.71 – 0.90	Aceptable	Verde
0.91 – 1.00	Buena	Azul

Fuente IDEAM, 2011.

En la Tabla 6 se presentan las variables que están involucradas en el cálculo del indicador en el caso que se emplean 5 variables, la unidad de medida en la que se registra cada uno de ellos y la ponderación que tienen dentro de la fórmula de cálculo.

Tabla 6. Variables y ponderación para el caso de cinco variables.

Variable	Unidad de Medida	Ponderación
Oxígeno Disuelto, OD.	% Saturación	0,2
Sólidos suspendidos totales, SST.	mg/l	0,2
Demanda Química de Oxígeno, DQO.	mg/l	0,2
Conductividad Eléctrica, C.E.	mg/l	0,2
pH	Unidades de pH	0,2

Fuente: IDEAM, 2011. Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00).

3.1.6.1.1 Cálculo de cada variable

- Oxígeno Disuelto

Esta variable tiene el papel biológico fundamental de definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas. Inicialmente se calcula el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto PS_{OD} :

$$PS_{OD} = -0.6537153 - 0.0104799 * T + 6.918079 * OD + 0.2075711 * T * OD - 0.0129793 * OD * OD$$

Una vez calculado el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, el valor I_{OD} se calcula con la fórmula:

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * PS_{OD})$$

Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es mayor al 100%:

$$I_{OD} = 1 - (0.01 * PS_{OD} - 1)$$

- Sólidos Suspendidos Totales

La presencia de sólidos en suspensión en los cuerpos de agua indica cambio en el estado de las condiciones hidrológicas de la corriente. Dicha presencia puede estar relacionada con procesos erosivos, vertimientos industriales, extracción de materiales y disposición de escombros. Tiene una relación directa con la turbiedad. El subíndice de calidad para sólidos suspendidos se calcula como sigue:

$$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST)$$

Si $SST \leq 4.5$ entonces $I_{SST} = 1$

Si $SST \geq 320$ entonces $I_{SST} = 0$

- Demanda Química de Oxígeno

Refleja la presencia de sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas a condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura, como la materia orgánica, ya sea biodegradable o no, y la materia inorgánica.

Mediante adaptación de la propuesta de la Universitat Politècnica de Catalunya se calcula con la fórmula:

Si $DQO \leq 20$ entonces $I_{DQO} = 0.91$

Si $20 < DQO \leq 25$ entonces $I_{DQO} = 0.71$

Si $25 < DQO \leq 40$ entonces $I_{DQO} = 0.51$

Si $40 < DQO \leq 80$ entonces $I_{DQO} = 0.26$

Si $DQO > 80$ entonces $I_{DQO} = 0.125$

- Conductividad Eléctrica

Está íntimamente relacionada con la suma de cationes y aniones determinada en forma química, refleja la mineralización. Se calcula como sigue:

$$I_{C.E.} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \log_{10} C.E.)}$$

Cuando $I_{C.E.} < 0$ entonces $I_{C.E.} = 0$

- pH

Mide la acidez.

Si $pH < 4$ entonces $I_{pH} = 0.1$

Si $4 \leq pH \leq 7$ entonces $I_{pH} = 0.02628419 * e^{(pH * 0.520025)}$

Si $7 < pH \leq 8$ entonces $I_{pH} = 1$

Si $8 < pH \leq 11$ entonces $I_{pH} = 1 * e^{((pH-8) * 0.5187742)}$

Si $pH > 11$ entonces $I_{pH} = 0.1$

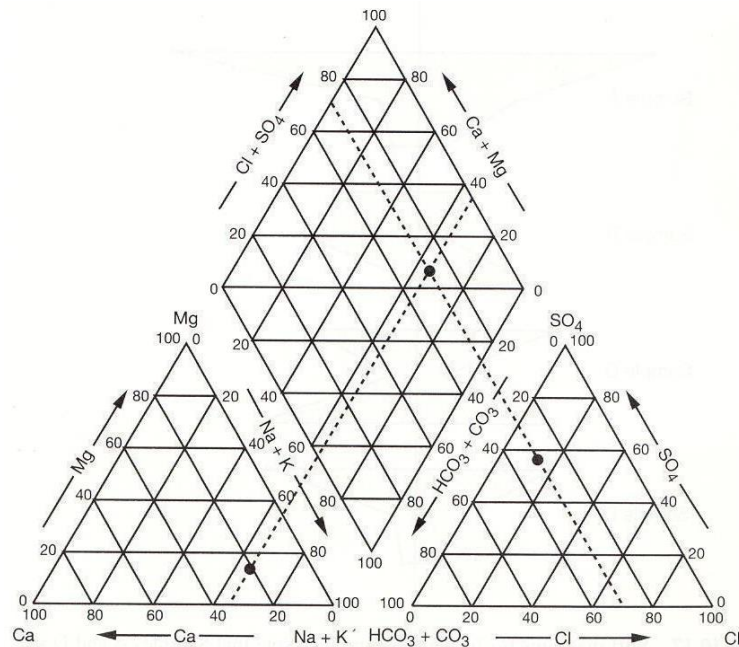
3.1.6.2 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es una herramienta efectiva en la segregación analítica de datos para un estudio con respecto a los orígenes de los constituyentes disueltos en aguas. Las características y tipo del agua se pueden ver modificadas, por las propiedades del suelo y sus aniones y cationes.

En este Diagrama se representa dos componentes (aniones y/o cationes) en forma simultánea, es triangular, y cada uno de los vértices de este triángulo equilátero

representa el 100% de la concentración de un elemento en meq/L y el 0% del elemento se sitúa en el vértice siguiente, según el sentido de las agujas del reloj. Los valores de la concentración de cada elemento se ubican trazando desde el punto del lado del triángulo que representa el porcentaje, una recta paralela al lado opuesto del vértice correspondiente al 100% del elemento que se considera. Solo es posible representar tres iones (tres iones o tres cationes) de cada análisis, pero es posible representar muchos análisis en el mismo gráfico como se muestra en la Figura 3.

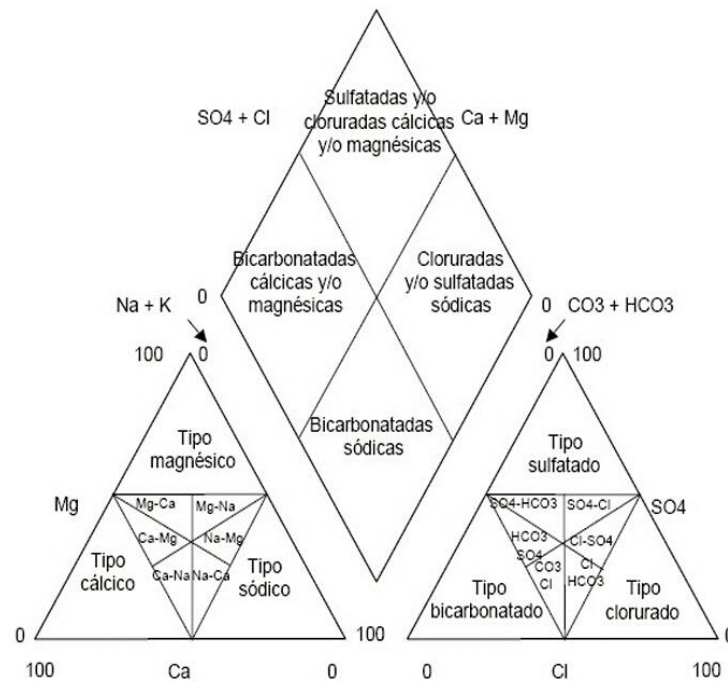
Figura 3. Diagrama de Piper



Fuente Tomado y modificado de Piper, 1944.

Las aguas químicamente semejantes están agrupadas y definen familias de aguas con características químicas semejantes en cuanto al contenido iónico y que pueden clasificarse por su ubicación en el diagrama como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Diagrama de Piper – Definición de los tipos de aguas.



Fuente Tomado y modificado de Piper, 1944.

La estructura del diagrama de Piper contiene dos triángulos y un rombo, de los cuales cada uno tiene su interpretación:

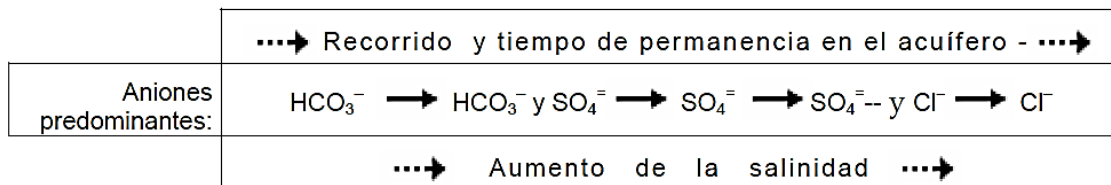
- Un triángulo para los cationes mayoritarios: ion calcio (Ca^{2+}) ion magnesio (Mg^{2+}) y la suma de los iones sodio y potasio ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido de las agujas del reloj.

- Un triángulo para los aniones mayoritarios: ion cloruro (Cl^-), ion sulfato (SO_4) y la suma de los iones carbonato y bicarbonato ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido antihorario.
- Un diagrama romboidal integrador en el que se representan la suma de los cationes ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) y ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) en un par de lados paralelos y complementarios, mientras en el otro par de lados se presenta la suma de aniones ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-$) y sus complementarios ($\text{SO}_4 + \text{Cl}^-$).

Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale al exterior en un río, manantial o captación, pueden transcurrir unos días, semanas o años, y el recorrido puede ser de unos metros o varios kilómetros. Por tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo.

A mayor tiempo de permanencia en el terreno mayor será la salinidad del agua. Aunque las reacciones y los procesos químicos que se desarrollan son muy variados, como norma general se observa, que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, después predomina el sulfato y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb (Figura 5).

Figura 5. Secuencia de Chevotareb.



Fuente Kehew, A.E., 2001. Applied Chemical Hidrogeology.

Esta secuencia se debe a la solubilidad y abundancia de las distintas sales en el subsuelo. El agua disuelve o altera los minerales que encuentra (si tiene tiempo suficiente para ello), hasta que se alcanza el tope marcado por la constante de equilibrio correspondiente, después de alcanzar este tope, ya no disolverá más ese mineral. Continuará disolviendo otros minerales con una constante más elevada, hasta que de nuevo se alcance el equilibrio y así sucesivamente. La solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que, a su vez, son menos solubles que los cloruros; por tanto, se alcanza primero el tope para los bicarbonatos, después para los sulfatos y finalmente para los cloruros. En cuanto a la abundancia, se refiere a la probabilidad que existe de que un agua encuentre minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. En general la disponibilidad de las distintas sales es así: siempre existe un aporte de bicarbonatos representado por el CO_2 del suelo, (cuando no existan sales carbonatadas, estará normalmente la calcita, que también es muy abundante), en segundo lugar, los yesos (sulfatos cálcicos) son relativamente frecuentes en series sedimentarias y finalmente las sales cloruradas son las menos abundantes.³

³ SÁNCHEZ., F. 2012. Evolución Geoquímica de las aguas subterráneas. Salamanca. España.

3.1.6.3 Balance Iónico - Diagrama de Stiff

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{+2} con el HCO_3^- y el Mg^{+2} con el SO_4^{-2} (a veces también se pueden mostrar otros dos iones, como el Fe^{+2} contra el NO_3). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L.

“Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado, permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica). Permite apreciar los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes y entre aniones de una muestra. También pueden representarse en un mapa, con lo que se visualiza rápidamente la variación espacial de la mineralización del agua en el acuífero”⁴.

3.1.6.4 Índice de Saturación Langelier

El Índice de Saturación de Langelier (LSI) es un modelo de equilibrio derivado del concepto teórico de saturación y proporciona un indicador del **grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio**. El nivel de saturación de Langelier usa el concepto de saturación basado en el pH como variable principal. El LSI puede ser interpretado como el cambio requerido para llevar el agua a equilibrio.

⁴ Custodio. E. Hidrología Subterránea. Madrid. 1983.

Cuando el agua posee un Índice de Saturación de Langelier (LSI) de 1.0 es una unidad por encima de la saturación, entonces reduciendo el pH por 1 unidad llevará el agua a equilibrio. Esto ocurre porque la porción de alcalinidad total presente como CO_3^{2-} disminuye con el pH, de acuerdo a las reacciones de equilibrio que describen la disociación del ácido carbónico:



- Si el LSI es negativo: No hay potencial de incrustaciones, el agua disolverá CaCO_3 .
- Si el LSI es positivo: Se pueden formar incrustaciones y puede ocurrir precipitación de CaCO_3 .
- Si LSI es cercano a cero: Línea Límite Potencial de Incrustación. Cambio en la Calidad del agua o la temperatura, o evaporación pueden cambiar este índice.

El LSI indica la fuerza impulsora para la formación de incrustaciones y crecimiento, en términos del pH como la variable maestra. A fin de calcular el LSI, es necesario conocer la alcalinidad (mg/l as CaCO_3), la dureza cálcica (mg/l Ca^{2+} as CaCO_3), los sólidos totales disueltos (mg/l STD), el pH actual, y la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$).

La fórmula para calcular el Índice de saturación de Langelier es:

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

Donde:

$$A = (\text{Log}_{10}[\text{STD}] - 1)/10$$

$$B = -13.12 \times \text{Log}_{10}(^{\circ}\text{C} + 273) + 34.55$$

$$C = \text{Log}_{10}[\text{Ca}^{2+}] - 0.4$$

$$D = \text{Log}_{10}[\text{alcalinidad}]$$

3.1.7 Comportamientos del flujo subterráneo

El flujo subterráneo se refiere a la dirección predominante del flujo de agua subterránea, para graficar estas direcciones se utilizó la información recopilada en el inventario de puntos de agua, donde se registró el nivel estático de cada uno de los puntos.

3.1.8 Zonas de recarga y descarga

El agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie. La renovación se produce lentamente cuando la comparamos con la de los depósitos superficiales, como los lagos, y los cursos de agua. En algunos casos la renovación está interrumpida por la impermeabilidad de las formaciones geológicas superiores o por circunstancias climáticas sobrevenidas de aridez.

La descarga, es una movilización de agua que se da de forma natural, donde el agua subterránea logra interceptar la superficie. Esto dependerá de la pendiente

(favorable al movimiento del agua), características físico-mecánicas de los materiales, así como de la ubicación de las principales corrientes de agua.

De acuerdo a la información obtenida se presenta un mapa de posibles zonas de recarga y descarga en el área de estudio.

3.1.9 Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación

La vulnerabilidad de la contaminación engloba las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero, a ser adversamente afectado por una carga contaminante; ésta establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración – percolación a través del suelo y la zona no saturada, esto según el término definido por Foster (1987).

Existen diferentes metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos estudiados se utilizó el método DRASTIC, este clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio. DRASTIC valora como parámetros: D (Profundidad del nivel piezométrico), R (Recarga), A (Litología del acuífero), S (Naturaleza del suelo), T (Pendiente), I (Naturaleza de la zona no saturada), y C (Permeabilidad).⁵

⁵ ALLER, L., 1987. Drastic: a estandarized system to evaluate grounwater pollution potntial using hydrogeologic settings. Columbus, Ohio.

A cada uno de los siete parámetros considerados para este método, se les asignó un valor en función de los diferentes tipos y rangos definidos desde la Tabla 7 a la Tabla 14. Además, al valor de cada parámetro se aplicó un índice de ponderación entre 1 – 5 que cuantifica la importancia relativa entre ellos, y que puede modificarse en función del contaminante.

El índice de vulnerabilidad se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{DRASTIC} = (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

Dónde:

r: Indica factor de clasificación o valoración.

w: Indica factor de ponderación.

D: Profundidad del agua subterránea

R: Recarga Neta

A: Litología del acuífero.

S: Tipo de suelo.

T: Topografía.

I: Naturaleza de la zona no saturada.

C: Conductividad hidráulica del acuífero.

Los valores que adoptan los factores de clasificación y de ponderación para cada parámetro se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 7. Clasificación de la Variable “D”, Profundidad del agua subterránea.

CLASIFICACION VARIABLE “D”	
Profundidad (m)	Valoración Dr
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
>30,5	1

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994.

Tabla 8. Clasificación de la Variable “R”, Recarga neta.

CLASIFICACION VARIABLE “R”	
Recarga (mm)	Valoración Rr
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994.

Tabla 9. Clasificación de la Variable “A”, Litología del acuífero.

CLASIFICACION VARIABLE “A”		
Litología	Valoración Ar	Valor típico Ar
Lutita Masiva	1 – 3	2
Metamórfica / Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica / Ígnea meteorizada	3 – 5	4

Till Glacial	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 - 10	10

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994.

Tabla 10. Clasificación de la Variable “S” Tipo de Suelos.

CLASIFICACION VARIABLE “S”	
Tipo de Suelo	Valoración Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol – cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994.

Tabla 11. Clasificación de la Variable "T", Topografía.

CLASIFICACION VARIABLE “T”	
Pendiente (%)	Valoración Tr
0 – 2	10
2 – 6	9

6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994.

Tabla 12. Clasificación de la Variable “I”, Naturaleza de la zona no saturada.

CLASIFICACION VARIABLE “I”		
Naturaleza de la zona no saturada	Valoración Ir	Valor típico Ir
Capa Confinante	1	1
Cieno – arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencia de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica / Ígnea	2 – 8	4
Grava y arena	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 - 10	10

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994.

Tabla 13. Clasificación de la Variable “C”, Conductividad Hidráulica del Acuífero.

CLASIFICACION VARIABLE “C”	
Conductividad hidráulica (m/día)	Valoración Cr
0,04 – 4,08	1
4,08 - 12,22	2
12,22 – 28,55	3
28,55 – 40,75	6
40,75 – 81,49	8

>81,49	10
--------	----

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994.

Tabla 14. Índice de Ponderación.

Parámetros	Índice de Ponderación (w)
Profundidad del nivel de agua	5
Recarga	4
Naturaleza del acuífero	3
Tipo de Suelo	2
Topografía	1
Impacto de la zona no saturada	5
Permeabilidad	3

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994

Luego de calcular el valor del índice, se hizo una valoración final de la vulnerabilidad del acuífero. En la Tabla 15, se indica el grado de vulnerabilidad en función del valor obtenido por el método DRASTIC.

Tabla 15. Grado de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación mediante el método de DRASTIC.

VULNERABILIDAD	
Grado de vulnerabilidad	Valor DRASTIC
Muy Bajo	23 – 64
Bajo	65 – 105
Moderado	106 – 146
Alto	147 – 187

Muy alto	188 - 230
----------	-----------

Fuente Aller et al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994

3.1.10 Modelo hidrogeológico

A partir de lo observado en campo y el análisis de información secundaria se caracterizó la geología e hidrogeología del área de estudio. Esta información permitió elaborar el modelo hidrogeológico conceptual.

El modelo hidrogeológico conceptual se construyó a partir de la información climatológica, geológica, hidrológica e hidrogeológica levantada para el área de estudio, definiendo así el tipo de acuífero, las unidades de interés hidrogeológico localizadas en los primeros niveles de las rocas de origen cuaternario, la estructura de dichas unidades, las direcciones de flujo a nivel local y la vulnerabilidad a la contaminación.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 ANTECEDENTES

Los estudios hidrogeológicos en Colombia se inician a partir de 1950 con el fin de plantear soluciones de abastecimiento de agua potable en algunas poblaciones del país. Durante esta primera década los principales trabajos hidrogeológicos se llevaron a cabo en los departamentos de Valle del Cauca, Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Huila, Córdoba y Antioquia. En los años 60, se continuó con este tipo de estudios en algunas poblaciones de los departamentos de Tolima, Bolívar, Santander y Caldas, así como otros complementarios en Boyacá y Valle del Cauca.⁶

En el año 1996, INGEOMINAS inició la elaboración del Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia que comprendió la compilación y análisis de información de los estudios hidrogeológicos ejecutados por el Instituto y la existente en otras entidades públicas y privadas. El Atlas tiene un cubrimiento aproximado del 30% de Colombia y presenta a nivel orientativo la potencialidad de unidades geológicas en cuanto a posibilidades de ocurrencia de aguas subterráneas, así como su localización y características hidrogeológicas, plasmadas en mapas temáticos del territorio nacional.

En el año 2014 el IDEAM⁷ publica el ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA que da a conocer el inventario nacional de puntos de aguas subterráneas, el cual informa que la distribución del agua subterránea en Colombia y las necesidades de cada región

⁶ Programa de Exploración de Aguas Subterráneas en Colombia – INGEOMINAS, 2004

⁷ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

para el desarrollo social y económico según su uso, ha estimulado la formulación y elaboración de estudios locales y regionales a cargo de autoridades ambientales y entidades del orden nacional (Servicio Geológico Colombiano, IDEAM, ministerios, entre otros) para la construcción de modelos hidrogeológicos conceptuales que permiten tener un mayor conocimiento de las aguas subterráneas. En el área de estudio a la fecha no se han desarrollado estudios hidrogeológicos completos que expongan el comportamiento real de los acuíferos.

Respecto a la información existente utilizada durante el desarrollo del trabajo se obtuvo un informe de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizado en el área en el año 2016 y se utilizaron también informes de muestreo fisicoquímico y bacteriológico de aguas subterráneas realizados en los años 2016 y 2017; todos los anteriores proporcionados por la entidad interesada en los resultados del proyecto.

4.2 MARCO TEORICO

4.2.1 Ciclo hidrogeológico

“El ciclo hidrológico de la Tierra es el mecanismo global que hace posible la transferencia de agua desde los océanos a la superficie y desde la superficie, o subsuperficie al subsuelo y a la atmósfera que envuelve nuestro planeta. Las principales variables naturales de los procesos del ciclo hidrológico son: precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración (Figura 6). Las actividades humanas (asentamientos, industria y desarrollos agrícolas) pueden alterar los componentes del ciclo natural mediante afectaciones del uso del suelo,

por medio de la utilización, reutilización y vertido de residuos en los recorridos naturales de los recursos hídricos superficiales y subterráneos”⁸.

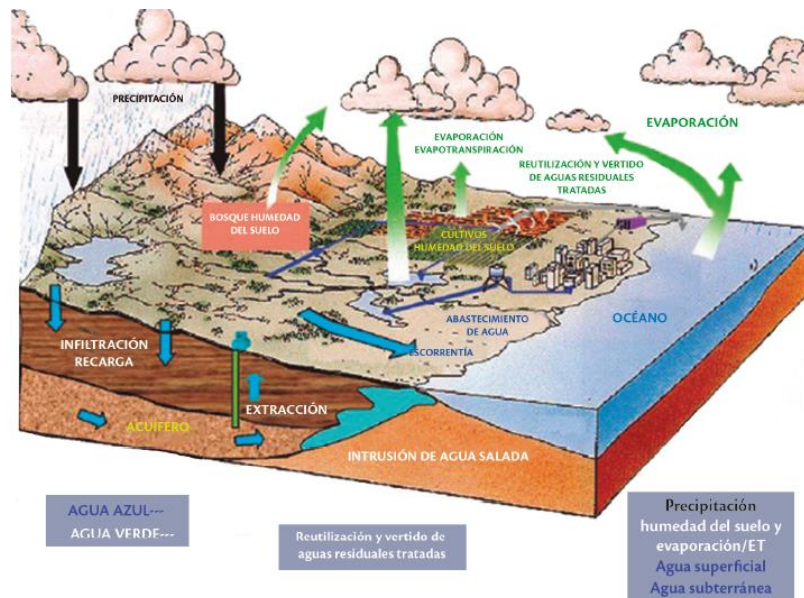
El agua subterránea tiene su origen en la lluvia, parte de la cual se infiltra directamente a través del suelo, o desde ríos y lagos, por grietas y poros de las unidades roca-sedimento, hasta alcanzar un nivel impermeable que no la deja descender más.

“En el subsuelo se encuentran formaciones geológicas consistentes en unidades de roca-sedimento porosas (arenas, gravas, etc.), o fracturadas (calizas, areniscas, lavas, etc.) las cuales pueden contener agua en sus intersticios. Esta agua se denomina agua subterránea y los terrenos que la contienen y la pueden ceder se denominan acuíferos. Estos acuíferos pueden tener extensiones laterales de cientos a millones de metros constituyendo acuíferos locales en el primer caso y regionales en el segundo”⁹.

⁸ UNESCO, 2006. El agua, una responsabilidad compartida. 2 Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo.

⁹Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE). Manual de Taludes. 1987.

Figura 6. Ciclo Hidrológico



Fuente IDEAM, 2015. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia.

“El sol, que dirige el ciclo del agua, calienta el agua de los océanos, la cual se evapora hacia el aire como vapor de agua. Corrientes ascendentes de aire llevan el vapor a las capas superiores de la atmósfera, donde la menor temperatura causa que el vapor de agua se condense y forme nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes sobre el globo, las partículas de nube colisionan, crecen y caen en forma de precipitación. Parte de esta precipitación cae en forma de nieve, y se acumula en capas de hielo y en los glaciares, los cuales pueden almacenar agua congelada por millones de años. En los climas más cálidos, la nieve acumulada se funde y derrite cuando llega la primavera. La nieve derretida corre sobre la superficie del terreno como agua de deshielo y a veces provoca inundaciones. La mayor parte de la precipitación cae en los océanos o sobre la tierra, donde, debido a la gravedad,

corre sobre la superficie como escorrentía superficial. Una parte de esta escorrentía alcanza los ríos en las depresiones del terreno; en la corriente de los ríos el agua se transporta de vuelta a los océanos. El agua de escorrentía y el agua subterránea que brota hacia la superficie, se acumula y almacena en los lagos de agua dulce. No toda el agua de lluvia fluye hacia los ríos, una gran parte de esta es absorbida por el suelo como infiltración. Parte de esta agua permanece en las capas superiores del suelo, y vuelve a los cuerpos de agua y a los océanos como descarga de agua subterránea. Otra parte del agua subterránea encuentra aperturas en la superficie terrestre y emerge como manantiales de agua dulce. El agua subterránea que se encuentra a poca profundidad, es tomada por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas, regresando a la atmósfera. Otra parte del agua infiltrada alcanza las capas más profundas del suelo y recarga los acuíferos, los cuales almacenan grandes cantidades de agua dulce por largos periodos de tiempo. A lo largo del tiempo, esta agua continua moviéndose, parte de ella retornará a los océanos, donde el ciclo del agua se “cierra” y vuelve a comenzar”¹⁰.

4.2.2 Geología

El área de estudio está localizada sobre un gran depósito cuaternario de origen aluvial que conforma la extensa llanura característica de la Cuenca de los Llanos Orientales, la cual está disectada por los caños Casimena, Cururupá, Guariamena, entre otros menores, y por cauces principales tales como los ríos Meta y Cusiana. Esta llanura suprayace discordantemente una espesa secuencia de rocas de origen sedimentario de edad Jurásico a Neógeno, entre las cuales, las formaciones Carbonera (unidades arenosas), Guadalupe y Gachetá, constituyen las rocas de

¹⁰ Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El ciclo del agua: The water cycle. 2016.

interés por su potencial de almacenamiento y transmisividad de fluidos (hidrocarburos y agua).

4.2.2.1 Geología Regional

A nivel regional, el Área de Estudio está localizada en la llamada Cuenca de los Llanos Orientales, que posee una espesa secuencia de rocas sedimentarias con edades que varían entre el Jurásico y el Neógeno y una historia compleja de periodos sucesivos de depósito de sedimentos que evolucionaron de un ambiente marino a uno continental, con litificación de sedimentos; deformación, fracturamiento y erosión de las rocas (ANH, 2012). Durante el periodo Cuaternario (Pleistoceno – Holoceno) se produjo una gran acumulación de sedimentos provenientes de la Cordillera Oriental, producto de la intensa actividad erosiva y de transporte fluvio-torrencial generada por procesos de desglaciación, que dio origen a los grandes depósitos cuaternarios que cubren actualmente las extensas llanuras aluviales del departamento del Casanare y parte del Meta.

La actividad tectónica durante el Cuaternario (Pleistoceno – Holoceno), aunque muy baja, continuó configurando la morfología de la superficie de la cuenca, de tal manera que los grandes depósitos fluvio – torrenciales y aluviales que llegaban incluso hasta la actual Plataforma del Vichada, fueron delimitados por la aparición de la Falla del Meta, que controla el Cauce actual del Río Meta y levanta la Plataforma del Vichada entre 50 y 70 metros con relación al Bloque Casanare (IDEAM, 2010). Dicha actividad tectónica reciente, que para la Cuenca de los Llanos Orientales es muy leve, está relacionada con los procesos de deformación tectónica ocasionados por la interacción entre el Cratón Suramericano y las Placas Nazca y Caribe (Taboada et al., 1998). Por lo anterior, se puede decir que los eventos más relevantes que dieron origen a la configuración actual de la cuenca (en profundidad

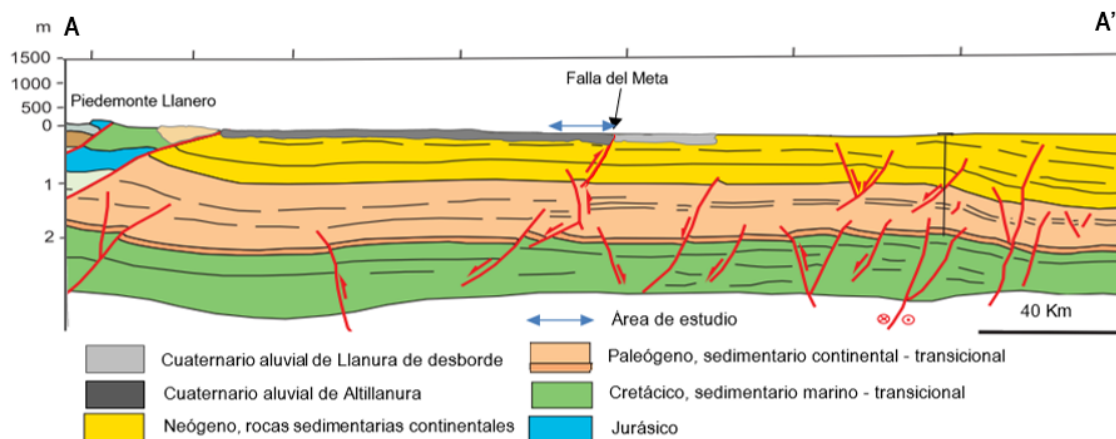
y en superficie) son el levantamiento tectónico de la Cordillera Oriental que inició en el Mioceno Tardío y el fin del último periodo glacial (hace 10.000 años; límite Pleistoceno- Holoceno).

“La Cuenca de los Llanos Orientales limita por el Noroeste con el Piedemonte Llanero y la Cordillera Oriental (separados por el Sistema de Fallas de Guaicáramo y el Sistema de Fallas Casanare – Yopal); al Suroriente por el Escudo de Guyana (Complejo Migmatítico de Mitú). Se diferencian dos grandes dominios estructurales dentro de la Cuenca delimitados por la Falla del Río Meta. Al Norte, un gran monoclinal que buza suavemente hacia el SE, afectado principalmente por un conjunto de fallas normales antitéticas de dirección N – S y E - NE – W - SW y cubierto por grandes depósitos aluviales del Cuaternario (Bloque Casanare). Al sur, un monoclinal que buza hacia el Este con una baja deformación estructural, y una espesa secuencia de rocas del Pleistoceno (Cuaternario) y del Neógeno (Plataforma del Vichada)”¹¹.

En la Figura 7 se presenta un perfil esquemático de la distribución de depósitos recientes, unidades de roca y fallas en profundidad dentro de esta cuenca.

¹¹ Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2012. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. Bogotá.

Figura 7. Perfil geológico esquemático Cuenca de los Llanos Orientales



Fuente Barrero, 2007. Adaptado de la fuente original.

4.2.2.1.1 Estratigrafía

Durante la fase de perforaciones exploratorias en algunos bloques petroleros localizados en cercanías al área de estudio se obtuvo información de la secuencia litoestratigráfica que subyace los depósitos cuaternarios que cubren de manera total la superficie del área de estudio.

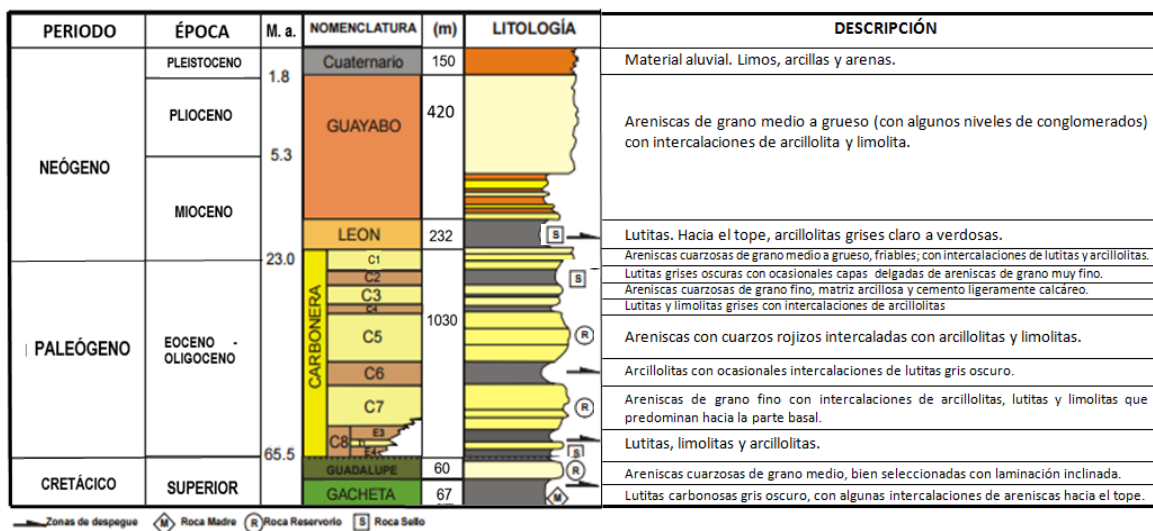
En la Tabla 16 se presenta la secuencia litoestratigráfica del área de estudio y en la Figura 8 se presenta su distribución gráfica.

Tabla 16. Unidades y espesores unidades geológicas que componen la columna Litoestratigráfica en el área de estudio.

Unidad Litológica	Espesor de la unidad	
	m	ft
Cuaternario aluvial	150	492.13
Formación Guayabo	1030	3379.27
Formación León	232	761.15
Fm. Carbonera – Miembro C1	75	246.06
Fm. Carbonera – Miembro C2	43	141.08
Fm. Carbonera – Miembro C3	44	144.36
Fm. Carbonera – Miembro C4	41	134.51
Fm. Carbonera – Miembro C5	60	196.85
Fm. Carbonera – Miembro C6	34	111.55
Fm. Carbonera – Miembro C7	99	324.80
Fm. Carbonera – Miembro C8	24	78.74
Formación Guadalupe	60	196.85
Formación Gachetá	67	219.82

Fuente DCX S.A.S., 2018.

Figura 8. Columna Litoestratigráfica descriptiva del área de estudio.



Fuente DCX S.A.S., 2018 Adaptado de la fuente original.

A continuación, se llevará a cabo una descripción breve, de las características más importantes de cada una de las unidades presentes en la columna estratigráfica para el área de estudio.

- Cretácico
 - Formación Gachetá

Está conformada por lutitas grises oscuras a negras con intercalaciones de areniscas de grano fino, con contenido de materia orgánica en el tope. Ocasionalmente se presentan lentes de arenas cuarzosas de grano fino a medio. Esta formación fue depositada en un medio anóxico marino. Su ambiente de formación es definido, como de llanura mareal, o planicie deltaica, donde el factor marino controló gran parte de esta depositación. Espesor reportado: 67 metros. Ambiente de sedimentación: Marino.

- Formación Guadalupe

Areniscas cuarzosas masivas, de grano medio a grueso subredondeado, buena selección y cemento silíceo; con intercalaciones menores de lutitas y algunas capas de limolita con trazas de glauconita. Espesor reportado: 60 metros. Ambiente de sedimentación: Canales de estuarios.

- Formación Carbonera

Secuencia de areniscas cuarzosas de grano fino a medio intercaladas con lutitas, limolitas y arcillolitas. Espesor reportado: 1030 metros. Ambiente de sedimentación: Transicional continental. Para esta formación se conocen ocho miembros que informalmente se han denominado C1 a C8, de techo a base; correspondiendo las

unidades impares con areniscas cuarzosas y las unidades pares con lutitas, limolitas y arcillolitas: es decir los intervalos C1, C3, C5, y C7, en general, son predominantemente arenosos, y los intervalos C2, C4, C6 y C8 en general son predominantemente arcillosos. Hacia la base y tope de la formación se pueden encontrar intercalaciones de capas de carbón.

- Neógeno
 - Formación León

Lutitas grises y arcillolitas limosas. Es un marcador regional por su continuidad y extensión en toda la cuenca de los Llanos Orientales. Es considerada como roca sello. Posee un espesor de 232m en el área, su ambiente de formación fue marino lagunar con influencia deltaica.

- Formación Guayabo

Areniscas de grano medio a grueso (con algunas intercalaciones de conglomerados) que predominan en el segmento superior, con intercalaciones de arcillolitas y limolitas en los niveles medio e inferior. En el área posee un espesor de 420m.

- Cuaternario

Son los depósitos más recientes dentro del área, su ambiente formacional es netamente fluvial, y en el área de estudio cuentan con un espesor de aproximadamente 150m.

- Cuaternario Terraza Planicie Aluvial

Presenta un relieve casi horizontal; se ha formado por los grandes depósitos acumulados por los desbordes de los ríos que drenan la llanura. Estos depósitos están constituidos, en la llanura, por limo, arcilla y clastos pequeños irregulares de areniscas de grano fino oxidadas. En algunos sectores están suprayacidas por depósitos coluvio aluviales.¹²

- Cuaternario dunas

Caracterizadas por granulometría de arena fina bien seleccionada y colores amarillo – ocre por oxidación¹³

- Cuaternario aluvial

Son depósitos acumulados en las márgenes divagantes de los principales ríos y caños. En la región de llanura, están constituidos por sedimentos finos (limo, arcilla y ocasionalmente arena).

En el río Meta, se forman grandes y gruesas barras laterales, longitudinales y transversales de arenas de grano fino y matriz lodo - arcillosas, con estratificación inclinada de muy bajo ángulo, de color gris a marrón claro¹⁴.

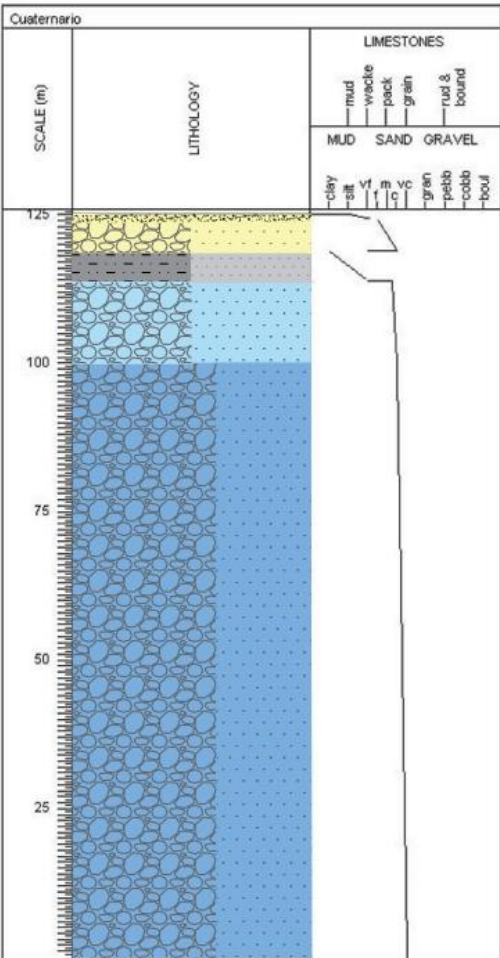
En la Figura 9 se presenta una columna estratigráfica descriptiva del cuaternario en el área de estudio; esta se construyó a partir del perfil geoelectrico obtenido a partir de los Sondeos Eléctricos Verticales presentado en la Figura 14.

¹² INGEOMINAS., UIS., 2010

¹³ Ibid

¹⁴ Ibid

Figura 9. Columna descriptiva del cuaternario en el área de estudio.



5 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

5.1 CLIMA

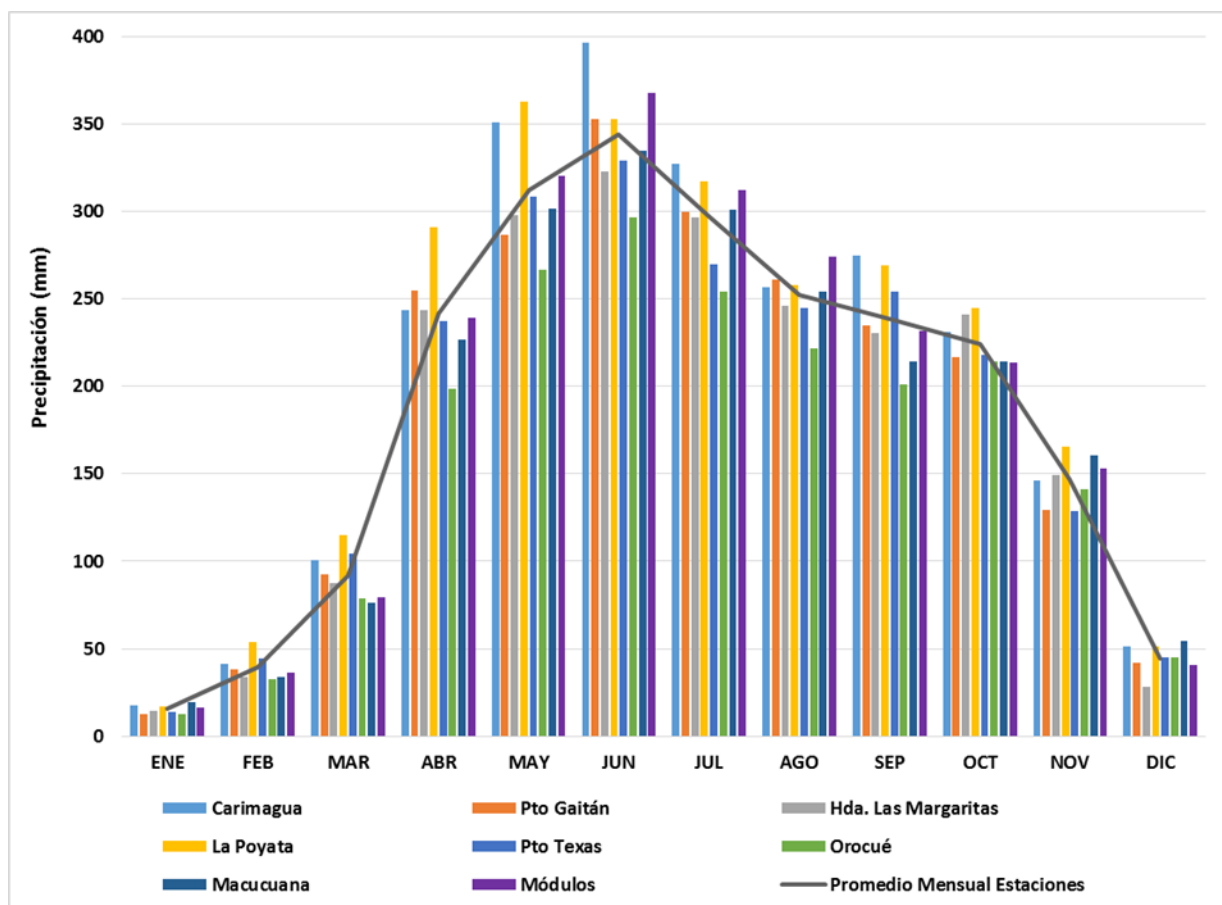
El clima en los llanos orientales se clasifica como Clima de Bosque Húmedo Tropical. La zona de estudio se caracteriza por el clima cálido y húmedo, en donde se mantienen valores de humedad superiores al 80% a lo largo del año. Las temperaturas son las propias de zonas tropicales, con una temperatura media mensual de 26.61°C y baja variabilidad estacional.

Respecto a las precipitaciones, el área de estudio presenta un régimen monomodal, con un periodo de lluvias en los meses de abril a octubre y un periodo seco entre noviembre a marzo. “El periodo en el que se registra mayor precipitación es en los meses de mayo a junio. El mes con menor precipitación es enero. Los meses de marzo a abril se pueden considerar como meses de transición entre el tiempo seco y el tiempo húmedo y los meses de octubre a noviembre como meses de transición del tiempo húmedo al tiempo seco”¹⁵.

En la Figura 10 se presenta un la precipitación media mensual multianual de algunas estaciones meteorológicas ubicadas en cercanías al área de estudio. En esta figura se puede observar que los meses con mayor precipitación son como se mencionó anteriormente los meses de abril a octubre.

¹⁵ DCX S.A.S., 2018. Estudio de Impacto Ambiental del Área de Explotación Morichito. Bogotá.

Figura 10. Precipitación media mensual multianual.



Fuente DCX S.A.S., 2018.

5.2 HIDROLOGÍA

En el Área de Estudio, se distinguen cinco (5) cuerpos de agua superficial principales: Río Meta, Río Cusiana, Caño Casimena, Caño Guariamena y Caño Cururupa.

5.2.1 Río Meta

El río Meta nace en la cordillera oriental, y en la primera parte de su recorrido se conoce con el nombre del Río Metica, conformado por el caño Camoa y el Río Guamal; al recibir el río Humea se le llama Río Meta, y tiene una longitud aproximada de 804 Km.

Debido a su amplitud forma islas de gran tamaño, tiende a desbordarse con facilidad debido a que sus orillas están libres de árboles. El río Meta divide los llanos de Colombia en dos regiones diferentes: la parte occidental (el piedemonte andino) es más húmeda y el río se desborda (sólo en su ribera izquierda, es decir, en dicha parte occidental) en la estación lluviosa y recibe los sedimentos de la cordillera andina, relativamente ricos en nutrientes y, por tanto, sus suelos y sus afluentes son también ricos en nutrientes. La parte oriental, de llano alto o altillanura, tiene una larga estación seca y sus suelos y las aguas superficiales son pobres en nutrientes

5.2.2 Río Cusiana

El río Cusiana nace en la Cordillera Oriental, en el departamento de Boyacá. Discurre desde el Cerro Negro, al Este de la Laguna de Tota, entre los páramos de Los Curies y Ogonta, a unos 3800 m.s.n.m. En 46 km desciende desde la cabecera hasta los 800 m.s.n.m. a su paso por la localidad de Pajarito.

El río Cusiana entra en el Llano tras recibir las aguas del Río Caja, a la altura de la localidad de Tauramena, en la que el río ya ha adquirido una morfología de cauce ancho, trenzado, con barras de depositación y abundantes canales móviles. Desde Tauramena el Cusiana sigue su descenso en trenzado más o menos rectilíneo con

anchuras medias entorno a los 500 m, tras recibir las aguas del río Chitamena la morfología fluvial cambia, adquiriendo una forma meándrica acusada hasta su desembocadura en el río Meta.

En las proximidades del área en estudio, el río Cusiana discurre con un trazado muy sinuoso, que ha producido zonas de extrangulamiento que han dado lugar a la aparición de madre viejas en la zona de divagación del cauce.

5.2.3 Caño Guariamena

El caño Guarimena nace en el suroeste del municipio de Yopal, conformándose como un difluente del río Charte, en zonas de divergencia de éste, en la que se presentan multitud de madre viejas del Charte, esteros y bajos inundables.

Dentro del área de estudio, el caño Guariamena recibe las aguas del caño Cururupá, conformado a su vez por la confluencia de la cañada Cururupá y la cañada de Morichito.

El caño Guariamena en el Área de Estudio, presenta zonas de cultivo de palma y pastos limpios dedicados a ganadería, susceptibles a inundación por encharcamiento y desborde lento de los principales cuerpos de agua.

5.2.4 Caño Casimena

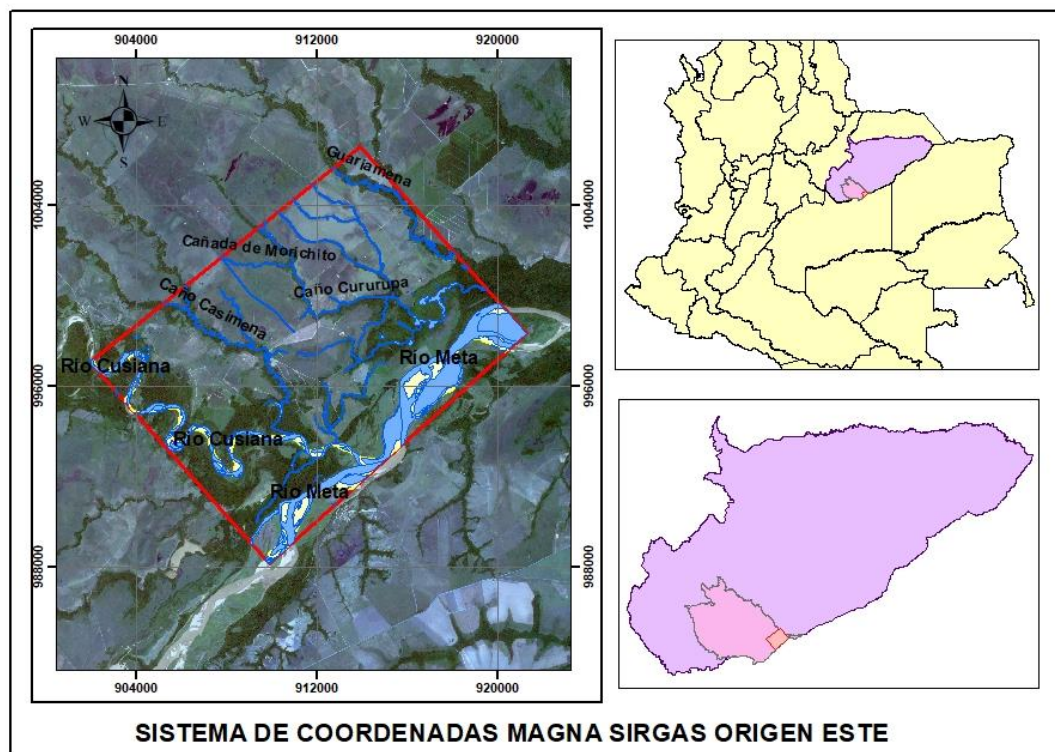
El caño Casimena nace al oeste del Estero de Matepalma, en el municipio de Maní, en terrenos dedicados a cultivos de Palma y arroz, y de llanuras inundables; drena en sentido noroeste a sureste, recibiendo las aguas de su principal afluente, el caño Tejemena, que nace más al norte que el propio caño Casimena, y que, hasta su confluencia con éste, presenta la mayor área aferente de la cuenca.

Tras recibir las aguas del Tejemena, el Casimena entra en el Área de Estudio, el cual atraviesa en su extremo suroccidental, para desembocar aguas abajo en el río Cusiana. La cuenca del Caño Casimena es alargada, de relieve muy plano, en el que los cauces son sinuosos y presentan un patrón de drenaje paralelo a subparalelo en cuanto a los principales cauces (Casimena y Tejemena), con patrones reticulares localmente en zonas inundables y de encharcamientos prolongados. La cobertura del suelo corresponde a plantaciones de arroz y de palma de aceite, herbazales densos sin arbolado y herbazales inundables, así como pastos ganaderos.

5.2.5 Caño Cururupá

El cauce principal atraviesa el extremo suroccidental del Área de Estudio y desemboca aguas abajo en el río Cusiana, muy próximo a la desembocadura del caño Casimena en el mismo río Cusiana.

Figura 11. Cuerpos de agua.



5.3 ESTUDIO GEOELÉCTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

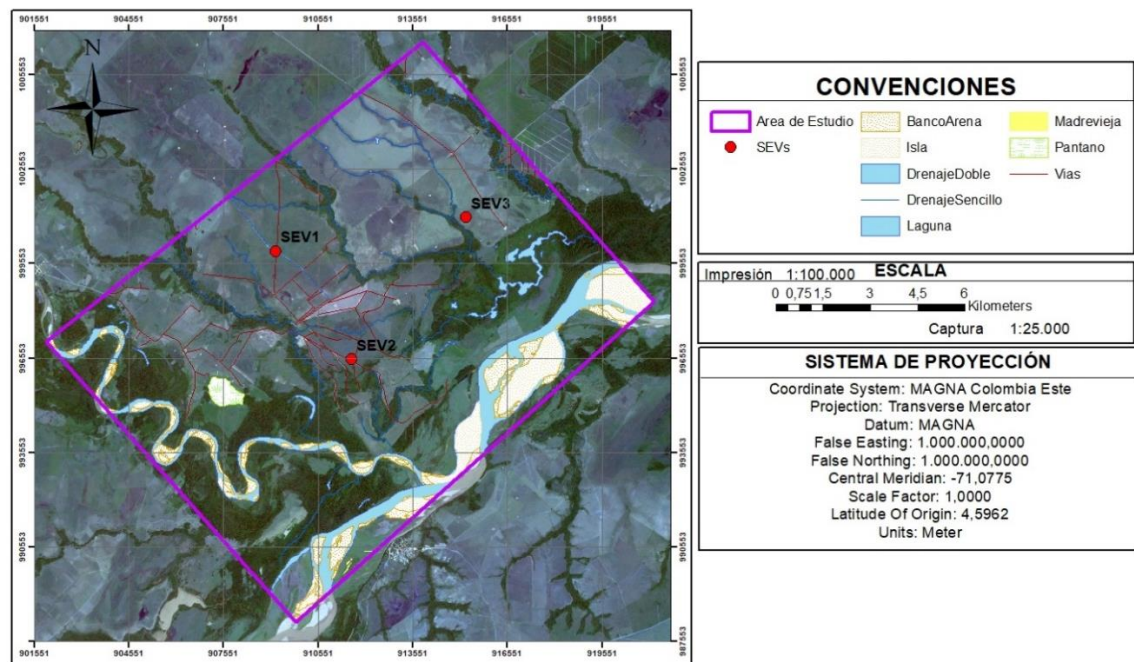
La prospección realizada en el estudio anteriormente mencionado se llevó a cabo mediante siete (7) sondeos eléctricos verticales, en la Tabla 17 se aprecia la información de estos. De estos siete (7) sondeos, tres (3) se encuentran dentro del municipio de Maní en el área de estudio del proyecto de grado, estos son los SEV 1, 2 y 3 (Figura 12).

Tabla 17. Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales.

No. Sondeo	Pedio	Municipio	Este	Norte
SEV 1	El Medano	Maní	909206	999934
SEV 2	El Medano	Maní	911609	996502
SEV 3	Bello Horizonte	Maní	915245	1001004
SEV 4	La Cachera	Orocué	917413	1006784
SEV 5	Tolemaida	Orocué	921583	1014362
SEV 6	La Magdalena	Orocué	928619	1010176
SEV 7	MareMare	Orocué	936974	1005396

Fuente: Bonilla, 2016.

Figura 12. Sondeos Eléctricos Verticales.



Como resultado de los SEV en el estudio geoelectrico se determinó la existencia de cinco (5) capas geoelectricas en el área, la cuales se describen a continuación y se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18. Unidades Geoelectricas para el área de estudio.

Litología	Unidad Geoelectrica	Espesor(m)	Resistividad (ohm.m)
Gravas y arenas meteorizadas	Unidad 1	0,6 – 1,2	128 – 1212
Gravas y arenas secas	Unidad 2	2,6 - 18	87 - 724
Gravas y arenas semisaturadas intercaladas con arcillas.	Unidad 3	10 – 58	45 - 1256
Gravas y arenas saturadas.	Unidad 4	62 - 119	62 - 119
Areniscas saturadas	Unidad 5		11 - 76

Fuente Bonilla, 2016.

Unidad Geoelectrica 1: Es la unidad de resistividad más superficial; se caracteriza por presentar una geometría irregular, subhorizontal, con un rango alto de resistividad entre 128 y 1212 Ohm-m y espesores entre 0.6 y 1.2 m. Estos valores de resistividad son correlacionables a los estratos del depósito aluvial, representado por gravas y arenas meteorizadas.

Unidad Geoelectrica 2: Infrayace la unidad 1, presenta una geometría tabular, presenta un rango intermedio de resistividad entre 87 y 724 Ohm-m y espesores entre 2,6 y 18 m. Estos valores de resistividad son correlacionables con los estratos del depósito aluvial, representado por gravas y arenas secas.

Unidad Geoeléctrica 3: se ubica bajo la unidad 2. Presenta un rango intermedio a alto de resistividad entre 45 y 1256 Ohm-m y espesores entre 10 y 58 m. Estos valores de resistividad son correlacionables a los estratos del depósito aluvial, representado por gravas y arenas semisaturadas intercaladas con arcillas.

Unidad Geoeléctrica 4: Infrayace la unidad 3, presenta una geometría tabular, con valores intermedios a altos de resistividad. Estos valores de resistividad presentan rangos entre 18 y 272 Ohm-m y espesores entre 62 y 119 m. Esta capa es correlacionable a los estratos del depósito aluvial, representado por gravas y arenas saturadas.

Unidad Geoeléctrica 5: Infrayace la unidad 4, presenta una geometría tabular, con valores intermedios de resistividad. Estos valores de resistividad presentan rangos entre 11 y 76 Ohm-m y espesores no determinados por ningún sondeo. Esta capa es correlacionable a los estratos de la formación Guayabo (Tmg), los cuales se correlacionan con Areniscas saturadas.

5.3.1.1 Distribución de las Unidades Geoeléctricas

De acuerdo a la información presentada en el estudio de los resultados de cada sondeo geoelectrico se construyó un perfil geoelectrico con los sondeos que se realizaron dentro del área de estudio. Perfil 2 – 1 – 3.

El perfil 2 – 1 - 3, corresponde a los puntos 1, 2 y 3, los cuales se encuentran separados por una distancia total de 10,3 Km. En este perfil se puede observar el acuífero formado por la Formación Guayabo, configurado por areniscas saturadas,

con resistividades que oscilan entre 11 y 76 ohm – m. Se identificaron también dos niveles acuíferos en los Depósitos Cuaternarios, el primero conformado por gravas y arenas saturadas con resistividades que oscilan entre 62 y 119 ohm – m, este horizonte suprayace a la Formación Guayabo y se encuentra inclinado en sentido NE – SW, tiene un espesor de entre 60 y 100 m, acuñándose hacia el SW del área, a pesar de que este espesor varia, el nivel cuenta con continuidad lateral a lo largo del perfil, el segundo nivel acuífero, suprayacente al anterior, está conformado por arenas y gravas semisaturadas con resistividades que oscilan entre los 45 y 1256 ohm – m. En la Figura 13 se aprecia la localización del perfil geoelectrico y en la Figura 14 se presenta la distribución de las capas que conforman el perfil trazado.

Figura 13. Localización del perfil obtenido de sondeos geoelectricos

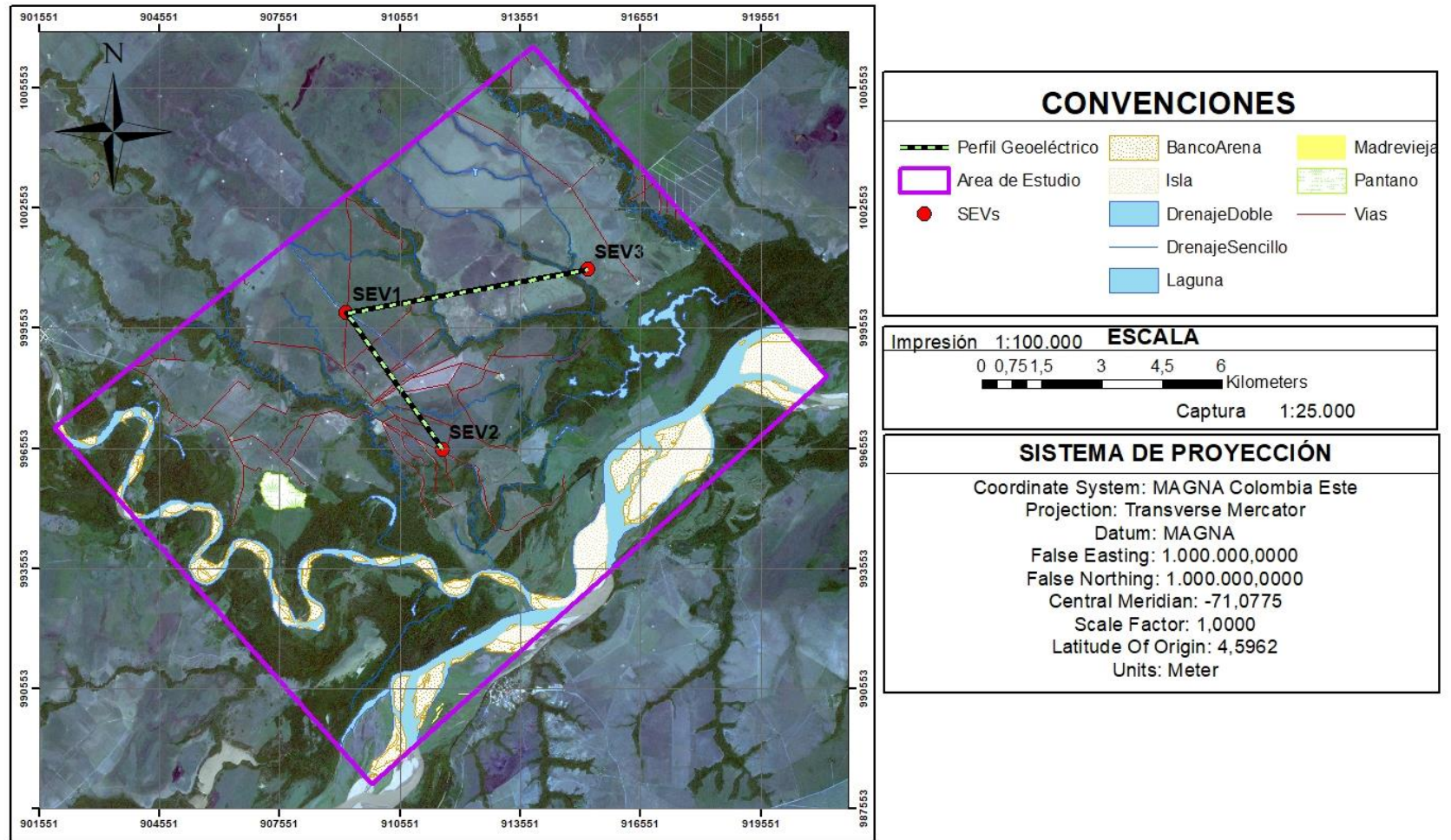
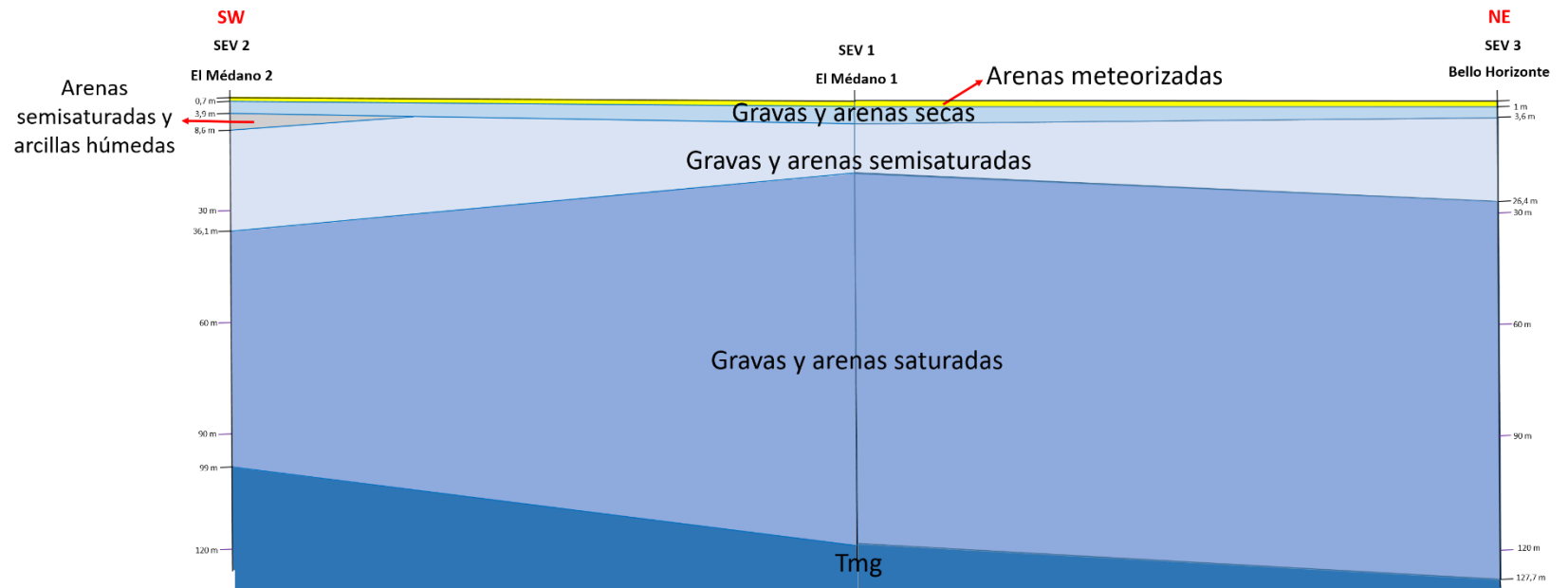


Figura 14. Perfil obtenido de sondeos geoelectricos



5.4 GEOLOGÍA LOCAL

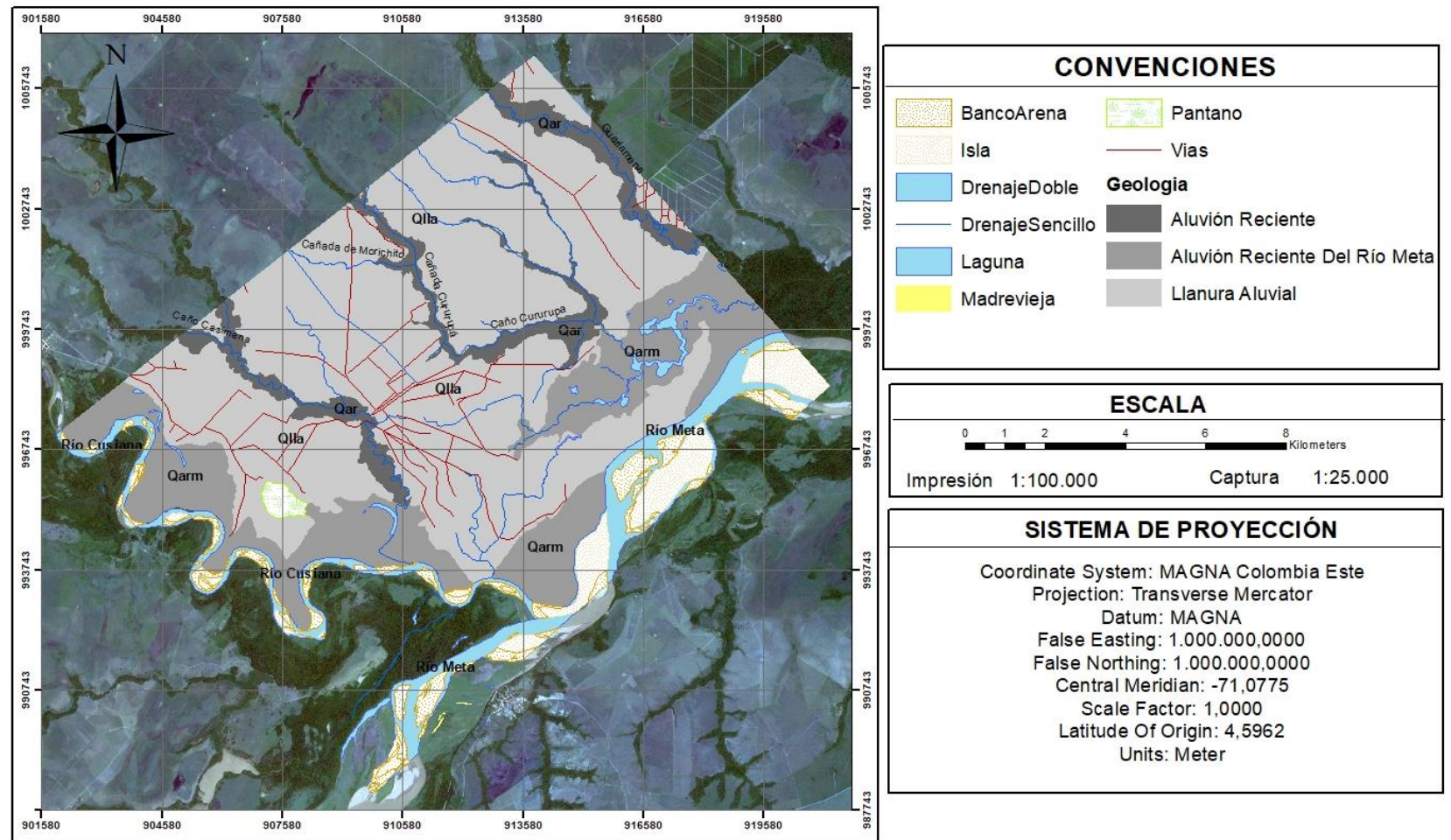
A partir de la descripción regional del área, la cual se ubica en los Llanos Orientales, se procedió a realizar una caracterización local, en la que se exponen las unidades específicas aflorantes. Estas unidades están conformadas por material de origen aluvial, los cuales logran cubrir en su totalidad el área de estudio.

En la Tabla 19 se describen las unidades delimitadas y en la Figura 15 se aprecia su distribución espacial dentro del área de estudio.

Tabla 19. Unidades geológicas delimitadas para el Área de estudio

Unidades Geológicas			
Era	Periodo	Nombre	Litología
CENOZOICO	CUATERNARIO	Depósito Aluvial Reciente Qar	Arcillas y arenas grano fino
		Depósito de Llanura Aluvial Qlla	Arcillas y limos grises con lateritas ferruginosas
		Depósito Aluvial de los ríos Meta y Cusiana Qarmc	Arcillas plásticas abigarradas

Figura 15. Distribución espacial de las Unidades Geológicas aflorantes en el área de estudio.



5.4.1 Depósito Aluvial de los Ríos Meta y Cusiana (Qarmc)

En este grupo se incluyen aquellos depósitos formados por la dinámica del cauce de los ríos Meta y Cusiana (cerca de su desembocadura en el Río Meta), que se modifican de manera permanente por los procesos de inundación estacionales. Aparecen como terrazas aluviales muy bajas que permanecen inundadas y con vegetación abundante, como se visualiza en la Fotografía 1; también se observan algunos meandros abandonados (Madreviejas). Según lo observado en campo, estos depósitos están conformados por arcillas plásticas abigarradas (ver Fotografía 2).



Fotografía 1 Terraza aluvial del Río Meta - Qarmc. Sector Finca el Médano.



Fotografía 2 Suelo arcilloso en la unidad Qarmc. Sector Finca El Médano.

Estas corrientes principales, son las que movilizan un mayor volumen de agua y material durante la época de lluvia, logrando sedimentar y erosionar material en sus bordes. Esto dependerá directamente de su morfología y la de sus meandros. Por la baja pendiente y su configuración litológica (predominio de materiales finos como

limos y arcillas), los meandros estrangulados o madres viejas logran retener agua parte del año.

5.4.2 Depósito de Llanura Aluvial (Qlla)

Es la unidad más antigua que aparece como una gran sabana inundable en la mayoría del área de estudio, donde está conformada por una espesa secuencia de arcillas grises sin consolidar, de unos 150 metros de espesor (DCX, 2016), de las cuales se pudieron observar algunos afloramientos de máximo 3 metros de espesor, donde aparecen altamente meteorizadas (ver Fotografía 3). Se detectaron en esta secuencia algunos niveles de lateritas ferruginosas con espesores que varían de algunos centímetros a 3 o 4 metros, se trata de fragmentos de minerales de hidróxidos y óxidos de hierro, con algo de sílice y alúmina, tamaño grava. En la zona, estos niveles de lateritas se conocen como “ripio”, que ha sido utilizado ocasionalmente como material de relleno de vías. En la Fotografía 4, se aprecia una visual general de la morfología del terreno, en la que afloran este tipo de depósitos. (ver también Fotografía 5)



Fotografía 3 Suelos lateríticos ferruginosos en Qlla. Caño sin nombre. Sector Buenavista.



Fotografía 4 Morfología del Depósito de Llanura Aluvial (Qlla). Cerca del cauce del Caño Cururupá.



Fotografía 5 Extracción ocasional de “ripio”. Sector Finca Manare, cerca del cauce del Río Meta..

5.4.3 Depósito Aluvial Reciente “Qar”

Esta unidad incluye los depósitos dejados por la dinámica del cauce actual de las diferentes quebradas que cruzan el área, tal y como los caños Casimena, Cururupá

y Guariamena. Estos depósitos están conformados por arcillas, limos y arenas acumulados en pequeñas barras y terrazas que bordean el cauce de dichos cuerpos de agua.

En el Caño Casimena se observan pequeñas barras y terrazas de composición limo-arcillosa, con presencia de algunas capas delgadas de lateritas ferruginosas tal y como se aprecia en la Fotografía 6.



Fotografía 6 Barras y terrazas. Cauce Caño Casimena. Sector Finca El Paraíso.

5.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

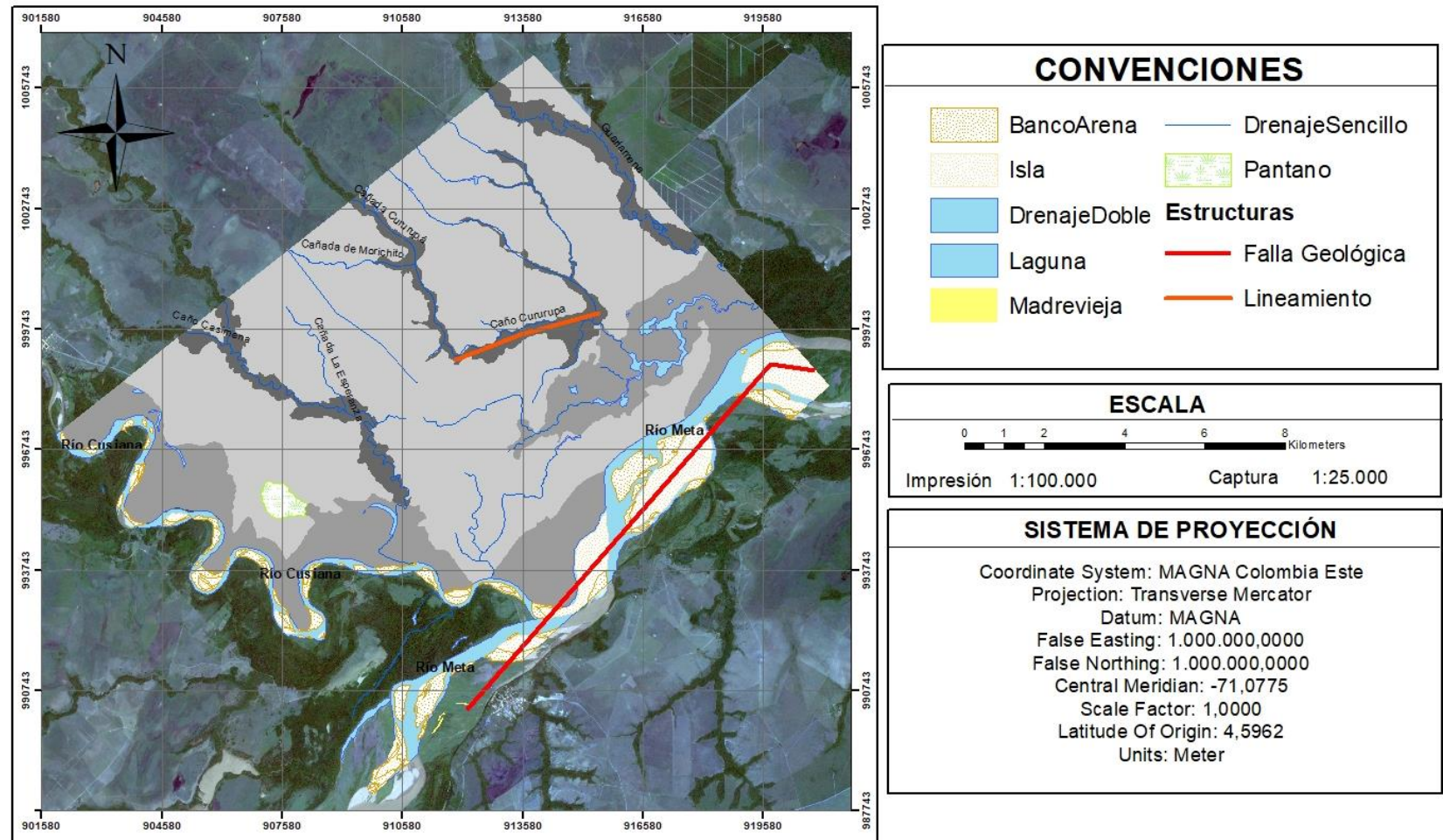
Desde el punto de vista de estructuras geológicas, el área de estudio como se describió anteriormente, está localizada en el Bloque Casanare de la Cuenca de los Llanos Orientales, corresponde a una gran estructura monoclinal fallada con un buzamiento muy suave hacia el SE, limitada por la Falla del Meta, que controla el cauce del Río Meta y tiene una orientación E - NE – W - SW (ANH, 2012). De acuerdo a lo observado en la Figura 7 esta falla es de tipo inversa.

Dicha estructura monoclinal, que contiene una espesa secuencia de rocas sedimentarias (edad Jurásico a Neógeno – ver Figura 7) está cubierta por una secuencia de sedimentos del Cuaternario, conformados por arcillas, limos, arenas y lateritas ferruginosas, que enmascaran los patrones de fallamiento que afectan las rocas del Bloque estructural Casanare. (fallas cubiertas)

Dentro del área de influencia del área de estudio, el cauce del Caño Cururupá presenta un cambio de curso abrupto, así como un alineamiento local en sentido W-SW – E-NE, paralelo a la tendencia de la Falla del Río Meta, antes de su desembocadura en el Río Meta. Por otra parte, el comportamiento meandriforme del cauce del Río Cusiana antes de su desembocadura en el Río Meta, es ocasionado por el control estructural que tiene este último y a la diferencia de altura, es decir la menor altura del Bloque Estructural Casanare (donde se encuentra el área de estudio) con respecto al Bloque Estructural Vichada; esta diferencia varía entre 50 y 70 metros (Flórez, 2010). Todos estos rasgos apuntan, que el área se ha desarrollado en un ambiente fluvial con una influencia marcada del componente estructural.

En la Figura 16 se aprecian las estructuras geológicas y su ubicación con respecto al área de estudio.

Figura 16. Distribución espacial de las Unidades estructurales en el área de estudio.



5.6 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

El inventario de puntos de agua en el área, se realizó para todos los predios ubicados dentro del área de estudio; los habitantes de esta zona tienen como práctica común el uso de pozos profundos o aljibes para el abastecimiento de agua. Algunas de estas construcciones fueron entregadas por la gobernación del departamento de Casanare, otras por la alcaldía del municipio de Maní, y otros fueron contruidos por los mismos propietarios de los predios.

La comunidad aprovecha el recurso hídrico subterráneo mediante el uso de bombas de extracción tales como motobombas, electrobombas, bombas solares y también de manera manual. El estado de muchos de los puntos es malo ya que a la mayoría no se les realiza un mantenimiento adecuado; el almacenamiento del agua (en albercas y tanques), se hace inmediatamente después de la extracción de esta, en ocasiones es consumida directamente de la tubería de descarga. Son pocos los pozos que cuentan con un tratamiento de control de calidad para el posterior consumo o uso por parte de las personas.

En este sentido, el inventario de los puntos de agua (IPA) se realizó en 14 predios de la vereda Guayanas, la cual abarca completamente el área de estudio. Para cada uno de los puntos inventariados, se tomó información representativa como profundidad, nivel del agua, características de explotación, uso, entre otros.

En total se hizo inventario a 32 puntos de agua, de los cuales 26 corresponden a pozos profundos, 5 son aljibes y un piezómetro. Respecto a los pozos profundos, 13 son productivos, 12 son de reserva y 1 está abandonado; en cuanto a los aljibes,

1 es productivo, 3 son de reserva y 1 se encuentra en abandono. Para consignar los datos se utilizó el Formulario Único Nacional Para Inventario de Puntos de Agua Subterránea (Anexo A Inventario de puntos de agua (IPA)). La ubicación del inventario de puntos de agua, se puede observar en la Figura 17.

La georreferenciación de los puntos de agua inventariados se realizó empleando un equipo GPS Navegador GARMIN GPSMAP 62SC. Para medir el nivel estático se utilizó una sonda de niveles con señal sonora marca Heron Instruments de 150m.

En los resultados del inventario de puntos de agua se puede evidenciar el tipo de estructura empleada por la comunidad para la obtención del recurso hídrico y el nivel estático del acuífero captado. Esta información hace parte de la línea base para evaluar la disponibilidad del agua en el área de estudio. Ver Tabla 20.

Tabla 20. Inventario de puntos de agua del Área de estudio

ID	Municipio	Vereda	Predio	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este		Tipo de punto	Condicion del Punto	Prof (m)	Nivel estático (m)
				Este	Norte				
1	Maní	Guayanas	Escuela Guayanas	905406	997034	Pozo	Productivo	30	1,8
2	Maní	Guayanas	Pozo Morichito # 5	913194	998308	Piezó metro	-	40	1,7
3	Maní	Guayanas	Guacamayas	906355	996262	Pozo	Productivo	18	1,8
4	Maní	Guayanas	El Medano	909791	997630	Pozo	Productivo	20	3,1
5	Maní	Guayanas	Cojedes	904951	997405	Pozo	Productivo	24	1,4
6	Maní	Guayanas	Cojedes	904880	997345	Pozo	Reserva	24	1,3
7	Maní	Guayanas	El Paraiso	904989	997384	Pozo	Productivo	-	1,1
8	Maní	Guayanas	Cunaviche	905645	996928	Pozo	Productivo	16	-
9	Maní	Guayanas	Cunaviche	905645	996932	Aljibe	Reserva	5	1,9
10	Maní	Guayanas	Cunaviche	906358	997517	Pozo	Reserva	16	-
11	Maní	Guayanas	Bellavista	906286	996688	Pozo	Productivo	18	1,1
12	Maní	Guayanas	Bellavista	906276	996696	Aljibe	Reserva	5	1,1

13	Maní	Guayanas	El Medano	909887	997675	Pozo	Reserva	18	2,6
14	Maní	Guayanas	El Medano	910195	997156	Pozo	Reserva	18	0,7
15	Maní	Guayanas	El Medano	912659	998547	Pozo	Reserva	18	2,3
16	Maní	Guayanas	Los 3 Palos	905399	997113	Pozo	Productivo	-	1,3
17	Maní	Guayanas	Guacamayas	906599	995696	Pozo	Reserva	15	2,0
18	Maní	Guayanas	Guacamayas	906801	996612	Pozo	Reserva	18	1,2
19	Maní	Guayanas	Guacamayas	906340	996317	Aljibe	Abandonado	11	1,0
20	Maní	Guayanas	Miralindo	909552	995490	Aljibe	Reserva	8	0,9
21	Maní	Guayanas	Miralindo	906560	995471	Pozo	Productivo	18	2,2
22	Maní	Guayanas	Miralindo	906545	995026	Pozo	Reserva	60	
23	Maní	Guayanas	Mis Deseos	907117	996018	Aljibe	Productivo	8	1,3
24	Maní	Guayanas	Mis Deseos	907126	996016	Pozo	Productivo	24	2,2
25	Maní	Guayanas	Bellavista	906441	996740	Pozo	Reserva	64	1,4
26	Maní	Guayanas	Bello Horizonte	915563	1003753	Pozo	Productivo	-	3,5
27	Maní	Guayanas	Bello Horizonte	915466	1003659	Pozo	Reserva	-	4,8
28	Maní	Guayanas	Bello Horizonte	915566	1003748	Pozo	Abandonado	-	-
29	Maní	Guayanas	Barcelona	904949	996893	Pozo	Productivo	8	0,3
30	Maní	Guayanas	Barcelona	905051	996696	Pozo	Reserva	-	1,4
31	29Maní	Guayanas	Barcelona	905248	997093	Pozo	Reserva	-	1,4
32	Maní	Guayanas	Ventuario	907731	996159	Pozo	Productivo	-	-

En la Tabla 21 se presenta el registro fotográfico representativo del inventario de puntos de agua. En este se presentan los diferentes tipos de puntos de agua encontrados en el área con sus condiciones características.

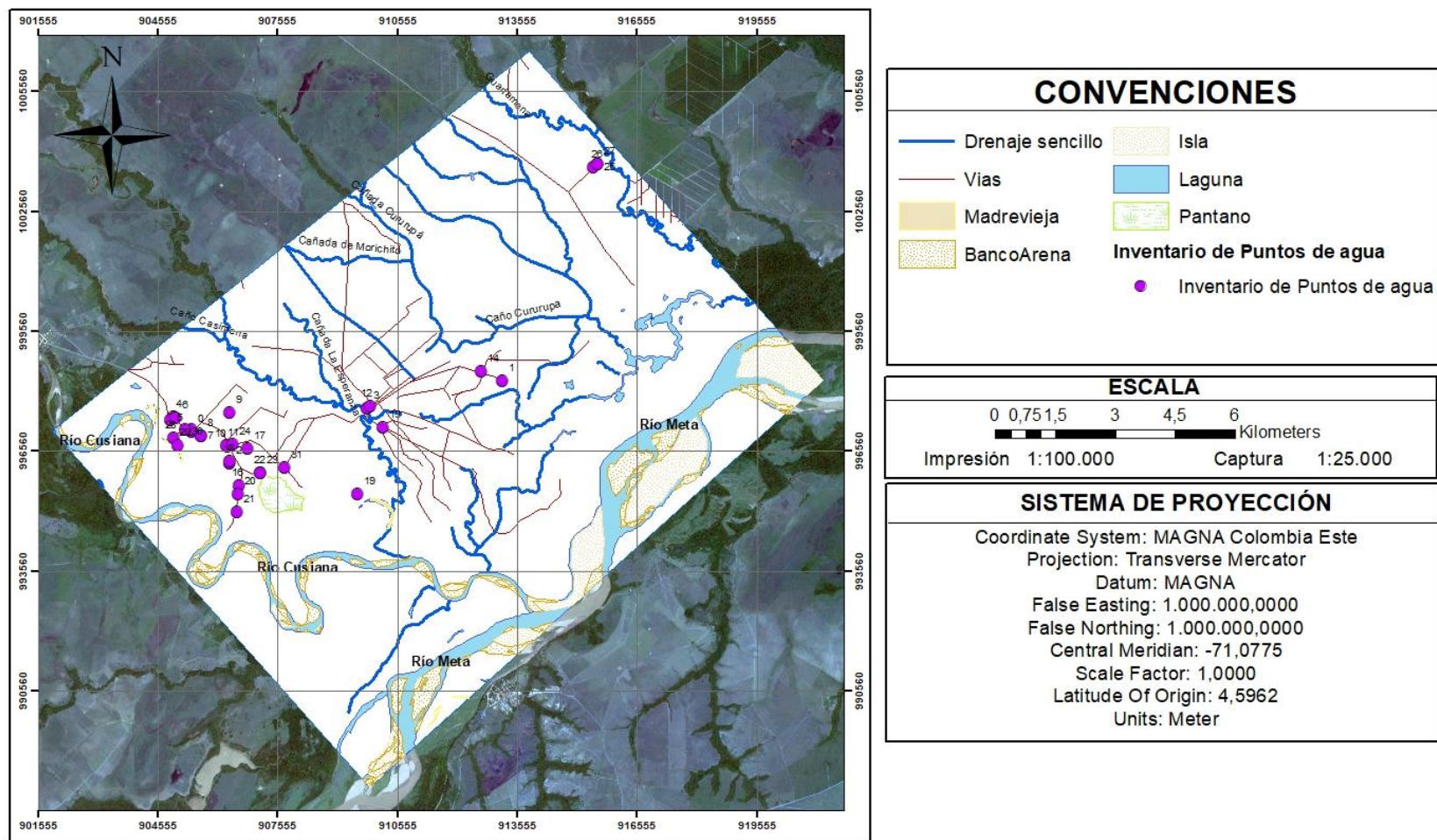
Tabla 21. Registro fotográfico de Inventario de Puntos de Agua

ID	Predio	Tipo de Punto	Condición del punto	Registro fotográfico
4	Médano	Pozo	Productivo Predio El Medano	 A photograph of a manual water pump with a white fuel tank and a black handle. A yellow hose is connected to the pump. A handwritten label on a blue background is held up next to the pump. The label reads: 'Municipio: Mani', 'Vereda: Guaymas', 'Pueblo: Medano', 'Avenida de Bomberos #13', 'Coordenadas: E 469994', 'N 912630'. A timestamp '11/11/2016 12:00' is visible in the bottom right corner of the photo.
10	Cunaviche	Pozo	Reserva Predio Cunaviche	 A photograph of a white PVC pipe sticking out of the ground in a grassy area. A handwritten label on a blue background is placed next to the pipe. The label reads: 'Municipio: Mani', 'Vereda: Guaymas', 'Pueblo: Cunaviche', 'Inventario', 'Coordenadas: E 469994', 'N 912630'. A timestamp '12/11/2016 14:48' is visible in the bottom right corner of the photo.

28	Bello Horizonte	Pozo	Abandonado Predio Bello Horizonte	 A photograph of an abandoned well structure. A white PVC pipe runs horizontally across the frame, supported by a wooden post on the right. Below the pipe, a small concrete slab sits on the ground. A handwritten label is attached to the pipe. The label text is: "Bella Horizonte - 01-02-03", "Habitante: Nani Dominguez", "Municipio: Guaymas", "Predio: Bello Horizonte", "Pozo: Abandonado", "Coordenadas: E- 104 6500", "N- 100 4095", "Cota: 14.5m".
23	Mis Deseos	Aljibe	Productivo Predio Mis Deseos	 A photograph of a rusty metal barrel used as a well, sitting on a grassy area. A handwritten label is placed on the ground next to it. The label text is: "Aljibe 2005", "Bella Horizonte", "Belle, Rio de Janeiro", "Campanario", "Campanario", "Rio de Janeiro", "Rio de Janeiro", "Rio de Janeiro". A timestamp "13/11/2016 10:42" is visible in the bottom right corner.
9	Cunaviche	Aljibe	Reserva Predio Cunaviche	 A photograph of a well structure with a potted plant on top. A handwritten label is placed on the ground next to it. The label text is: "Reserva de Agua", "Bella Horizonte", "Belle, Rio de Janeiro", "Campanario", "Campanario", "Rio de Janeiro", "Rio de Janeiro", "Rio de Janeiro". A timestamp "12/11/2016 13:11" is visible in the bottom right corner.

19	Guacamayas	Aljibe	Abandonado Predio Guacamayas	
----	------------	--------	------------------------------------	--

Figura 17. Localización de pozos y aljibes encontrados en el Área de Estudio



5.7 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS ACUÍFEROS

En el Área de Estudio se realizaron tres (3) pruebas de bombeo durante la temporada de lluvias y una (1) en temporada seca; a continuación, se presentan los resultados obtenidos de estas. Las pruebas tuvieron una duración promedio de 1 hora 40 minutos de bombeo y al concluir las se midió la recuperación, la cual se observó hasta alcanzar el 100% de abatimiento máximo alcanzado en la etapa de bombeo. En el Anexo B se presentan los formatos de las pruebas de bombeo y recuperación realizadas en campo.

En la Tabla 22 se exponen los pozos en los que se realizaron ensayos de bombeo en la temporada de lluvias, estos pozos se presentan con una numeración del 1 al 3 para identificar cada uno de los predios. En la Figura 18 se presenta su localización.

Tabla 22. Coordenadas y predios de realización de Pruebas de Bombeo

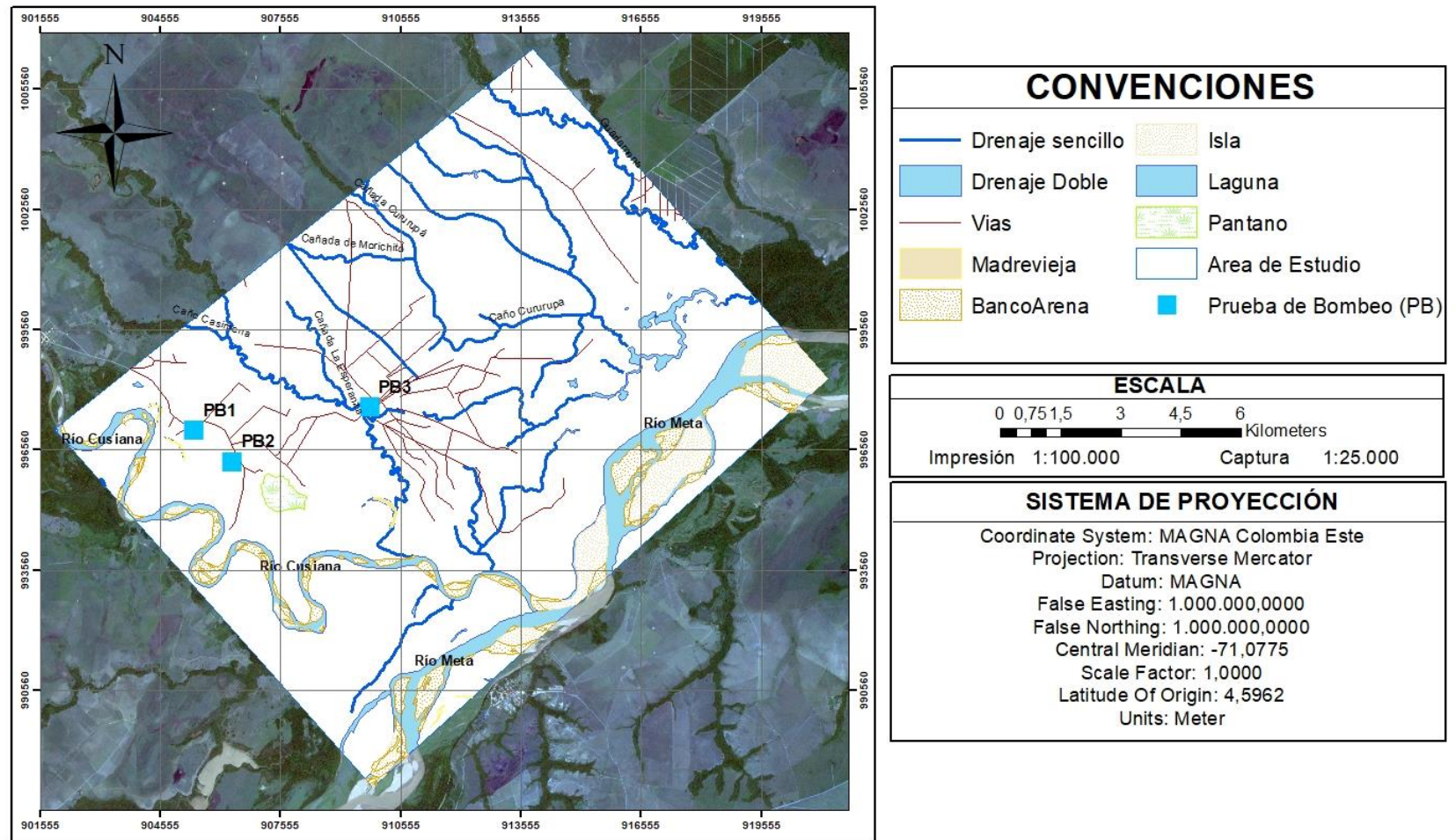
ID Prueba	Predio	Tipo de Estructura	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este	
			Este	Norte
1	Escuela Guayanas	Pozo	905406	997034
2	Guacamayas	Pozo	906355	996262
3	El Médano	Pozo	909791	997630

Por otra parte en la Tabla 23 se presenta el pozo al que se le realizó prueba de bombeo en temporada seca, en este caso se mantuvo la numeración anterior.

Tabla 23. Coordenadas y predios de realización de Pruebas de Bombeo

ID Prueba	Predio	Tipo de Estructura	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este	
			Este	Norte
3	El Médano	Pozo	909791	997630

Figura 18. Localización de Pruebas de Bombeo realizadas en el Área de Estudio



En la Tabla 24 se presenta el registro fotográfico tomado durante la realización de las pruebas de bombeo en los pozos de agua identificados para el Área de Estudio.

Tabla 24. Registro fotográfico de Pruebas de Bombeo

I D	Predio	Temporada	Registro fotográfico
1	Escuela Guayanas (Vereda Guayanas)	Lluvia	 A photograph showing two individuals, a man in a red cap and a woman, working on a well pump in a grassy field. They are crouched next to a large yellow hose reel and a white pipe. A timestamp in the bottom right corner reads '10/11/2016 10:04'.
2	Guacamayas (Vereda Guayanas)	Lluvia	 A photograph showing two individuals, a man in a white shirt and a woman in a pink shirt, working on a well pump in a grassy field. They are crouched next to a large yellow hose reel and a white pipe. A timestamp in the bottom right corner reads '11/11/2016 08:24'.

3	El Medano (Verada Guayanas)	Lluvia	
3	El Medano (Verada Guayanas)	Seca	

5.7.1 Análisis de las pruebas de bombeo

Para el análisis de las pruebas de bombeo realizadas en el área de estudio, se usaron los datos que se presentan en las Tabla 25 y Tabla 26. Esta información se obtuvo en el trabajo de campo durante la ejecución de las pruebas de bombeo en el Área de Estudio. Con base en esto se determinó la capacidad específica de los acuíferos captados por cada uno de los pozos.

Para definir parámetros hidráulicos a partir del análisis de pruebas de bombeo, se utilizaron métodos gráficos en Excel empleando métodos analíticos (Anexo C Resultados del análisis de pruebas de bombeo por método analítico) y mediante

software especializado Aquifer Test Pro Versión 2016.1 (Anexo D Resultados del análisis de pruebas de bombeo mediante Aquifer Test).

Tabla 25 Resumen datos empleados en el análisis y capacidad específica de los pozos (Época de lluvias).

ID	Predio	Tipo de Estructura	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este		Profundidad del pozo (m)	Caudal (L/s)	Abatimiento (m)	Capacidad específica (L/s/m)
			Este	Norte				
1	Escuela Guayanas	Pozo	905406	997034	30	2,02	1,33	1,52
2	Guacamayas	Pozo	906355	996262	18	2,44	1,75	1,39
3	El Medano	Pozo	909791	997630	20	4,40	1,27	3,46

Tabla 26 Resumen datos empleados en el análisis y capacidad específica de los pozos (Época seca)

ID	Predio	Tipo de Estructura	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este		Profundidad del pozo (m)	Caudal (L/s)	Abatimiento (m)	Capacidad específica (L/s/m)
			Este	Norte				
3	El Medano	Pozo	909791	997630	20	2,73	0,9	3,03

A continuación se presenta el paso a paso del cálculo de parámetros hidráulicos por el método analítico y las gráficas generadas por el software Aquifer Test Pro Versión 2016, para la prueba de Bombeo realizada en el Pozo del predio el Médano. El procedimiento que se presenta es el mismo que se utilizó en todos los ensayos hidráulicos realizados en el área de estudio ya sea en temporada de lluvias o en temporada seca.

5.7.1.1 Ensayos hidráulicos El Médano

5.7.1.1.1 Prueba de Bombeo

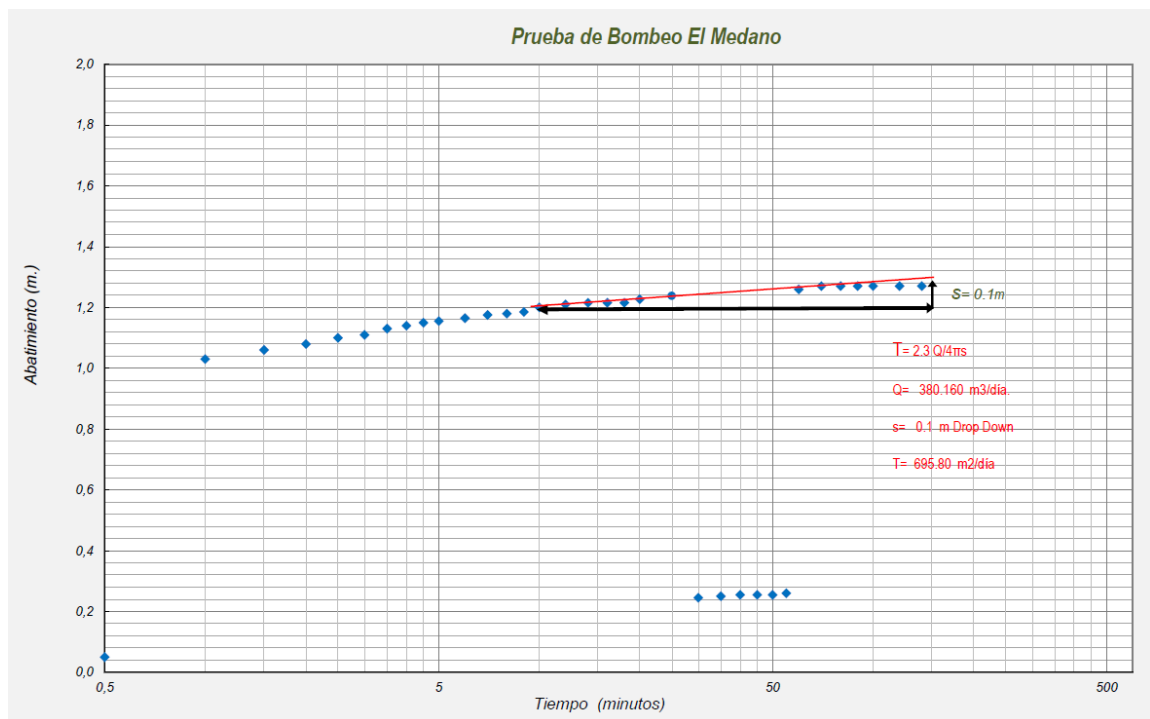
Esta prueba se realizó el 11 de Noviembre de 2016, el caudal de bombeo durante toda la prueba fue de 4.4 L/s, la prueba tuvo una duración de 140 minutos de bombeo. En la Figura 19 se muestra el formato de pruebas de bombeo con los datos tomados durante la realización de esta.

Figura 19. Formato Prueba de Bombeo El Medano

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE UNA ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE MANÍ CASANARE							
FORMATO PARA PRUEBAS DE BOMBEO							
MEDICIONES A REALIZAR EN:							
Pozo de Bombeo	x	Piezómetro de Observación		Pozo de Observación			
LOCALIZACIÓN GENERAL							
Departamento/Municipio/Vereda/Predio				Casanare/ Maní / Guayanas/ El Medano			
COORDENADAS							
Origen/Datum	Este/Magnas Sirgas						
Este	909791	Norte	997630	Cota	151		
DATOS DE LA PRUEBA DE BOMBEO Y EL POZO							
Hora:	12:08	Fecha	11/11/2016	Nivel Estático (m)	3,14	Profundidad (m)	20
Diámetro (Pulg.)	4	Nivel de Referencia (m)	0,32	Nivel Real (m)	2,82		
Caudal Promedio (LPS)	4,4	Corrección del nivel de la sonda (m) / Solo si es necesario					
Tiempo (hr.)	Tiempo (min.)	Nivel (m)	Abatimiento (m)	Caudal de Descarga			OBSERVACIONES
				Tiempo (seg)	Recipiente (L)	Caudal (L/s)	
	0	3,14	0,00				
	0,5	3,19	0,05				
	1	4,17	1,03				
	1,5	4,2	1,06				
	2	4,22	1,08				
	2,5	4,24	1,10				
	3	4,25	1,11				
	3,5	4,27	1,13				
	4	4,28	1,14				
	4,5	4,29	1,15				
	5	4,295	1,16				
	6	4,305	1,17				
	7	4,315	1,18				
	8	4,32	1,18				
	9	4,325	1,19				
	10	4,34	1,20				
	12	4,35	1,21				
	14	4,355	1,22				
	16	4,355	1,22				
	18	4,355	1,22				
	20	4,367	1,23				
	25	4,377	1,24				
	30	3,385	0,25				
	35	3,39	0,25				
	40	3,395	0,26				
	45	3,395	0,26				
	50	3,395	0,26				
	55	3,4	0,26				
	60	4,4	1,26				
	70	4,41	1,27				
	80	4,41	1,27				
	90	4,41	1,27				
	100	4,41	1,27				
	120	4,41	1,27				
	140	4,41	1,27				

En la Figura 20 se presenta el grafico semilogarítmico de los datos de Descensos (abatimiento) vs. Tiempo obtenidos durante la prueba de bombeo.

Figura 20. Gráfico de Descensos vs. Tiempo Bombeo El Medano



De acuerdo a los resultados del gráfico, la diferencia del abatimiento en el ciclo logarítmico seleccionado es 0.1, por lo tanto, la transmisividad de la unidad acuífera captada por el pozo de la finca El Medano es:

$$T = \frac{2.3 Q}{4\pi s}$$

$$T = 0.183 \frac{Q}{s}$$

$$T = 0.183 \left(\frac{380.160 \frac{m^3}{día}}{0.1 m} \right)$$

$$T = 695.80 m^2/día$$

Estos datos también fueron analizados mediante el software Aquifer Test. En la Figura 21 se muestran los resultados mediante el método de Theis y en la Figura 22 se muestran los resultados mediante el método de Cooper – Jacob.

Figura 21. Solución de Theis Aquifer Test Bombeo El Medano

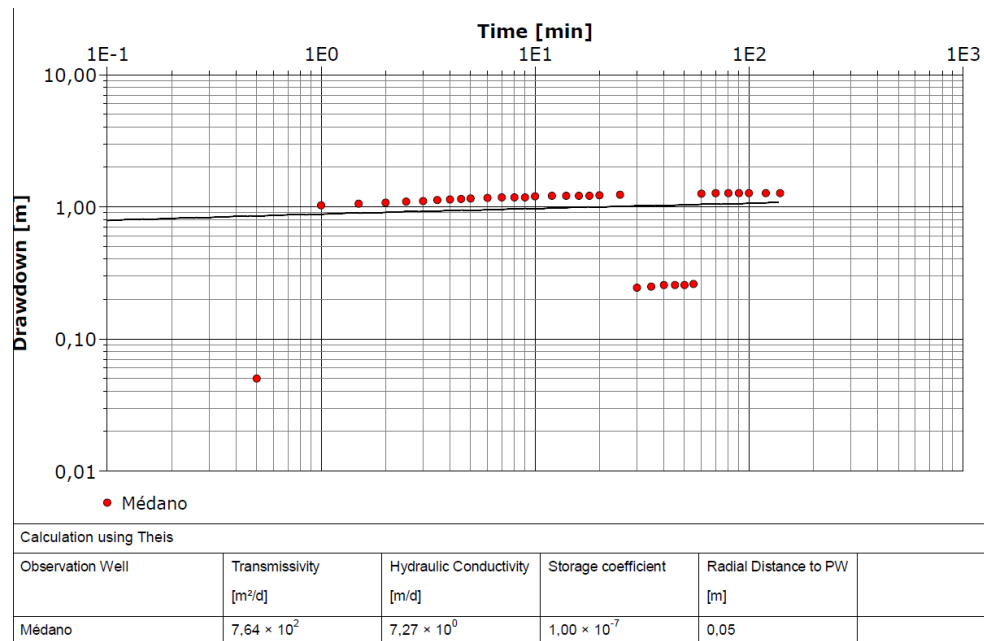
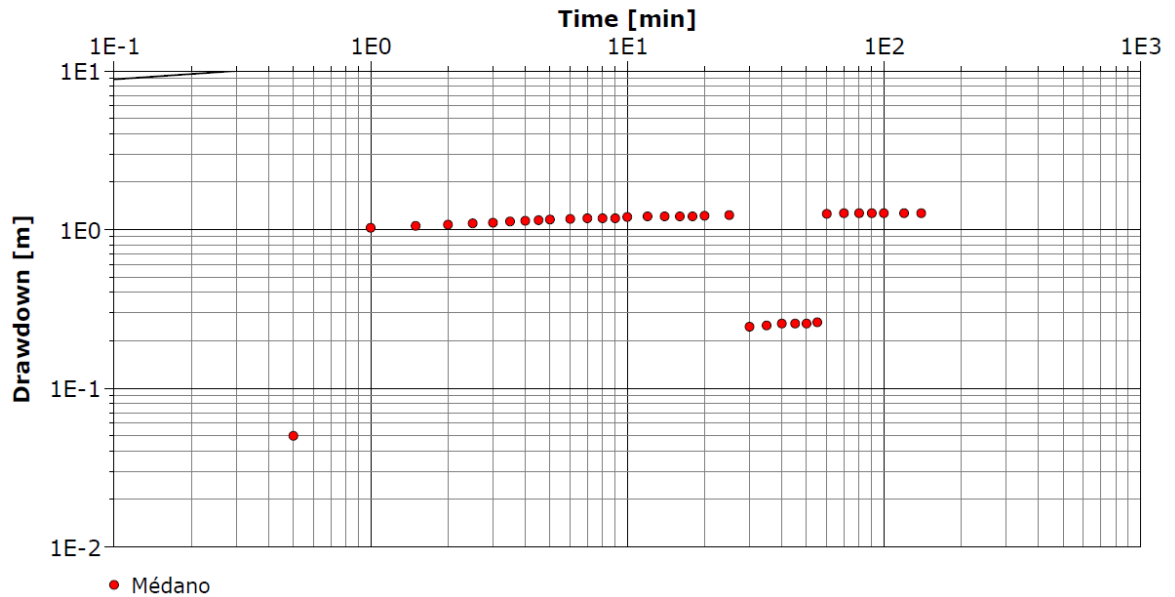


Figura 22. Solución de Cooper - Jacob Aquifer Test Bombeo El Medano



Calculation using COOPER & JACOB					
Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
Médano	$6,23 \times 10^2$	$5,93 \times 10^0$	$1,25 \times 10^{-7}$	0,05	

5.7.1.1.2 Ensayo de Recuperación

Esta prueba se realizó el 11 de Noviembre de 2016 una vez terminado el ensayo de bombeo, la prueba tuvo una duración de 40 minutos.

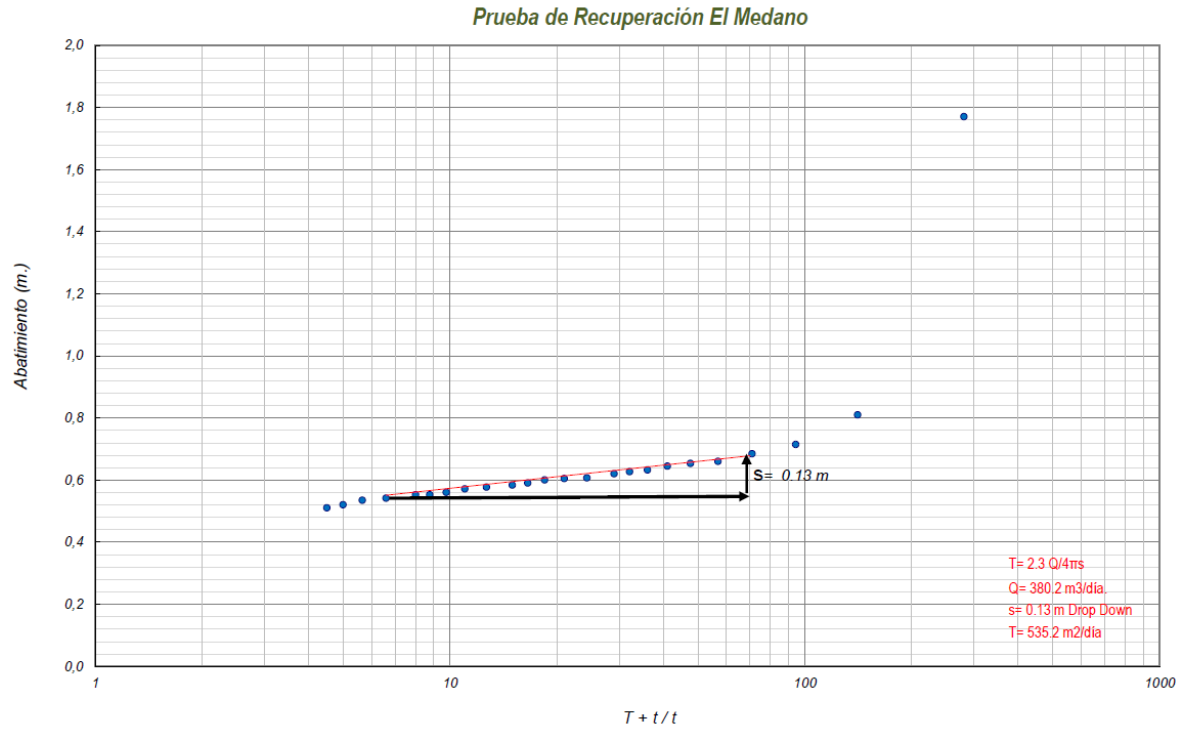
En la Figura 23 se muestra el formato de pruebas de recuperación con los datos tomados durante la realización de esta.

Figura 23. Formato Prueba de Recuperación El Medano

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE UNA ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE MANÍ CASANARE						
FORMATO PARA PRUEBAS DE RECUPERACION						
MEDICIONES A REALIZAR EN:						
Pozo de Bombeo	x	Piezómetro de Observación		Pozo de Observación		
LOCALIZACIÓN GENERAL						
Departamento/Municipio/Vereda/Predio		Casanare/ Maní/ El Medano				
COORDENADAS						
Origen/Datum	Este/Magnas Sirgas					
Este	909791	Norte	997630	Cota	151	
DATOS DE LA PRUEBA DE BOMBEO Y EL POZO						
Hora:	14:28	Fecha	11/11/2016	Nivel Estático (m)	3,14	Profundidad (m)
Diámetro (Pulg.)	4	Nivel de Referencia (m)	0,32	Nivel Real (m)	2,82	
Caudal Promedio (LPS)	4,40	Corrección del nivel de la sonda (m) / Solo si es necesario				-
Tiempo (hr.)	Tiempo (min.), t	T + t (min)	T + t / t	Nivel (m)	Abatimiento (m)	OBSERVACIONES
	0	140,00		4,41	1,77	
	0,5	140,50	281,00	3,45	0,81	
	1	141,00	141,00	3,355	0,715	
	1,5	141,50	94,33	3,325	0,685	
	2	142,00	71,00	3,3	0,66	
	2,5	142,50	57,00	3,293	0,653	
	3	143,00	47,67	3,285	0,645	
	3,5	143,50	41,00	3,273	0,633	
	4	144,00	36,00	3,267	0,627	
	4,5	144,50	32,11	3,26	0,62	
	5	145,00	29,00	3,247	0,607	
	6	146,00	24,33	3,245	0,605	
	7	147,00	21,00	3,24	0,6	
	8	148,00	18,50	3,23	0,59	
	9	149,00	16,56	3,224	0,584	
	10	150,00	15,00	3,217	0,577	
	12	152,00	12,67	3,211	0,571	
	14	154,00	11,00	3,2	0,56	
	16	156,00	9,75	3,193	0,553	
	18	158,00	8,78	3,193	0,553	
	20	160,00	8,00	3,182	0,542	
	25	165,00	6,60	3,175	0,535	
	30	170,00	5,67	3,16	0,52	
	35	175,00	5,00	3,15	0,51	
	40	180,00	4,50	3,14	0,5	

En la Figura 24 se presenta el grafico semilogarítmico de los datos de Descensos (abatimiento) vs. $\log(\frac{t+T}{t})$.

Figura 24. Gráfico de Descensos vs. Tiempo Recuperación El Medano



De acuerdo a los resultados del gráfico, la diferencia del abatimiento en el ciclo logarítmico seleccionado es 0.13, por lo tanto, la transmisividad de la unidad acuífera captada por el pozo de la finca El Medano es:

$$T = \frac{2.3 Q}{4\pi s}$$

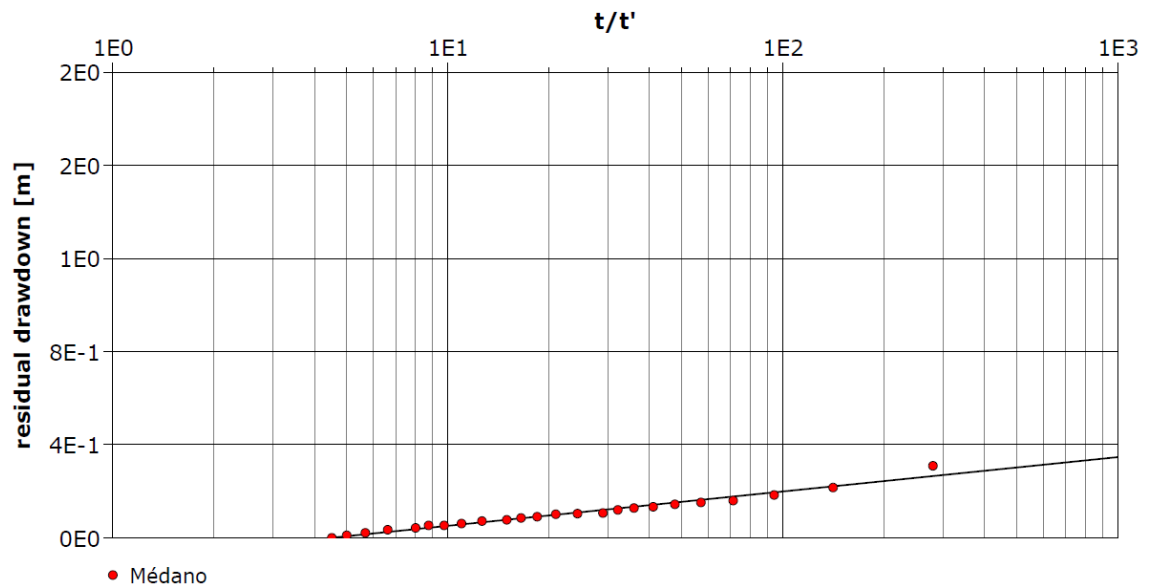
$$T = 0.183 \frac{Q}{s}$$

$$T = 0.183 \left(\frac{380.160 \frac{m^3}{día}}{0.13 m} \right)$$

$$T = 535.2 m^2/día$$

Estos datos también fueron analizados mediante el software Aquifer Test. En la Figura 25 se muestran los resultados mediante el método de Recuperación de Theis.

Figura 25. Solución de Theis Recovery Aquifer Test Recuperación El Medano



Calculation using THEIS & JACOB

Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Radial Distance to PW [m]	
Médano	4.73×10^2	4.51×10^0	0.05	

5.7.2 Resultados

En las Tabla 28 y Tabla 30 se muestra un resumen de los parámetros hidráulicos que se obtuvieron en cada una de las temporadas, a partir del análisis mediante el software Aquifer Test Pro Versión 2016.1 y métodos gráficos como Cooper Jacob.

Tabla 27 Transmisividad y Conductividad estimada (época de lluvia).

ID Prueba	Prueba	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este		T (m³/d) (Método analítico)	T Promedio (m³/d) (Método analítico)	Conductividad (m/d) (Método analítico)	Transmisividad (m²/d) (Aquifer Test)			T Promedio (m³/d) (Aquifer Test)	Conductividad (m/d)	Profundidad (m)	Q (l/s)	Abatimiento (m)	CE (l/s/m)
		Este	Norte				Cooper Jacob	Theis	Theis Recovery						
1	Bombeo Escuela Guayanas	905406	997034	399,29	313,745	34,9	428	255	264	315,7	3	30	2,02	1,33	1,52
	Recuperación Escuela Guayanas			228,2											
2	Bombeo Guacamayas	906355	996262	385,85	289,375	53,6	438	231	241	303,3	2,89	18	2,44	1,75	1,39
	Recuperación Guacamayas			192,9											
3	Bombeo El Medano	909791	997630	695,80	615,5	102,6	623	764	473	620	5,9	20	4,40	1,27	3,46
	Recuperación El Medano			535,2											

Tabla 28 Transmisividad y Conductividad promedio estimada (época de lluvia).

Predio	Transmisividad Promedio Analítico (m ² /d)	Transmisividad Promedio Acuífer Test (m ² /d)	Transmisividad Promedio (m ² /d)	Conductividad Promedio Analítico (m/d)	Conductividad Promedio Acuífer Test (m/d)	Conductividad Promedio (m/d)	Capacidad Específica (L/s/m)
Escuela Guayanas	313,745	315,7	314,7	34,9	3	18,95	1,52
Guacamayas	289,375	303,3	296,33	53,6	2,89	28,5	1,39
El Medano	615,5	620	617,75	102,6	5,9	54,25	3,46
Transmisividad Promedio (m ² /d)			409,6	Conductividad Promedio (m/d)		33,9	

Tabla 29 Transmisividad y Conductividad estimada (Época seca)

ID Prueba	Prueba	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este		T (m ² /d) (Método analítico)	T Promedio (m ² /d) (Método analítico)	Conductividad (m/d) (Método analítico)	Transmisividad (m ² /d) (Acuífer Test)			T Promedio (m ² /d) (Acuífer Test)	Conductividad (m/d)	Profundidad (m)	Q (l/s)	Abatimiento (m)	CE (l/s/m)
		Este	Norte				Cooper Jacob	Theis	Theis Recovery						
3	Bombeo El Medano	909791	997630	719,52	575,61	95,95	569	541	452	520,7	4,96	20	2,73	0,9	3,03
	Recuperación El Medano			431,7											

Tabla 30 Transmisividad y Conductividad promedio estimada (Época seca).

Predio	Transmisividad Promedio Analítico (m²/d)	Transmisividad Promedio Aquifer Test (m²/d)	Transmisividad Promedio (m²/d)	Conductividad Promedio Analítico (m/d)	Conductividad Promedio Aquifer Test (m/d)	Conductividad Promedio (m/d)	Capacidad Especifica (L/s/m)
El Médano	575,61	520,7	548,155	95,95	4,96	50,455	3,03

5.7.2.1 Análisis de resultados

Se puede apreciar de manera general, que las propiedades hidráulicas del acuífero no presentan gran variación de acuerdo a la temporada del año, esto está relacionado con que las características intrínsecas del acuífero se mantienen independientemente de la temporada del año. La única variación que se presenta en el acuífero, es en el nivel estático, el cual en la temporada seca es un poco más bajo que en la temporada de lluvias, lo que conlleva a un cambio en el valor de la capacidad específica del acuífero; a pesar de este cambio se mantiene la productividad en el acuífero.

A partir de los resultados obtenidos y presentados en las Tabla 28 y Tabla 30 se puede apreciar que los valores de la transmisividad para el acuífero en general son altos, cercanos a los $450 \text{ m}^2/\text{día}$, lo que indica que este tiene una buena capacidad para transmitir el agua dentro de la formación, teniendo en cuenta la conductividad hidráulica y el espesor de los niveles. Este comportamiento va de la mano con las características físico mecánicas de los materiales que componen el nivel acuífero del que captan estos pozos.

De acuerdo a la conductividad hidráulica obtenida a partir del análisis de los ensayos realizados, esta es del orden de magnitud de 42 m/día . De acuerdo a Schöeller (1962) el acuífero estaría compuesto principalmente por material de tipo arena gruesa. Tabla 31.

Tabla 31 Orden de magnitud de K (m/día)

Material	K (m/día)
Arcilla	$10 \text{ E-}7 < K < 10\text{E-}5$
Limo	$10 \text{ E-}5 < K < 10\text{E-}1$
Arena Fina	$10 \text{ E-}1 < K < 10\text{E}0$
Arena Gruesa	$10 \text{ E}0 < K < 200$
Grava	$10 \text{ E}7 < K < 10\text{E}3 \text{ o más}$

Fuente Schöeler, 1962.

Custodio y Llamas en 1983 propusieron una clasificación del terreno según los rangos de conductividad hidráulica (Tabla 32), de acuerdo a esta clasificación, el terreno en que se encuentran los pozos corresponde a un terreno algo permeable que conforma un acuífero regular a bueno.

Tabla 32 Clasificación del Terreno según K (m/día)

	Rango K (m/día)				
	$10\text{E-}7 < K < 3\text{E-}4$	$3\text{E-}4 < K < 5\text{E-}2$	$5\text{E-}2 < K < 5\text{E}0$	$5\text{E}0 < K < 4\text{E}2$	$4\text{E}2 < K < 3\text{E}5$
CALIFICACION	Impermeable	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación de la formación	Acuícludo	Acuitardo	Acuífero Pobre	Acuífero regular a bueno	Acuífero excelente

Ejemplos de materiales	Arcilla compacta / Pizarra / Granito.	Limo arenoso / Limo / Arcilla Limosa.	Arena fina / Arena Limosa / Caliza Fracturada	Arena Limpia / Grava y arena / Arena fina.	Grava Limpia.
------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---	--	---------------

Fuente Custodio y Llamas, 1983.

Por otro lado, el caudal obtenido en las pruebas de bombeo es variable, se encuentra en un rango entre 2,02 l/s y 4,40 l/s en época de lluvia, estos datos pertenecen a los predios Escuela Guayanas y El Médano respectivamente. El caudal obtenido, además de las características del acuífero está relacionado también con el método de extracción del agua y el mantenimiento y buen uso que se le dé al pozo; esto último, podría identificarse como la causa de la diferencia que se presenta en la cantidad de caudal obtenido.

En cuanto al abatimiento, se puede observar que también tiene un rango de variación entre los diferentes puntos, el mayor abatimiento se encuentra en el pozo del predio Guacamayas. El notorio cambio en los abatimientos de los pozos, se relaciona con el hecho de que las capacidades de carga y descarga dentro del acuífero varían, dependiendo del relleno de los poros al momento de la movilización del agua a través de los mismos. Estos cambios en el abatimiento, son notables en las pruebas de bombeo realizadas en el pozo del predio El Médano. El comportamiento de este pozo permite inferir que hay una considerable cantidad de aire dentro del acuífero, lo que hace que los niveles cambien drásticamente en cortos lapsos de tiempo.

En los pozos de los predios Guacamayas y El Médano, se visualizó que la transmisividad en el acuífero mejoraba al momento de iniciar la prueba de recuperación, indicando que se logró movilizar agua a los niveles inferiores

captados por los pozos, mejorando su capacidad específica. Estos pozos de los predios Guacamayas y El Médano, son los que presentan menor profundidad entre los pozos estudiados, siendo estas de 18 y 20 metros respectivamente. El comportamiento descrito se debe, a que las características de los materiales son aptas para que haya de manera equilibrada, tanto almacenamiento como transmisión del recurso a través de este nivel acuífero, compuesto por gravas y arenas.

En el caso de los Llanos Orientales, las unidades hidrogeológicas someras están conformadas por Depósitos Cuaternarios, esto define continuos cambios de facies a lo largo del área. En el Área de Estudio, los cambios litológicos a medida que se aumenta la profundidad y los cambios laterales de espesores, traen consigo que parámetros como la conductividad, transmisividad, capacidad específica y coeficiente de almacenamiento no tengan un comportamiento constante a medida que se desciende sobre los Depósitos Cuaternarios.

Teniendo en cuenta la capacidad específica, se considera que la productividad del acuífero es alta (ver Tabla 34). Con estos resultados, se puede concluir que la capacidad específica no está sujeta a la profundidad del pozo, sino que recae directamente en el material a través del cual se almacena, transmite y capta el agua.

De manera general, los pozos estudiados arrojan que las franjas captadas poseen buena transmisividad y conductividad hidráulica, la cual depende como se mencionó anteriormente del nivel captado. Por lo anterior, se define un acuífero que tiene una facilidad alta para movilizar agua a través de él. Adicionalmente, de acuerdo a los datos de las pruebas de recuperación, se puede establecer que dos (2) de los puntos de agua utilizados para estas pruebas, se recuperaron al 90% o más de su abatimiento al nivel inicial, en un tiempo menor al teórico necesario, esto es

únicamente posible si se presenta recarga de agua exterior al sistema acuífero – pozo. Esta recarga puede tener varios orígenes, debido a las características y localización del acuífero esta se debe principalmente al goteo vertical proveniente de los primeros niveles acuíferos, que almacenan la mayor cantidad de agua proveniente de la precipitación.

5.8 CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Se recopiló la información obtenida del estudio geoelectrico realizado en la zona junto con la información de la geología local, para realizar una clasificación de los niveles acuíferos definidos, esto a través de lo expuesto por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos.

El Área de Estudio se localiza sobre Depósitos Cuaternarios que conforman acuíferos de porosidad primaria, debido a que poseen condiciones hidrogeológicas favorables, tanto para almacenamiento como para el flujo de agua subterránea. Por ende, se determinó la existencia de unidades hidrogeológicas clasificadas de acuerdo a la nomenclatura presente en la Tabla 33.

Tabla 33 Unidades Hidrogeológicas de acuerdo a la productividad de los acuíferos

Productividad	1..Alta Productividad	2. Moderada Productividad	3. Baja productividad general pero con productividad moderada local	4. Baja Productividad
Tipo de Acuífero				
Acuífero en sedimentos	A1	A2	X	X

inconsolidados y porosidad primaria				
Acuíferos con porosidad secundaria	B1	B2	X	X
Acuíferos kársticos	C1	C2	X	X
Formaciones de baja permeabilidad.	X	X	D1	D2

Fuente Sothern African Development Community. S/A.

De acuerdo a la información de capacidad específica obtenida a partir de las pruebas de bombeo y con base en la Tabla 34 se determinó la productividad de las unidades hidrogeológicas

Tabla 34 Productividad de los acuíferos a partir de la capacidad específica

Productividad	Capacidad Específica(l/s/m)
Alta	Mayor de 1,1
Mediana	Entre 0,1 y 1,1
Baja	Entre 0,01 y 0,1
Muy Baja	Menor de 0,01

Fuente Sothern African Development Community. S/A.

Con base en esta información, y lo obtenido en las pruebas de bombeo, se realizó una tabla con los parámetros que ayudaran a definir las unidades acuíferas dentro del Área de Estudio. Tabla 35.

Tabla 35. Productividad de los acuíferos evaluados

ID	Predio	Tipo de Estructura	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este		Profundidad del pozo (m)	Caudal (l/s)	Abatimiento (m)	Capacidad específica (L/s/m)	Productividad
			Este	Norte					
1	Escuela Guayanas	Pozo	905406	997034	30	2,02	1,33	1,52	Alta
2	Guacamayas	Pozo	906355	996262	18	2,44	1,75	1,39	Alta
3	El Medano	Pozo	909791	997630	20	4,40	1,27	3,46	Alta

Se observa que en los predios donde se realizaron pruebas de bombeo, el acuífero posee valores de productividad alta, Mayor de 1,1 L/s/m. Con estos resultados se puede inferir que el acuífero captado por los pozos testeados en el Área de Estudio posee una productividad alta.

Es necesario recordar, que para la delimitación de Unidades Hidrogeológicas, se toma en primera instancia la distribución de las unidades Geológicas y con base en los resultados de cada una de las variables que definen el acuífero, se clasificaron estos niveles y su productividad.

Los pozos evaluados mediante las pruebas de bombeo y recuperación, captan de un acuífero con alta productividad, con capacidad específica por encima de los 1,1 L/s/m, el cual se define en franjas ubicadas en la unidad A1. Para los fines específicos de este documento se adaptó la Unidad A1 a las condiciones litológicas del Área de Estudio, teniendo en cuenta la geología y lo evidenciado en los Sondeos Electricos Verticales SEV. Por ello la Unidad A1, se dividirá en dos unidades, A1-1 y A1-2, representando cada una, materiales inconsolidados con características litológicas e hidráulicas diferentes.

5.8.1 Unidad A1-1

Unidad Hidrogeológica conformada por Depósitos de Llanura Aluvial.

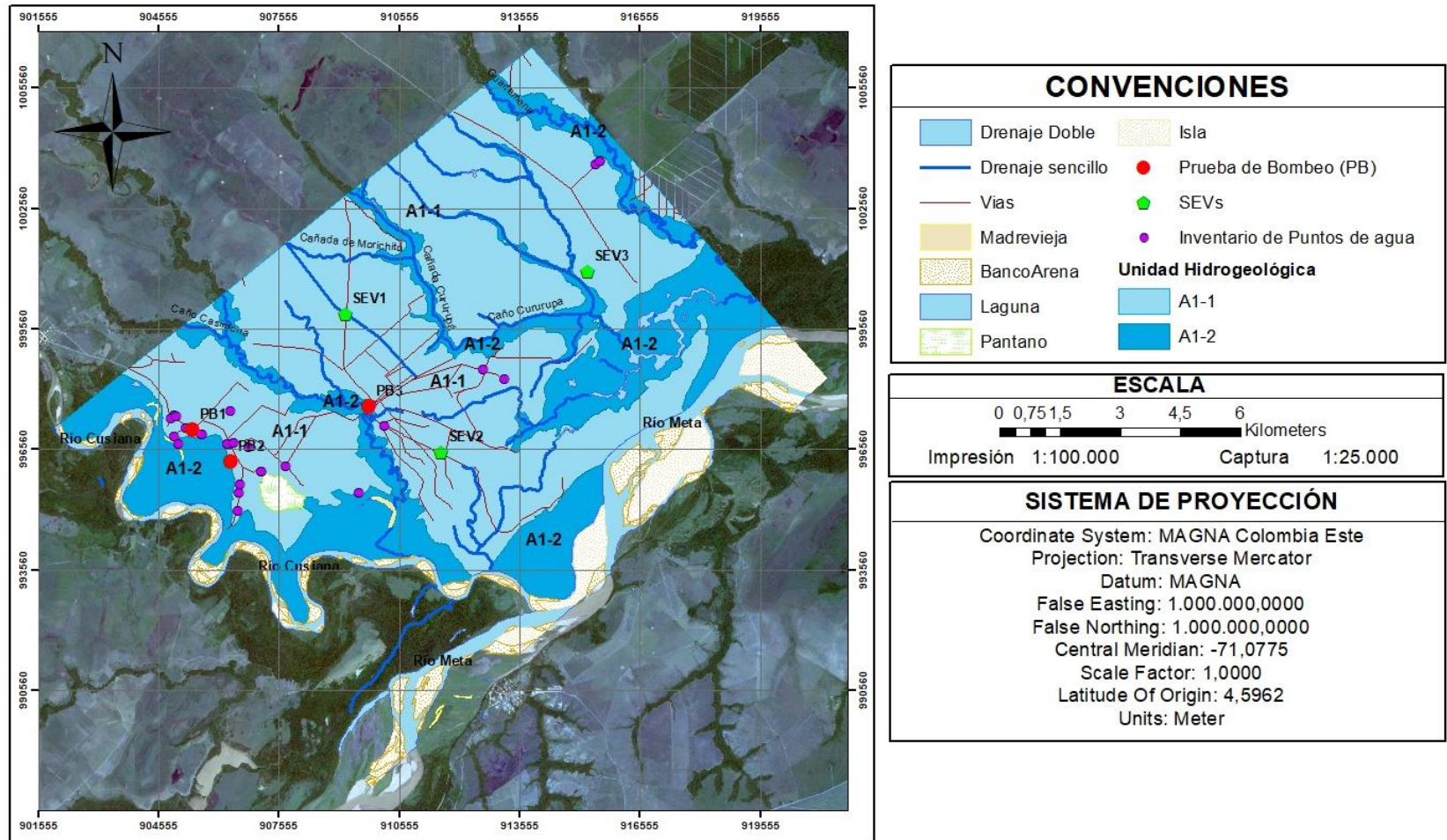
Esta unidad está definida debido a sus características litológicas e hidráulicas, capta niveles acuíferos con productividad alta. Litológicamente está conformada por secuencias de arcillas grises sin consolidar y arena de grano fino al tope de la formación; y arenas y gravas en la parte media y la base de la formación. La unidad representa acuíferos libres y semiconfinados de extensión regional con porosidad primaria. Reciben recarga directa producto de las lluvias, las cuales generan flujo subsuperficial que recargan las unidades que la infrayacen. Ver distribución en la Figura 26.

5.8.2 Unidad A1-2

Unidad Hidrogeológica conformada por Depósitos de Aluvión Reciente y Aluvión Reciente del Río Meta.

Esta unidad está definida debido a sus características litológicas. Está compuesta litológicamente por arena fina, limo, arcilla y algunas capas delgadas de lateritas ferruginosas. La unidad representa acuíferos semiconfinados de extensión local, relacionados con los cauces de los cuerpos de agua superficial. Tiene porosidad primaria ya que está compuesta por depósitos inconsolidados. La distribución final de las unidades hidrogeológicas se aprecia en la Figura 26.

Figura 26. Distribución de Unidades Hidrogeológicas en el Área de Estudio

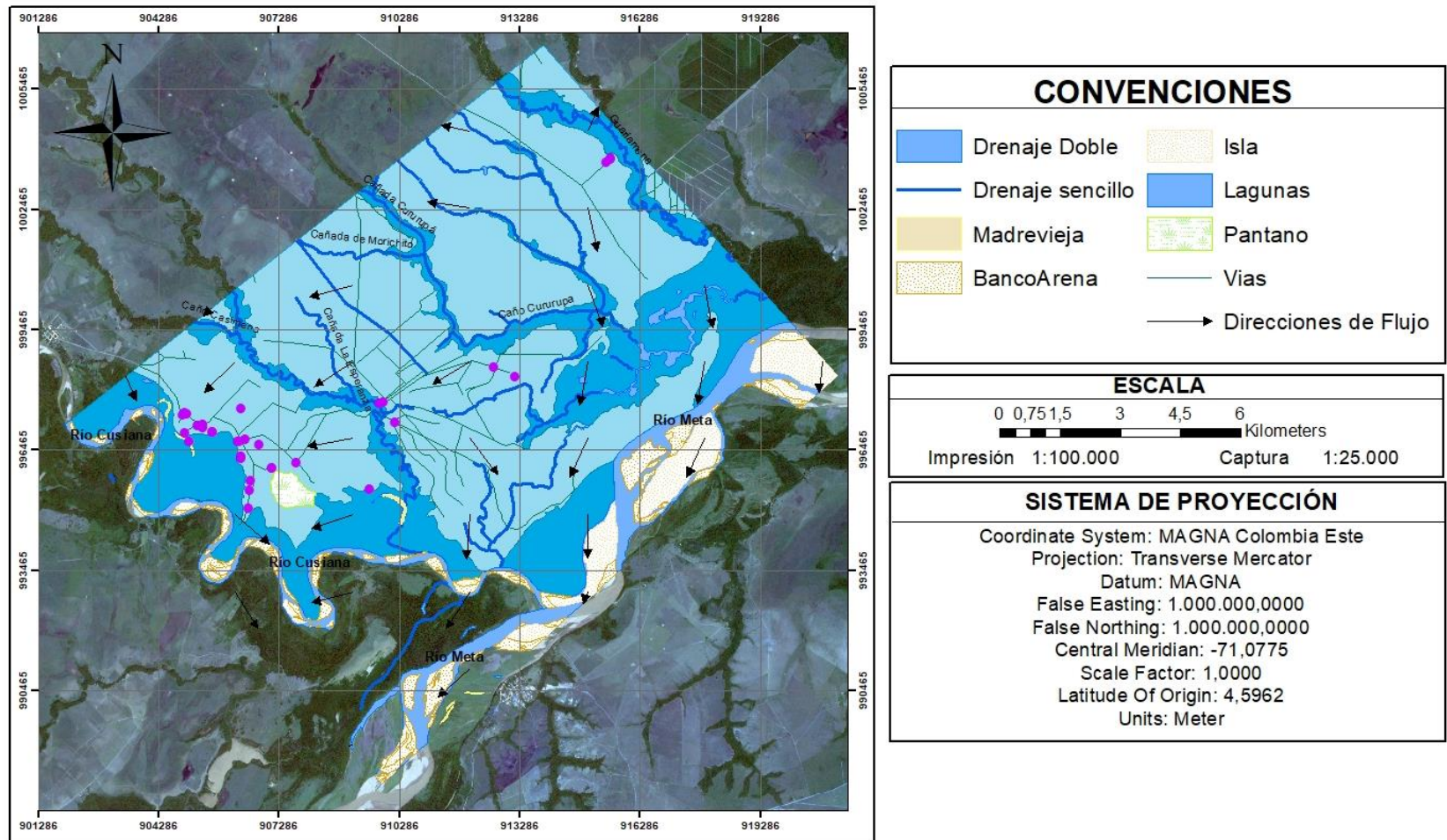


5.9 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

El Área de estudio está representada por un tipo de acuífero, semiconfinado de uso actual y potencial por la comunidad. La dirección de flujo subterráneo predominante para este es desde el noreste hacia el suroeste, acorde con la topografía del terreno. La dirección del flujo subterráneo se comporta de esta manera debido como se mencionó anteriormente a la topografía del terreno en donde, las zonas más bajas corresponden a los corredores de agua superficial, que de acuerdo a lo observado en campo hacen parte de las áreas de descarga del acuífero. Por lo tanto el agua subterránea tiende a moverse hacia las partes más deprimidas del área de estudio que funcionan como zonas de descarga.

Para Graficar las direcciones de flujo subterráneo se utilizó la información recopilada en el inventario de puntos de agua, donde se registró el nivel estático de cada uno de estos empleando una sonda de niveles con señal sonora. Los niveles estáticos fueron registrados en el mes de Noviembre de 2016, durante la fase de trabajo de campo. Para apreciar la dirección de flujo con respecto a las Área de estudio se presenta la Figura 27.

Figura 27. Direcciones de flujo de agua subterránea en el Área de Estudio

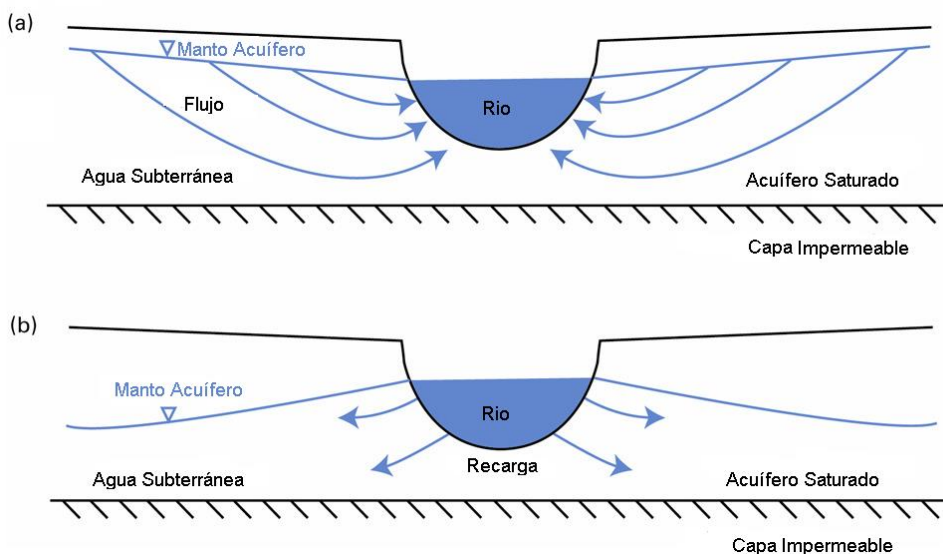


5.10 CONEXIONES HIDRÁULICAS

En el Área de Estudio en los meses de alta precipitación y en las zonas de alta permeabilidad y esteros se observa infiltración directa que contribuye a la recarga de las unidades hidrogeológicas. Los ríos Cusiana y Meta tienen interconexión hidráulica con los acuíferos, por lo tanto en épocas de alta precipitación estos ríos reciben agua del acuífero (Figura 28a).

En la temporada de Diciembre a Marzo hay una baja del nivel de agua en los acuíferos, esto a causa de un cambio en las variables exógenas (clima), ya que hay una disminución en el volumen de precipitaciones y hay un aumento en la temperatura, esta condición en esta época del año trae consigo que no haya recarga efectiva por precipitación, por ello durante esta época la recarga de los acuíferos en gran parte la realizan los cuerpos de agua superficial (Figura 28b).

Figura 28. Conexiones hidráulicas



Fuente IDEAM, 2013. Modificado por el autor.

5.11 ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA

El agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie. La renovación se produce lentamente cuando la comparamos con la de los depósitos superficiales, como los lagos, y los cursos de agua. En algunos casos la renovación está interrumpida por la impermeabilidad de las formaciones geológicas superiores (acuitardos), o por circunstancias climáticas sobrevenidas de aridez.

La descarga, es una movilización de agua que se da de forma natural, donde el agua subterránea logra interceptar la superficie. Esto dependerá de la pendiente (favorable al movimiento del agua), características físico-mecánicas de los materiales, así como de la ubicación de las principales corrientes de agua.

5.11.1 Zonas de recarga

5.11.1.1 Recarga por precipitación

Se presenta recarga en toda la extensión del Área de Estudio a través de las precipitaciones que pasan por un proceso de infiltración y posterior percolación del agua de lluvia, a lo largo de materiales de alta permeabilidad y pendiente moderada a baja. En estos puntos se ubican también horizontes impermeables, que ayudan a retener el agua y a descargarla de manera gradual en la época seca.

5.11.1.2 Recarga por cuerpos de agua superficiales

Corresponde a la recarga indirecta que aportan los cuerpos de agua superficiales hacia los acuíferos más cercanos, principalmente en temporada seca las corrientes de agua como ríos aportan un porcentaje de agua a los acuíferos en donde hay conectividad hidráulica.

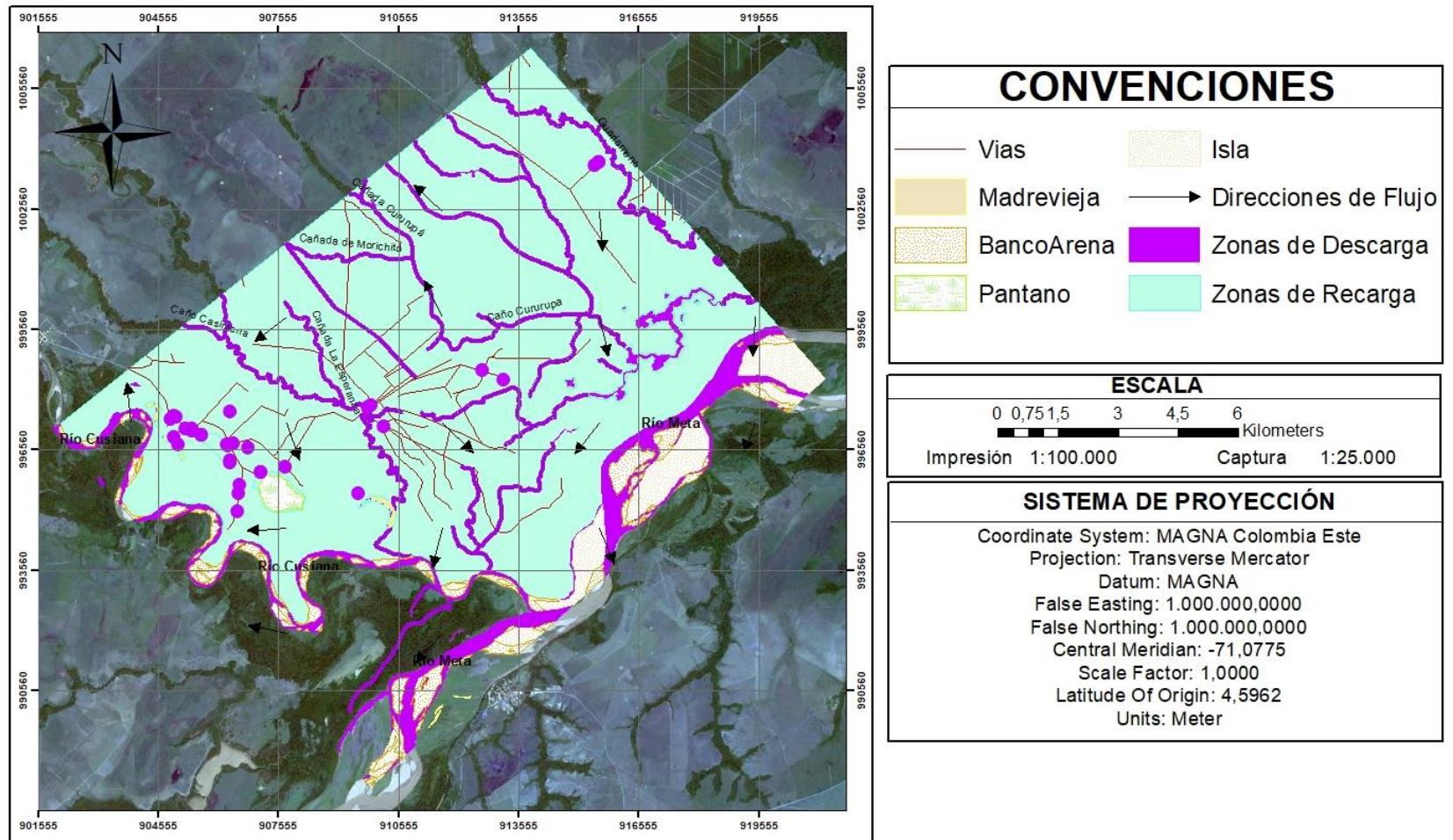
La recarga, se presenta en mayor proporción hacia los acuíferos más someros asociados a los depósitos cuaternarios. Es importante resaltar que la recarga al acuífero es potencial dado que, parte del agua que ingresa al primer nivel acuífero queda retenida en la zona vadosa para posteriormente evaporarse y la otra se transporta como flujo subsuperficial hacia los cuerpos de agua de la zona convirtiéndose en flujo superficial.

5.11.2 Zonas de descarga

Las zonas más deprimidas que en el caso del Área de Estudio son los corredores de los drenajes existentes, sirven de zonas de descarga del nivel freático, aportando agua al sistema hidrológico durante la temporada de invierno. Otra fuente importante de descarga corresponde a los pozos de agua y aljibes de la comunidad tanto para uso doméstico, pecuario y/o agrícola.

En la Figura 29 se presentan las zonas de recarga y descarga en el Área de Estudio.

Figura 29. Zonas de recarga y descarga en el Área de Estudio



5.12 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

5.12.1 Caracterización Fisicoquímica y Bacteriológica

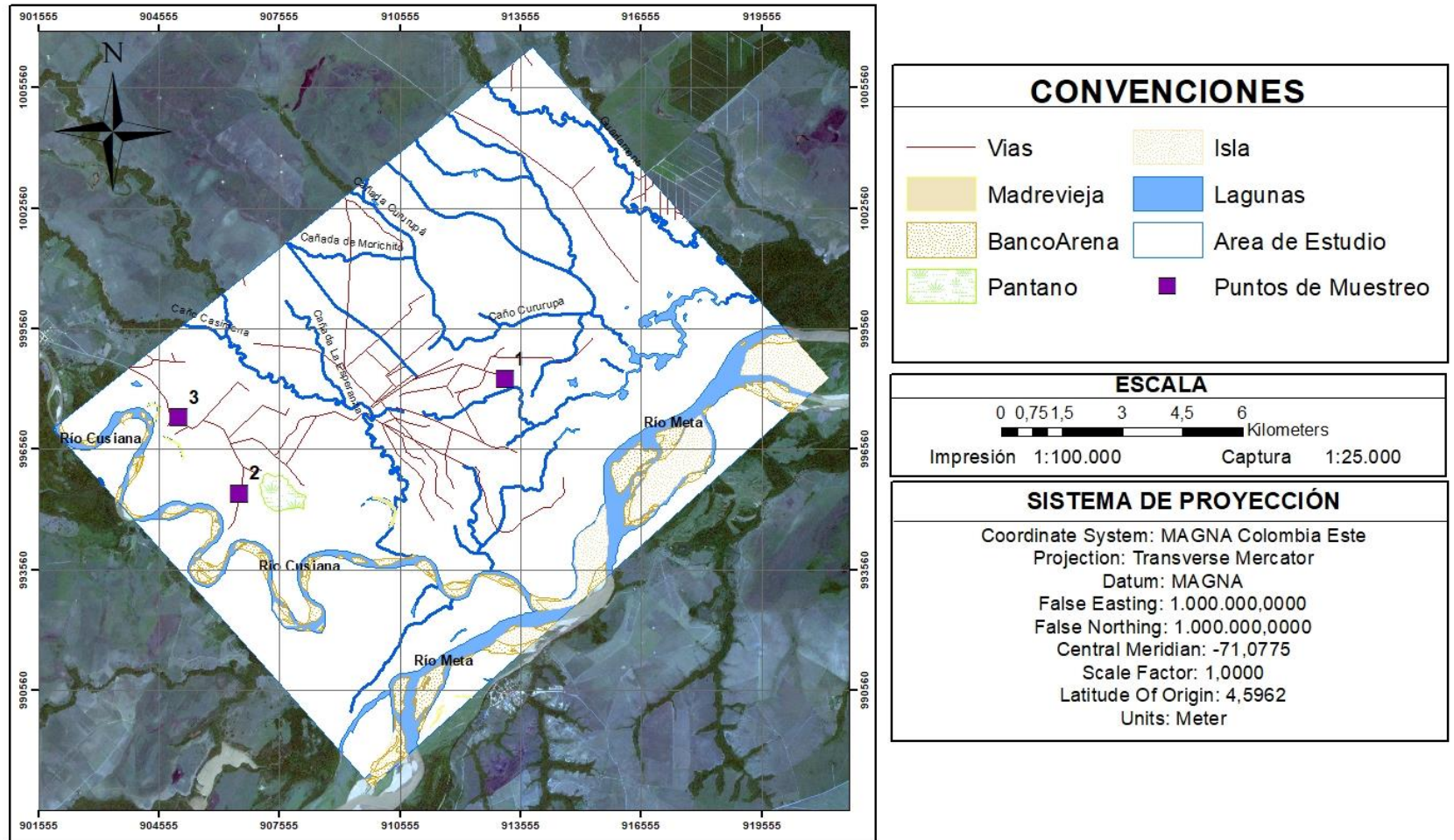
En la Tabla 36 se presenta la georreferenciación de todos los puntos de agua subterránea muestreados, y en la Figura 30 se puede ver la ubicación de los puntos de agua monitoreados. Las coordenadas de los puntos se reportan en Planas SRC Magna Sirgas Colombia – Origen Este.

Tabla 36. Georreferenciación de los puntos de muestreo

No. Punto	Nombre	Coordenadas Planas Magna Colombia Este	
		NORTE	ESTE
1	Piezómetro Morichito	998308,095	913179,379
2	Finca Buenavista	995467,810	906560,560
3	Escuela Guayanas	997359,196	905056,219

Fuente: CIMA 2016.

Figura 30. Localización de los pozos muestreados para el Área de Estudio



5.12.1.1 Resultados de las muestras

En los diferentes puntos de muestreo se realizó la caracterización fisicoquímica y bacteriológica teniendo en cuenta 63 parámetros. En las Tabla 37 y Tabla 38 se presentan los resultados in situ y de laboratorio para cada una de las temporadas, temporada seca y temporada de lluvias respectivamente de los parámetros necesarios para el desarrollo de los análisis fisicoquímicos a desarrollar en el presente proyecto.

Tabla 37. Resultados in situ y de laboratorio de los cuerpos de agua subterránea
(Temporada de lluvias)

Parámetro	Unidades	Resultados		
		1. Piezómetro Morichito	2. Finca Buenavista	3. Escuela Guayanas
Fecha	A-M-D	2016-12-12	2016-12-12	2016-12-13
Hora	h:min	8:00	10:00	15:00
Temperatura Ambiente	°C	30,8	32,8	30,4
Temperatura de la muestra	°C	31,8	28,1	29,0
pH	Unidades	5,67	4,80	5,58
Conductividad	μS/cm	11	32	13
Sólidos disueltos totales	mg/L	6	14	6
Oxígeno disuelto	mg/L	1,0	1,5	1,5

Parámetro	Unidades	Resultados		
		1. Piezómetro Morichito	2. Finca Buenavista	3. Escuela Guayanas
Fecha	A-M-D	2016-12-12	2016-12-12	2016-12-13
Hora	h:min	8:00	10:00	15:00
Bicarbonatos	mg/L CaCO_3	4,75	129,5	139,25
Calcio Total	mg/L	<0,2	<0,2	<0,2
Carbonatos	mg CaCO_3 /L	<1,89	<1,89	<1,89
Cloruros	mg/L Cl^-	<5	10	<5
Coliformes Fecales	NMP/100mL	<1	2	60
Coliformes Totales	NMP/100mL	<1	12	86
DBO5	mg/L O_2	14	6	17
DQO	mg/L O_2	45	62	68
Magnesio total	mg/L	0,1	0,1	<0,1
Material flotante		Ausente	Ausente	Ausente
Olor		Aceptable	Aceptable	Aceptable
Potasio	mg/L	0,7	1,5	0,3
Sabor		Aceptable	Aceptable	Aceptable
Sodio total	mg/L	0,90	2,30	1,60
% de Sodio posible	%	1,9	6,6	4,5
Sólidos suspendidos totales	mg/L	<5	7	<5
Sulfatos	mg/L SO_4^{2-}	<2	<2	<2
Turbiedad	NTU	1,13	3,23	1,44

Fuente C.I.M.A., 2017.

Tabla 38. Resultados in situ y de laboratorio de los cuerpos de agua subterránea (Temporada seca).

Parámetro	Unidades	Resultados		
		Piezómetro Morichito	Finca Buenavista	Escuela Guayanas
Fecha	A-M-D	2017-07-25	2017-01-25	2017-01-25
Hora	h:min	9:30	16:08	17:20
Temperatura Ambiente	°C	28	34	30
Temperatura de la muestra	°C	24	28	25
pH	Unidades	6,13	4,83	5,89
Conductividad	μS/cm	37	70	38
Sólidos disueltos totales	mg/L	22	43	23
Oxígeno disuelto	mg/L	4,3	3,14	4,35
Bicarbonatos	mg/L CaCO ₃	<10	<10	<10
Calcio Total	mg/L	<0,2	<0,2	<0,2
Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	<3	<3	<3
Cloruros	mg/L Cl ⁻	<5	<5	<5
Coliformes Fecales	NMP/100mL	<1	<1	<1
Coliformes Totales	NMP/100mL	39	<1	9
DBO5	mg/L O ₂	5	3	4
DQO	mg/L O ₂	12	<5	10
Magnesio total	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1

Parámetro	Unidades	Resultados		
		Piezómetro Morichito	Finca Buenavista	Escuela Guayanas
Fecha	A-M-D	2017-07-25	2017-01-25	2017-01-25
Hora	h:min	9:30	16:08	17:20
Material flotante		Ausente	Ausente	Ausente
Olor		Aceptable	Aceptable	Aceptable
Potasio	mg/L	0,5	1	0,4
Sabor		Aceptable	Aceptable	Aceptable
Sodio total	mg/L	0,9	1,8	1,8
% de Sodio posible	%	2,21	6,25	6,49
Sólidos suspendidos totales	mg/L	<5	<5	<5
Sulfatos	mg/L SO_4^{-2}	<2	<2	<2
Turbiedad	NTU	1,69	2,55	1,25

Fuente C.I.M.A., 2017

5.12.2 Índice de la Calidad del Agua (ICA)

Respecto a este índice es importante aclarar que está diseñado para la clasificación de aguas superficiales, en Colombia todavía no se han definido fórmulas para el cálculo del Índice de Calidad de Agua en aguas subterráneas, por lo tanto se calcula con la fórmula propuesta para el agua superficial con fines de tener un indicador de calidad.

5.12.2.1 Resultados

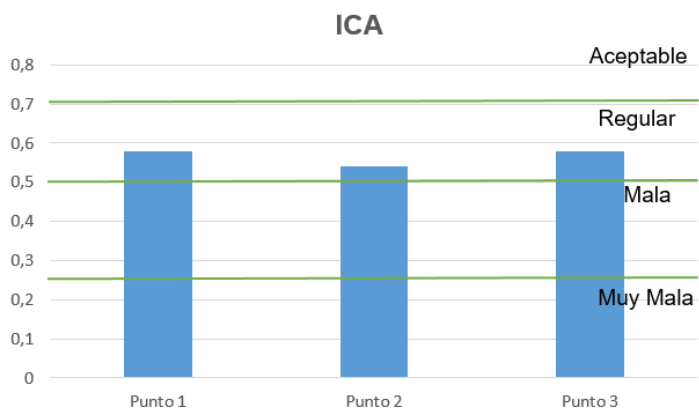
A partir de los datos de concentración de los parámetros de DQO, pH, Sólidos suspendidos totales, conductividad y oxígeno disuelto registrados en cada uno de los puntos muestreados se obtuvieron los resultados presentes en la Tabla 39. La hoja de cálculo de este parámetro se presenta en el Anexo E.

Tabla 39. Índice de Calidad del Agua (ICA).

Punto de Muestreo	ICA	Clasificación
Punto 1	0,58	Regular
Punto 2	0,54	Regular
Punto 3	0,58	Regular

El comportamiento del ICA en los diferentes puntos muestreados en el Área de Estudio se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Índice de Calidad del Agua



La clasificación del agua en los puntos es Regular, esto se debe a que los Índices de oxígeno disuelto y DQO son significativamente bajos, esto está relacionado con el hecho de que estos índices están relacionados con la presencia de especies acuáticas y materia orgánica respectivamente, que en el agua subterránea no son tan altos como en el agua superficial. Considerando lo anterior el agua subterránea en el área de estudio tiene buena calidad

5.12.3 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es una herramienta efectiva en la segregación analítica de datos para un estudio con respecto a los orígenes de los constituyentes disueltos en aguas. Las características y tipo del agua se pueden ver modificadas, por las propiedades del suelo y sus aniones y cationes.

5.12.3.1 Resultados

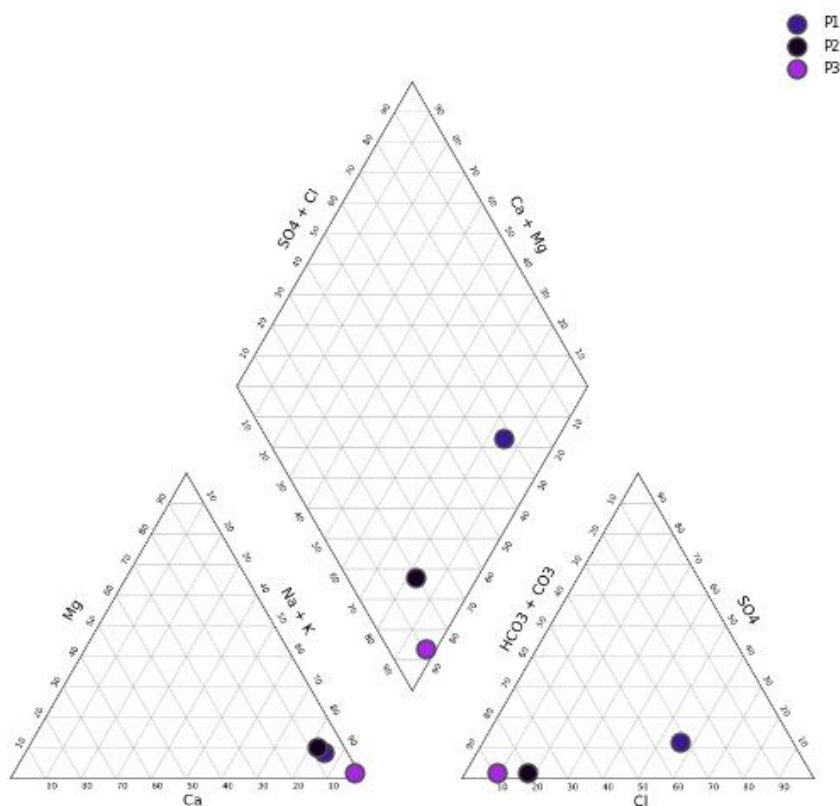
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio se realizó el Diagrama de Piper, los datos utilizados se presentan en la Tabla 40. En la Figura 32 se muestra la distribución y composición de las mismas.

Tabla 40. Datos utilizados para la elaboración del Diagrama de Piper.

Punto	Ca^{2+} (meq/L)	Mg^{2+} (meq/L)	Na^+ (meq/L)	K^+ (meq/L)	Cl^- (meq/L)	SO_4 (meq/L)	CO_3 (meq/L)	HCO_3^- (meq/L)
Punto 1	0,01	0,008	0,0391	0,1794	0,1412	0,042	0,0315	0,078

Punto 2	0,01	0,008	0,1	0,0384	0,2825	0,042	0,0315	2,123
Punto 3	0,01	0,008	0,695	0,0077	0,1412	0,042	0,0315	2,283

Figura 32. Resultados del Diagrama de Piper.



A continuación, se presenta la composición de cada punto a través de un diagrama de pie (torta), en el cual se podrá visualizar el porcentaje de cada elemento. Se podría decir que esto es información complementaria al diagrama de Piper, puesto que especifica a través de porcentajes, los contenidos de cationes (Na. K. Ca. Mg)

y aniones (Cl. SO₄. NO₃. HCO₃) presentes en cada una de las muestras. Este método permite seleccionar los constituyentes (iones) con más altos porcentajes, los cuales indicaran el tipo de agua presente en un área determinada. Para interpretar el diagrama, debe considerarse que para su construcción, es necesario que los iones estén reducidos a porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/L)

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio se realizó el Diagrama de Pie, los datos utilizados se presentan en la Tabla 41.

Tabla 41. Datos empleados para la elaboración de los Diagramas de Pie.

Punto	Ca^{2+} (meq/L)	Mg^{2+} (meq/L)	Na^{+} (meq/L)	K^{+} (meq/L)	Cl^{-} (meq/L)	SO_4 (meq/L)	HCO_3^{-} (meq/L)
Punto 1	0,01	0,008	0,0391	0,1794	0,1412	0,042	0,078
Punto 2	0,01	0,008	0,1	0,0384	0,2825	0,042	2,123
Punto 3	0,01	0,008	0,695	0,0077	0,1412	0,042	2,283

Figura 33. Gráficas de distribución con base en los resultados del Diagrama de Piper

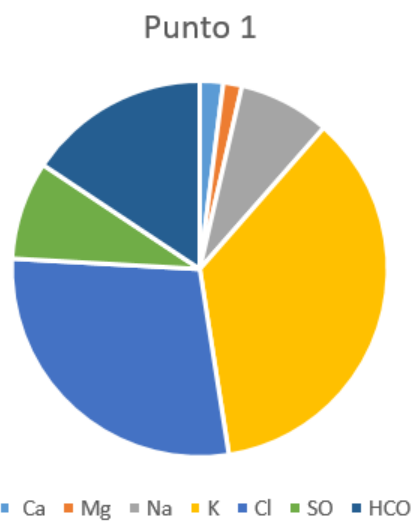


Diagrama de Pie Muestra Punto 1

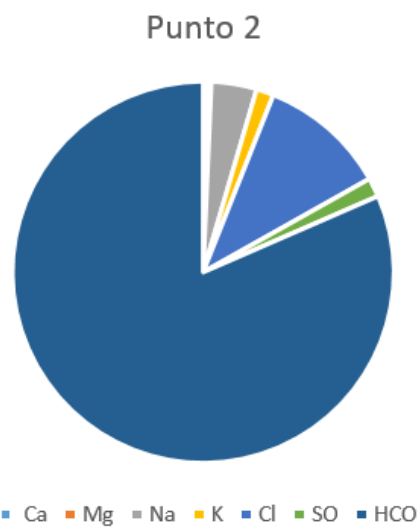


Diagrama de Pie Muestra Punto 2

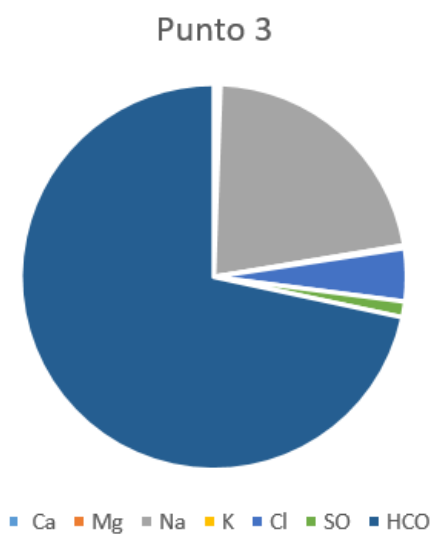


Diagrama de Pie Muestra Punto 3

Tabla 42. Resultados, clasificación de las aguas.

No. Punto	Nombre	Coordenadas Planas Magna Colombia Este		Clasificación del Agua
		NORTE	ESTE	
1	Piezometro Morichito	998308,095	913179,379	Cloruradas
2	Finca Buenavista	995467,810	906560,560	Bicarbonatadas Sódicas
3	Escuela Guayanas	997359,196	905056,219	Bicarbonatadas Sódicas

5.12.3.2 Análisis de resultados

Como se resume en la Tabla 42 se observa que en el Diagrama de Piper de la Figura 32 y en los diagramas de Pie de la Figura 33, en los puntos 2 y 3 el agua encontrada es agua bicarbonatada sódica, siendo la del punto 1 clorurada. De acuerdo a lo anterior, la mayor parte del agua encontrada es agua bicarbonatada, la cual es agua con poca permanencia en el subsuelo y que todavía no ha alcanzado el equilibrio con los minerales carbonatados del ambiente. El agua clorurada está relacionada con el agua lluvia, ya que esta es una fuente importante de cloro, además debido a las características del cloro, este no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es absorbido ni entra a formar parte de procesos bioquímicos.

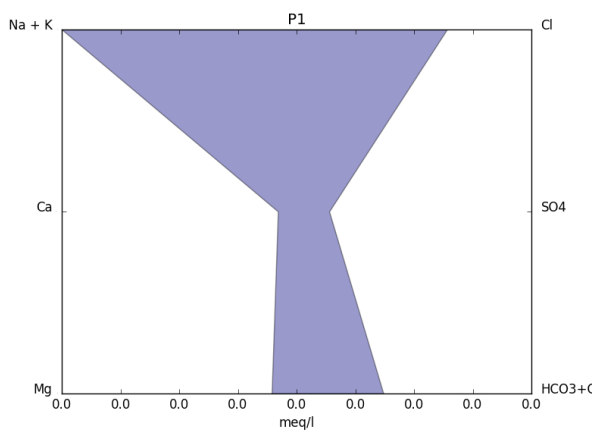
5.12.4 Balance Iónico - Diagrama de Stiff

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{2+} con el HCO_3^- y el Mg^{2+} con el SO_4^{2-} (a veces también se pueden mostrar otros dos iones, como el Fe^{+2} contra el NO_3^-). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L.

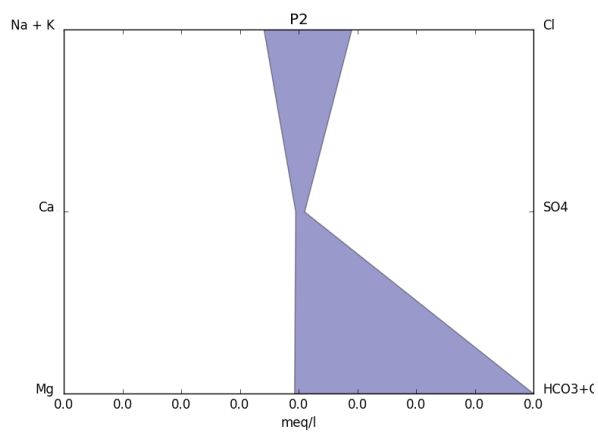
5.12.4.1 Resultados

En la Figura 34 se presentan los diagramas de Stiff para cada uno de los puntos donde se hizo muestreo de agua subterránea; para realizar estos diagramas se utilizó la información que se muestra en la Tabla 40. Al mismo tiempo, en la Figura 35 se visualizan los diagramas de Stiff para cada sitio donde se analizaron las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua; para así tener una idea de la variación de la composición química de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

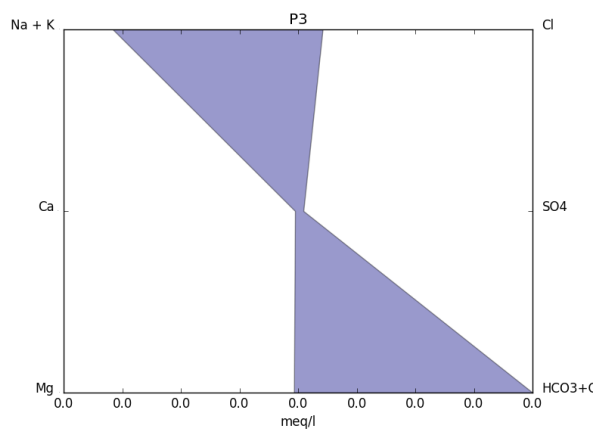
Figura 34. Resultados Diagrama de Stiff



Punto 1

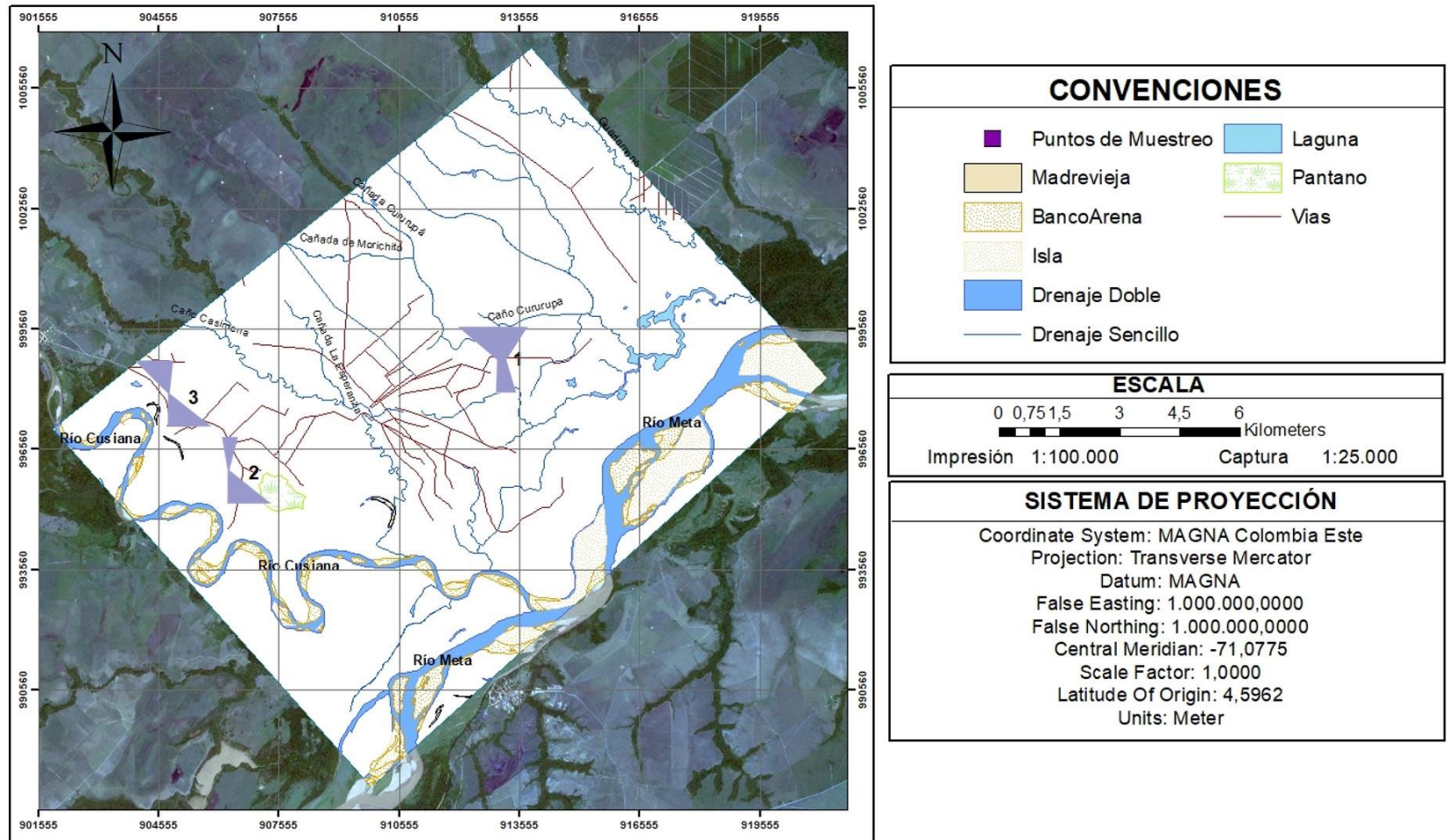


Punto 2



Punto 3

Figura 35. Localización resultados Diagrama de Stiff



5.12.4.2 Análisis de Resultados

En estos diagramas se observa que en el punto 1 hay concentraciones elevadas de aniones de cloro, por debajo se encuentra la concentración de bicarbonatos, que es también bastante abundante. En los puntos 2 y 3 hay concentraciones elevadas de aniones de bicarbonato, por debajo se encuentra la concentración de cloro. De lo anterior se deduce que, en los puntos muestreados, los iones con mayor concentración en el área son el bicarbonato y el cloro.

El dióxido de carbono disuelto en agua y los diversos compuestos que forma en ella juegan un papel importantísimo en la química del agua. El dióxido de carbono en el agua procede fundamentalmente de la zona edáfica (respiración de organismos y descomposición de la materia orgánica), este se disuelve en el agua en función de su presión parcial. Una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra reacciona con el agua para dar ácido carbónico que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato (IGME). De acuerdo a lo anterior, el alto contenido de bicarbonatos encontrados en las muestras, puede estar relacionado con la disolución y reacción del dióxido de carbono presente en el suelo con el agua.

Los altos contenidos de cloro están relacionados con el agua lluvia, ya que esta es una fuente importante de este, además debido a las características del cloro, este no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es absorbido ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador (IGME).

5.12.5 Índice de Saturación Langelier

El LSI indica la fuerza impulsora para la formación de incrustaciones y crecimiento, en términos del pH como la variable maestra. A fin de calcular el LSI, es necesario conocer la alcalinidad (CaCO_3 mg/l), la dureza cálcica (Ca^{2+} mg/l), los sólidos totales disueltos (mg/l STD), el pH actual, y la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$).

5.12.5.1.1 Resultados

En la Tabla 43 se muestran los resultados de los Índices de Saturación de Langelier para cada uno de los puntos muestreados en el Área de Estudio y su indicación de acuerdo a Langelier. En el Anexo F se presenta la hoja de cálculo del Índice de Saturación de Langelier.

Tabla 43. Cálculo del Índice de Saturación de Langelier.

Punto	pH	STD (mg/l)	A	Temperatura °C	B	Ca ²⁺ (mg/l)	C	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	D	pHs	LSI	Indicación basada en Langelier
Punto 1	5,67	6	-0,022	31,8	2,029	0,2	-1,099	4,75	0,677	11.73	-6.06	Agua no saturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO ₃). El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato cálcico (CaCO ₃) presentes que protegen las tuberías y equipos.
Punto 2	4,80	14	0,015	28,1	2,012	0,2	-1,099	129,5	2,112	10.31	-5.51	
Punto 3	5,58	6	-0,022	29	2,587	0,2	-1,099	139,25	2,144	10.82	-5.24	

5.13 VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En la Tabla 44 se resumen los parámetros para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, tomando en cuenta las unidades superficiales ya que estas son las que son captadas por la comunidad dentro del Área de estudio. El índice de vulnerabilidad se obtiene mediante la suma de los factores resultantes de la multiplicación de cada parámetro con el factor de ponderación.

A través de este análisis se pretende representar las características intrínsecas de los acuíferos delimitados, las cuales determinan la susceptibilidad de estos a ser afectados por un contaminante, se establece la facilidad con la que una sustancia puede llegar a modificar las propiedades fisicoquímicas de las unidades acuíferas mediante infiltración y percolación. En el Anexo G se presenta la hoja de cálculo para el potencial de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.

Tabla 44. Calculo de índice de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el Área de Estudio.

ID	Vereda	Predio	Coordenadas Magna Sirgas Origen Este		Tipo de punto	Profundidad (m)	Nivel estático (m)	D	R	A	S	T	I	C	Índice de vulnerabilidad
			Este	Norte											
1	Guayanas	Escuela Guayanas	905406	997034	Pozo	30	1,8	9	1	8	7	10	6	3	136
2	Guayanas	Pozo Morichito # 5	913194	998308	Piezóm etro	40	1,7	9	1	8	7	10	6	3	136
3	Guayanas	Guacamayas	906355	996262	Pozo	18	1,8	9	1	8	7	10	6	3	136
4	Guayanas	El Medano	909791	997630	Pozo	20	3,1	9	1	8	7	10	6	6	145
5	Guayanas	Cojedes	904951	997405	Pozo	24	1,4	10	1	8	7	10	6	3	141
6	Guayanas	Cojedes	904880	997345	Pozo	24	1,3	10	1	8	7	10	6	3	141
7	Guayanas	El Paraiso	904989	997384	Pozo		1,1	10	1	8	7	10	6	3	141
9	Guayanas	Cunaviche	905645	996932	Aljibe	5	1,9	9	1	8	7	10	6	3	136
11	Guayanas	Bellavista	906286	996688	Pozo	18	1,1	10	1	8	7	10	6	3	141
12	Guayanas	Bellavista	906276	996696	Aljibe	5	1,1	10	1	8	7	10	6	3	141
13	Guayanas	El Medano	909887	997675	Pozo	18	2,6	9	1	8	7	10	6	6	145
14	Guayanas	El Medano	910195	997156	Pozo	18	0,7	10	1	8	7	10	6	6	150
15	Guayanas	El Medano	912659	998547	Pozo	18	2,3	9	1	8	7	10	6	6	145
16	Guayanas	Los 3 Palos	905399	997113	Pozo		1,3	10	1	8	7	10	6	3	141
17	Guayanas	Guacamayas	906599	995696	Pozo	15	2,0	9	1	8	7	10	6	3	136
18	Guayanas	Guacamayas	906801	996612	Pozo	18	1,2	10	1	8	7	10	6	3	141
19	Guayanas	Guacamayas	906340	996317	Aljibe	11	1,0	10	1	8	7	10	6	3	141
20	Guayanas	Miralindo	909552	995490	Aljibe	8	0,9	10	1	8	7	10	6	3	141
21	Guayanas	Miralindo	906560	995471	Pozo	18	2,2	9	1	8	7	10	6	3	136
23	Guayanas	Mis Deseos	907117	996018	Aljibe	8	1,3	10	1	8	7	10	6	6	150

24	Guayanas	Mis Deseos	907126	996016	Pozo	24	2,2	9	1	8	7	10	6	6	145
25	Guayanas	Bellavista	906441	996740	Pozo	64	1,4	10	1	8	7	10	6	3	141
26	Guayanas	Bello Horizonte	915563	1003753	Pozo		3,5	9	1	8	7	10	6	3	136
27	Guayanas	Bello Horizonte	915466	1003659	Pozo		4,8	7	1	8	7	10	6	3	126
30	Guayanas	Barcelona	904949	996893	Pozo	8	0,3	10	1	8	7	10	6	3	141
31	Guayanas	Barcelona	905051	996696	Pozo		1,4	10	1	8	7	10	6	3	141
32	Guayanas	Barcelona	905248	997093	Pozo		1,4	10	1	8	7	10	6	3	141

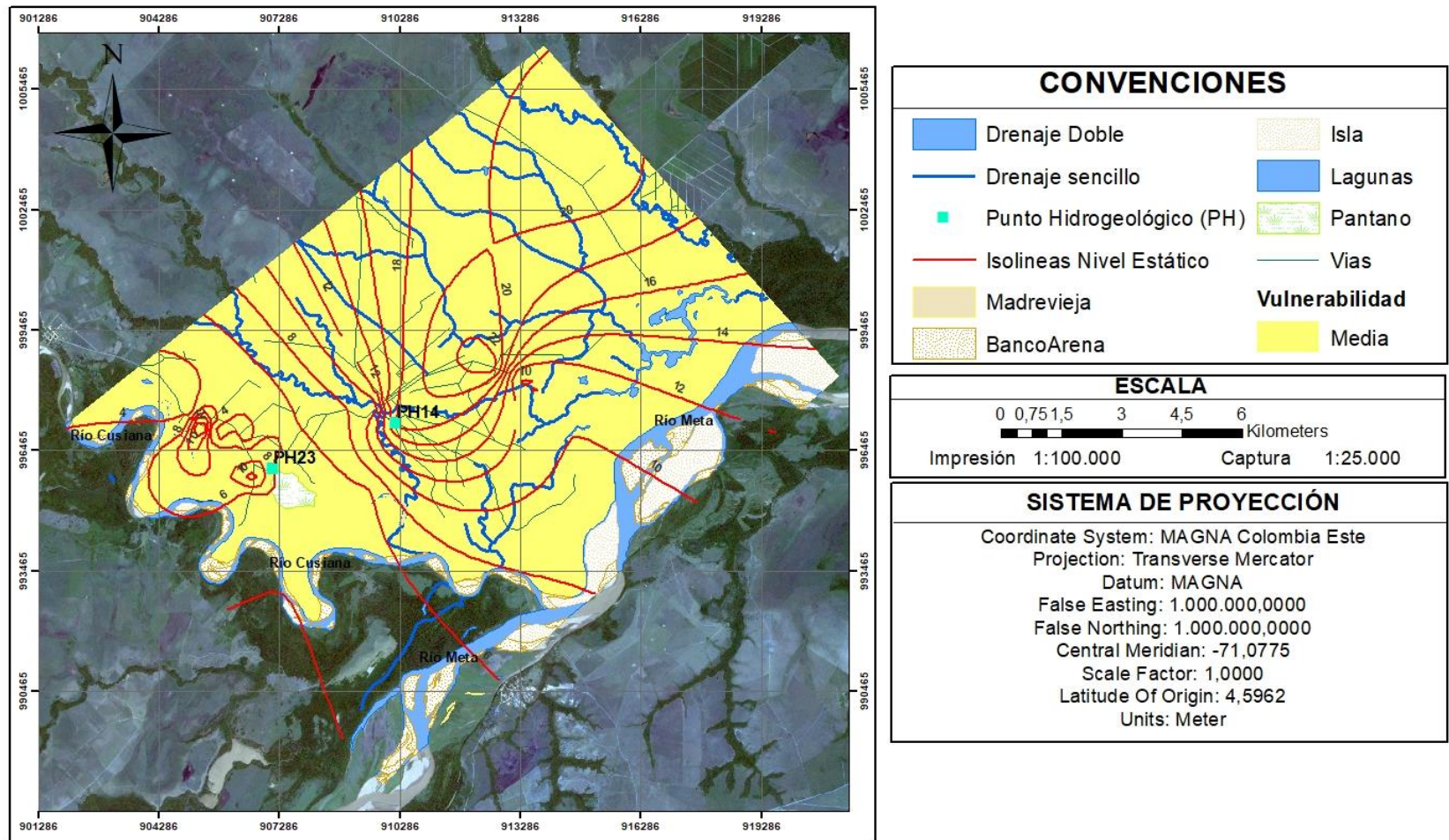
Con respecto a la clasificación para la vulnerabilidad a la contaminación, en la Tabla 44 se pudieron apreciar los índices que se obtuvieron aplicando los parámetros definidos para el método DRASTIC. El rango calculado en los resultados se encuentra entre los 126 y los 150, siendo este el resultado de la multiplicación de cada una de las variables con su respectivo valor de ponderación y posteriormente, la suma de las variables analizadas en cada uno de los pozos inventariados.

Los rangos obtenidos para el Área de Estudio se localizan de manera general en un rango de Vulnerabilidad Moderado. Esto podría deberse a que en la zona los acuíferos definidos son someros y de tipo principalmente libre y algunos semiconfinados. A pesar de esto, de acuerdo a lo observado en campo la probabilidad de que las zonas acuíferas sean contaminadas es moderada a baja ya que gran parte de las zonas acuíferas en el Área de Estudio cuentan con capas confinantes compuestas principalmente por arcilla que filtran y/o hacen más lento el paso de contaminantes a los niveles hidrogeológicos.

En la Tabla 44 se observan que en los puntos 14 y 23 el índice de vulnerabilidad es 150, el cual los clasifica como zonas con alta vulnerabilidad a la contaminación, en estos puntos el alto grado de conductividad de las unidades acuíferas y la poca profundidad que tiene la tabla de agua, 0.7 m y 1.3 m respectivamente, son los que hacen que el índice de vulnerabilidad sea un poco más alto que en los demás. Además, es importante tener en cuenta que a pesar de que es un índice que los clasifica como vulnerabilidad alta, es un valor que se encuentra en el límite entre vulnerabilidad alta y moderada y a su vez son solo 2 puntos los cuales no son representativos dentro de la población de muestreo de los 32 puntos de agua levantados (excluyendo el Piezómetro).

En este orden de ideas, el comportamiento de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el área de estudio es homogéneo, ya que los niveles captados se localizan dentro de unidades que poseen composiciones litológicas de origen aluvial, lo que da pie a que la misma permanezca en un rango moderado en toda el área. A su vez, todos los pozos de la comunidad captan de unidades que se localizan hasta 64 m de profundidad, lo que indica, que utilizan los mismos niveles acuíferos más someros. No obstante, es importante recordar que la continuidad lateral tanto de las capas que filtran como de los niveles acuíferos pueden variar a lo largo del área. Empero, al mismo tiempo es una zona de origen fluvial, que cuenta con capas filtrantes compuestas por materiales como arcillas, los cuales ayudan a intensificar la acción sellante para el paso de los posibles contaminantes a las zonas acuíferas de importancia para la comunidad.

Figura 36. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos.



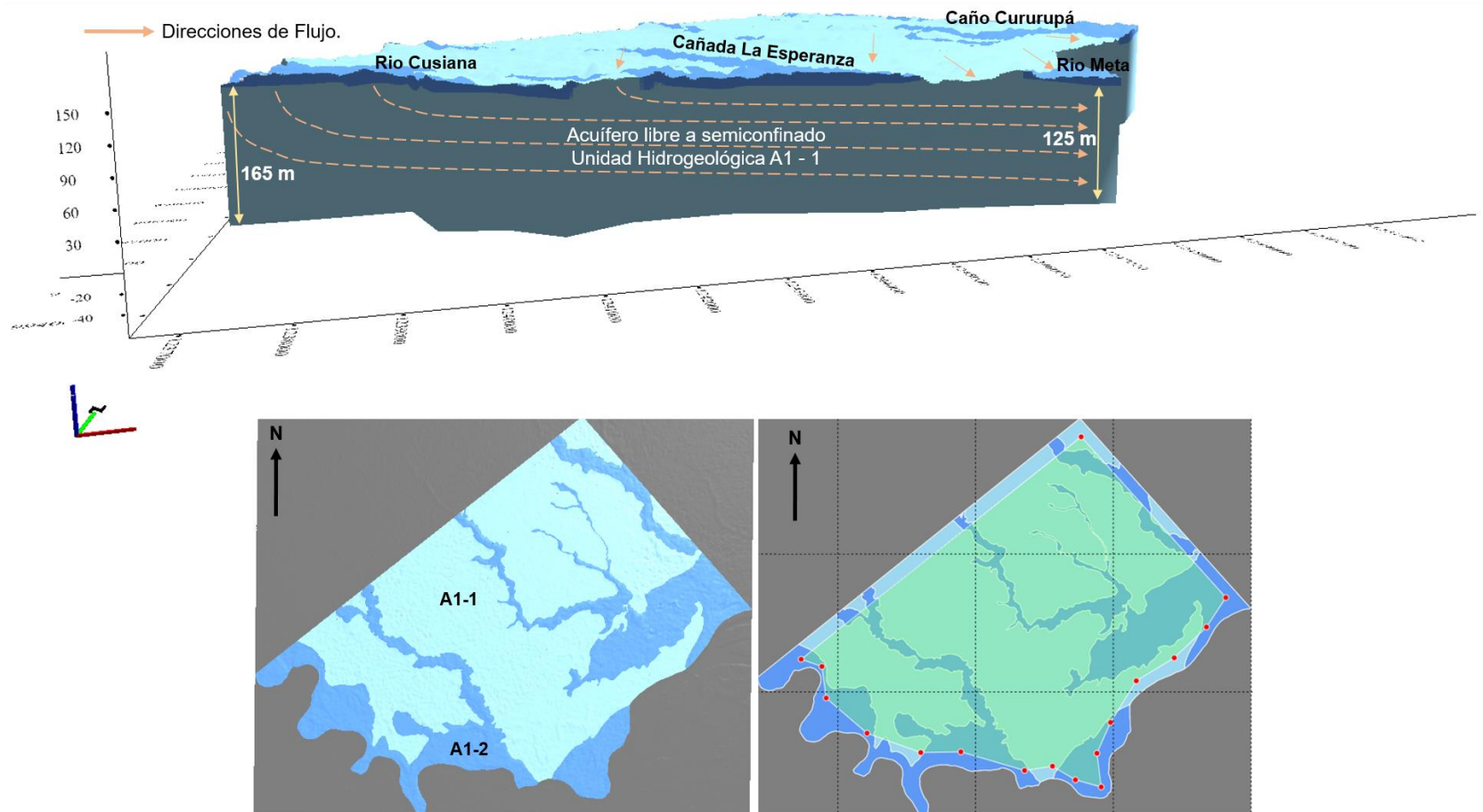
5.14 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

El área de estudio se ubica en la provincia hidrogeológica de los llanos orientales que hace parte de las provincias hidrogeológicas pericratónicas, las cuales tienen sistemas acuíferos extensos, continuos y están asociados a depósitos aluviales de gran extensión, terrazas de piedemonte de grandes ríos, entre otros. El área de estudio hace parte del sistema acuífero de Yopal – Tauramena, el cual se encuentra localizado en abanicos aluviales de origen torrencial y terrazas. Topográficamente la zona es plana con pendientes menores al 3%, el punto más alto topográficamente se encuentra a 165 msnm y el punto más bajo a 125 msnm.

Geológicamente el área está localizada sobre un gran depósito cuaternario de origen aluvial que conforma la extensa llanura característica de la Cuenca de los Llanos Orientales; la cual está disectada por los caños Casimena, Cururupá, Guariamena, entre otros menores, y por cauces principales tales como los ríos Meta y Cusiana. Los caños principales y los ríos mantienen interconexión hidráulica con los acuíferos asociados a los Depósitos Cuaternarios; en este caso la conexión posibilita la descarga de los acuíferos.

En el terreno afloran Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla) asociados a la unidad Hidrogeológica A1-1, relacionado con las planicies que conforman el área. Y la Unidad A1-2, la cual incluye los Depósitos Aluvial Reciente (Qar) y Depósito Aluvial de los ríos Meta y Cusiana (Qarmc), Unidades por donde drenan las principales corrientes que conforman el área de influencia. En la Figura 37 se presenta un bloque diagrama con la distribución de las unidades hidrogeológicas definidas en el área de estudio.

Figura 37. Bloque Diagrama de las unidades Hidrogeológicas.



De acuerdo a la información obtenida en campo la unidad hidrógeológica aprovechada por la comunidad corresponde a la unidad A1-1 que en el área alcanza espesores de hasta 150m. Esta unidad se clasifica como un acuífero libre a semiconfinado de extensión regional con alta productividad y transmisividad (T) de aproximadamente 450 m²/día, lo que la clasifica como un acuífero con buena capacidad para transmitir el agua dentro de la formación. La conductividad hidráulica de la unidad es del orden de magnitud de 42 m/día lo que cataloga a la unidad como un acuífero bueno y permeable constituido principalmente por arena gruesa.

La unidad hidrogeológica A1-2 representa acuíferos semiconfinados de extensión local, relacionados con los cauces de los cuerpos de agua superficial. De acuerdo a su litología esta unidad se clasificaría como un acuífero pobre con espesores de no más de 10m.

La dirección de flujo subterráneo predominante en el área va en sentido NE – SW. La recarga del acuífero utilizado por la comunidad, se da principalmente a través de infiltración del agua de lluvia, a través de los depósitos cuaternarios, percolando a niveles más profundos. Las zonas más deprimidas sirven de áreas de descarga del nivel freático, aportando agua al sistema hidrológico durante la temporada de invierno. De acuerdo con el inventario de puntos de agua subterránea, el nivel freático es somero y se encuentra entre los 1 m y 5 m de profundidad. La vulnerabilidad a la contaminación del acuífero se clasifica como moderada.

Químicamente en el agua subterránea los iones con mayor concentración son el bicarbonato y el cloro, lo que clasifica al agua como principalmente bicarbonatada

hacia el SW y clorurada hacia el NE. Esto indica que el agua encontrada en la zona de estudio es agua con poca permanencia en el subsuelo proveniente principalmente de recarga por agua lluvia.

6 CONCLUSIONES

Regionalmente el área de estudio se localiza sobre la cuenca de los llanos orientales en donde los depósitos geológicos que se encuentran son principalmente depósitos de tipo cuaternario asociados a depósitos aluviales de gran extensión, terrazas de piedemonte de grandes ríos y depósitos aluviales recientes. Los acuíferos relacionados con este tipo de depósitos son por lo general extensos y continuos.

Localmente la zona de interés cuenta con 3 unidades geológicas superficiales: Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla), Depósitos Aluvial Reciente (Qar) y Depósito Aluvial de los ríos Meta y Cusiana (Qarmc). En superficie estos depósitos están compuestos litológicamente por material fino tipo arcilla, limo y arena fina producto del alto grado de meteorización a la que se encuentra sometida la región, sobre todo durante época de lluvias (abril a octubre). A aproximadamente 7 m de profundidad de acuerdo a lo observado en los resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales la litología cambia a material más grueso de tipo arenas y gravas, ideal para el desarrollo de acuíferos.

Los sistemas acuíferos definidos en el área se relacionan directamente con las unidades geológicas definidas siendo así la unidad Hidrogeológica A1 – 1 relacionada con los Depósitos de Llanura Aluvial (Qlla) y la Unidad A1-2 la cual incluye los Depósitos Aluvial Reciente (Qar) y Depósito Aluvial de los ríos Meta y Cusiana (Qarmc).

De acuerdo al inventario de puntos de agua realizado en el área hay un total de 32 puntos. De estos puntos, 26 corresponden a pozos profundos, 5 son aljibes y un piezómetro. Respecto a los pozos profundos, 13 son productivos, 12 son de reserva

y 1 está abandonado; el pozo productivo más profundo tiene una profundidad de 30m y se encuentra en el predio Escuela Guayanas (ID 1), el pozo de reserva más profundo tiene una profundidad de 64m y se encuentra en el predio Bellavista (ID 25), el pozo productivo menos profundo tiene una profundidad de 8m y se encuentra en el predio Barcelona (ID 29), el pozo de reserva menos profundo tiene una profundidad de 15m y se encuentra en el predio Guacamayas (ID 17). En cuanto a los aljibes, 1 es productivo, 3 son de reserva y 1 se encuentra en abandono; Los aljibes con menor profundidad tienen 5m y se encuentra localizados en los predios Bellavista (ID 12) y Cunaviche (ID 9).

La unidad hidrogeológica aprovechada por la comunidad es la unidad A1 – 1; la cual tiene un coeficiente de transmisividad alto con una magnitud de 450 m²/día y una conductividad hidráulica de 42 m/día. Estos parámetros hidráulicos se relacionan con acuíferos buenos, permeables, con buena capacidad para transmitir agua dentro de la Formación y constituidos principalmente por material grueso, tipo arena y grava. De acuerdo a la información de capacidad específica el acuífero presenta productividad alta por encima de los 1.1 L/s/m lo cual define acuíferos en sedimentos inconsolidados con porosidad primaria. La dirección de flujo de agua subterránea predominante en el área es del NE al SW, concordante con la topografía del área.

La calidad del agua subterránea en el área de estudio en general es buena, el uso que se le pueda dar a esta depende en gran medida de las condiciones de los puntos de agua y el mantenimiento que se les haga a estos y a la unidad de almacenamiento del agua.

La composición química del agua subterránea presenta alta concentración de iones de bicarbonato y cloro, lo cual indica que el agua encontrada en la zona de estudio

es agua con poca permanencia en el subsuelo proveniente principalmente de recarga por agua lluvia.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, R., y HERNÁNDEZ, Y. Modelamiento y Análisis Estructural del Anticlinal de Medina, Piedemonte de los Llanos Orientales. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga. 2004. Trabajo de Grado, 135p.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. Bogotá D.C. 2012. 92p.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Llanos Orientales: Integración geológica de la digitalización de núcleos. Bogotá D.C. 2012. 209p

ALLER, Linda; LEHR H, Jay y PETTY, Rebecca. Drastic: a estandarized system to evaluate grounwater pollution potntial using hydrogeologic settings. Columbus, Ohio. 1987. 20p.

BATISTA PIERA, Eduardo. VIII Curso hispanoamericano en hidrología subterránea. Montevideo, Uruguay. 2014. 86p.

TOVAR BONILLA, Camilo. Estudio Geoeléctrico para la determinación de la ubicación de cinco pozos exploratorios para agua subterránea en el bloque morichitos, municipios de Maní y Orocué (Casanare). DCX S.A.S. Neiva. 2016. 29p.

BROWN, Robert, *et al.* A Water Quality Index—Do We Dare? Water & Sewage Works. Madison. 1970. 5p.

CUSTODIO, Emilio y LLAMAS, Ramón. Hidrología Subterránea Tomo I. Barcelona. 1983. Ediciones Omega S.A. 512p.

DCX S.A.S. Estudio de Impacto Ambiental del Área de Explotación Morichito. Bogotá D.C. 2018. 505p.

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Manual de Taludes. Madrid. 1986. 455p.

SCHOELLER, Herbert. Geochemie des eaux souterraines. Paris: Institut Francais du Petrole. 1962. 642p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Hoja metodológica del índice de calidad del agua. Bogotá D.C. 2011. 11p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá D.C. 2013. Comité de comunicaciones y publicaciones del IDEAM. 47p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Fichas síntesis de sistemas acuíferos y aguas subterráneas frente a indicadores. Bogotá D.C. 2014. Comité de comunicaciones y publicaciones del IDEAM. 77p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (INGEOMINAS). Programa de Exploración de Aguas Subterráneas. Bogotá D.C. 2004.

INGEOMINAS y UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (UIS). Geología del piedemonte llanero en la cordillera oriental, departamentos de Arauca y Casanare. Bucaramanga. 2010. 64p.

KEHEW, Alan. Applied Chemical Hydrogeology. Upper Saddle River. 2001. Prentice Hall. 497p.

MANZANO ARELLANO, Marisol. Interpretación de un ensayo de bombeo en un acuífero cautivo en régimen variable. España. UPCT. 2008. 30p.

MARTINEZ ALFARO, Pedro Emilio; MARTINEZ SANTOS, Pedro y CASTAÑO CASTAÑO, Silvino. Fundamentos de hidrogeología. Madrid. Mundi Prensa Libros S.A. 2006. ISBN 84-8476-239-4. 284p.

IDEAM Y MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Principios Básicos para el Conocimiento y Monitoreo de las Aguas Subterráneas en Colombia. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. 2015. 91p.

VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Hidráulica de aguas subterráneas 2da Edición. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1999. 156p.

PIPER, Arthur M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. American Geophysical Union. 1944. 14p.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA (UNESCO). El agua, una responsabilidad compartida. 2 Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. 2006. 52p.

SÁNCHEZ SAN ROMAN, Julio. Evolución Geoquímica de las Aguas Subterráneas. Salamanca. 2012. Universidad de Salamanca. (Recuperado en 12 de Junio de 2019) Disponible en http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf . 9p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). The Water Cycle [En línea]. (Recuperado en 12 de Junio de 2019) Disponible en https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/water-cycle-adults-and-advanced-students?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects