

**MÁSTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

PROYECTO DE FIN DE MÁSTER

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARA EL MUNICIPIO DE
YONDÓ – ANTIOQUIA A PARTIR DE INFORMACIÓN SECUNDARIA**

**CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL FOR THE MUNICIPALITY OF
YONDÓ - ANTIOQUIA BASED ON SECONDARY INFORMATION.**

PRESENTADO POR:

D. KARINA LIZZETT MARTINEZ CASTAÑO

DIRIGIDO POR:

Dr. FRANCISCO JAVIER MONTALVAN TOALA

Dr. FRANCISCO CARREÑO CONDE|

Alcalá de Henares, febrero de 2023.

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	7
2.	INTRODUCCIÓN	8
3.	OBJETIVOS	10
3.1	Objetivo General.....	10
3.2	Objetivos específicos.....	10
4.	SITUACIÓN GEOGRÁFICA	11
5.	METODOLOGÍA DE TRABAJO	12
5.1	Recopilación, depuración y análisis de información bibliográfica del área de estudio	12
5.2	Modelo geológico básico	12
5.3	Modelo hidrológico básico	12
5.4	Caracterización Hidráulica.....	13
6.	MATERIALES	14
6.1	Modelo Hidrológico básico.....	14
6.1.1	Cartografía geológica disponible.....	14
6.1.2	Geofísica	14
6.2	Modelo Hidrológico básico.....	15
6.2.1	Inventario de puntos de agua subterránea.....	15
6.2.2	Hidroclimatología.....	16
6.3	Caracterización Hidráulica	16
6.3.1	Ensayos hidráulicos.....	16
7.	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	17
7.1	Modelo geológico básico	17
7.1.1	Geología regional	17
7.1.2	Hidrogeología regional.....	23
7.2	Modelo hidrológico básico	31

7.2.1	Inventario de puntos de agua	31
7.2.2	Balance hídrico.....	32
7.2.2.10	<i>Recarga potencial del acuífero</i>	40
7.2.3	Dirección de flujo y niveles piezométricos.....	42
7.3	Caracterización hidráulica.....	43
8.	DISCUSIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PLANTEADO.....	48
9.	CONCLUSIONES GENERALES DEL MODELO	51
10.	BIBLIOGRAFÍA	53
11.	ANEXO.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización regional del área de estudio. Municipio de Yondó, Antioquia.	11
Figura 2. Estructura metodológica para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual. OP: Objetivo principal. OE: Objetivo específico.	13
Figura 3. Geología Regional del área de estudio Yondó - Antioquia.	18
Figura 4. A. Registro geoelectrico de pozo de referencia (PERCONSA), B. Curva de resistividad eléctrica (PERCONSA), C. Curva de resistividad eléctrica (Vélez, 2001).	20
Figura 5. Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV'S), Registros Eléctricos de Pozo (REP) y dirección de los cortes geoelectricos (línea roja).	21
Figura 6. Sección Geoelectrica A – A'	22
Figura 7. Sección Geoelectrica B – B'	23
Figura 8 . Provincia hidrogeológica Valle Medio del Magdalena	24
Figura 9. Mapa de Unidades Hidrogeológica.	28
Figura 10. Inventario de puntos de agua.	31
Figura 11. Esquema de variables para evaluar.	33
Figura 12. Precipitación promedio de la estación Yondó y Ramplas.	34
Figura 13. Recarga potencial mensual.	41
Figura 14. Nivel piezométrico y dirección de flujo.	43
Figura 15. Localización de pruebas de bombeo.	44
Figura 16. Perfil hidráulico.	47
Figura 17. Modelo Hidrológico Conceptual del municipio de Yondó.	50
Figura 18. Localización de las estaciones meteorológicas.	68
Figura 19. Precipitación anual promedio	68
Figura 20. Coeficiente de infiltración por textura de suelo.	69

Figura 21. Coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente.....	69
Figura 22. Coeficiente de infiltración por cobertura.....	70
Figura 23. Coeficiente de infiltración C_i	70
Figura 24. Infiltración Pluvial mensual.....	71
Figura 25. Escorrentía.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales para la elaboración de modelo hidrogeológico conceptual. ...	14
Tabla 2. Estudios geoelectrónicos consultados.....	15
Tabla 3. Captaciones de agua subterránea.	16
Tabla 4. Precipitación promedio mensual multianual (mm).....	35
Tabla 5. Balance hídrico Yondó Antioquia	40
Tabla 6. Volumen (mm) de recarga mensual generada por formación.	42
Tabla 7. Transmisividad hidráulica de acuerdo con el tipo de acuífero	44
Tabla 8. Formaciones geológicas de la zona de estudio.....	57
Tabla 9. Características de las unidades hidrogeológicas.	64
Tabla 10. Características hidráulicas de los pozos profundos existentes.	67

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Balance Hídrico subsuperficial.....	40
--	----

ABREVIATURAS

ANH: Agencia Nacional de Hidrocarburos.

CER: Centros Educativos Rurales.

ETP: Evapotranspiración.

ETR: Evapotranspiración Real.

ENA: Estudio Nacional del Agua.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

LPS: Litros por segundo.

OB: Objetivo General

OE: Objetivo Especifico

REP: Registros Eléctricos de Pozo

SGC: Servicio Geológico Colombiano.

SEV: Sondeos Eléctricos Verticales.

SAM1.1: Sistema Acuífero Nare-Berrío-Yondó.

TFM: Tesis de Fin de Máster.

VMM: Valle Medio del Magdalena.

1. RESUMEN

Una de las principales fuentes de abastecimiento de recurso hídrico para el consumo en el municipio de Yondó – Antioquia proviene de aguas subterráneas; sin embargo, se carece de un plan adecuado de explotación de este recurso, lo que puede causar escases y contaminación de las fuentes, teniendo en cuenta que en la zona también se evidencia actividades económicas críticas como la explotación de hidrocarburos.

Este trabajo presenta un modelo hidrológico conceptual que permite tener una perspectiva del conocimiento respecto a la dinámica del agua en el subsuelo para el municipio, para así entender la circulación, almacenamiento y flujo del agua subterránea en el medio; garantizando el consumo responsable del recurso frente a los problemas que se puedan presentar. Se determinaron dos sistemas acuíferos; uno en las zonas más retiradas del Río Magdalena se comporta como acuífero semiconfinado y en zonas más cercanas a río como acuíferos libres.

Los resultados obtenidos permitieron estimar de manera muy generalizada una recarga potencial anual de 756.6 mm/año, e identificar zonas de mayor infiltración asociadas a rocas sedimentarias de las formaciones del Grupo Real y depósitos aluviales cuaternarios. Estas zonas de mayor infiltración coinciden con pendientes bajas, cobertura vegetal de bosque y pastos, y suelos franco-arenosos que favorecen la acumulación de agua. El modelo hidrológico conceptual también ha permitido identificar que las aguas subterráneas de Yondó están expuestas a un riesgo alto de contaminación por la explotación de hidrocarburos en el sector norte del municipio, por lo cual, se sugiere que se desarrollen zonas protegidas para la captación de agua.

El modelo presentado es un primer acercamiento para el entendimiento del agua subterránea en el municipio de Yondó, el cual se debe seguir alimentando y mejorando para así obtener una herramienta precisa para la gestión del recurso adecuada.

2. INTRODUCCIÓN

Las diferentes amenazas en la seguridad hídrica por actividades antrópicas y cambio climático constituyen una de las mayores problemáticas para diversos territorios alrededor del mundo (IPCC, 2021). En Colombia, esta condición se asocia principalmente con la falta de conocimiento sobre el comportamiento del flujo del agua subterránea y superficial (IDEAM, 2018). Es por ello que, actividades económicas que requieren gran cantidad de agua—i.e., explotación minera y de hidrocarburos, ganadería, agricultura—ponen en riesgo la calidad y cantidad de agua recibida por diversos sectores en Colombia.

El área centro-oriental de Colombia se caracteriza por la extracción de hidrocarburos, actividad que ha causado desastres ambientales contaminado acuíferos, destacando que las características hidrogeológicas de estos son poco estudiadas. El municipio de Yondó, localizado en la región central de Colombia, su principal abastecimiento de agua potable es a partir de pozos de agua subterránea (Vélez, 2001). Las características geológicas e hidrológicas asociadas con estos acuíferos están parcialmente estudiadas, y son definidas como acuíferos libres y semiconfinados (Vélez, 2001); sin embargo, estos datos no están agrupados en un modelo que represente las características hidrogeológicas que conforman los acuíferos, así como su funcionamiento hidrodinámico, por lo cual esta región es susceptible de sobreexplotar estos recursos y/o contaminarlos por la explotación de hidrocarburos.

Los modelos hidrogeológicos conceptuales aparecen como una alternativa para gestionar el recurso hídrico subterráneo y prevenir posibles desastres ambientales. Con ellos se logra delimitar las unidades hidrogeológicas, la geometría de los acuíferos, su característica hidráulica, la evolución de los niveles piezométricos, indicando además las condiciones del flujo de las aguas subterráneas.

Debido a que las aguas subterráneas representan la fuente principal en el municipio de Yondó, es aquí donde los modelos conceptuales resultan ser fundamentales, ya que constituyen la herramienta básica a través de la cual se puede alcanzar un mayor conocimiento del comportamiento de los niveles de agua y proponer

estrategias que puedan garantizar la preservación de este recurso.

En el este trabajo se plantea el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual para el municipio de Yondó utilizando toda la información que se encuentra disponible en la bibliografía hasta la fecha. Este modelo permitiría resumir las variables y la dinámica que influyen en las aguas subterránea en el medio y los aportes atmosféricos. Se deben realizar un análisis para cada componente que interactúa con las aguas subterráneas: geología, geomorfología, geofísica, climatología, meteorología, hidrología, hidrogeología; permitiendo así tener una visión general del comportamiento de los acuíferos, mejorando el conocimiento de cómo se comportan estos en el medio.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo consiste en desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual para la zona que comprende el municipio de Yondó a partir de la información existente, el cual permita dar una visualización general del comportamiento del agua subterránea en la zona, sirviendo como herramienta para la gestión del recurso y la toma de decisiones en el municipio.

3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se plantean para la consecución del objetivo principal son:

Recopilar, depurar y analizar la información secundaria existente para la ejecución del modelo hidrológico conceptual.

Desarrollar de un modelo geológico básico que describa la geometría, tipo de roca y que especifique las unidades hidrogeológicas y tipos de acuíferos existentes en la zona.

Desarrollar de un modelo hidrológico básico que describa los puntos de agua subterránea en la zona, el balance hídrico de suelo (incluyendo la recarga), y flujos subterráneos.

Caracterizar las propiedades hidráulicas de las unidades hidrológicas y sistemas acuíferos definidos según los ensayos hidráulicos realizados en la bibliografía.

4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

El área de estudio se localiza en el norte de Colombia entre los flancos de la cordillera Central y Oriental de los Andes Colombianos, al nororiente del departamento de Antioquia en el municipio de Yondó, con una superficie de 1895,22 km². La masa de agua de Yondó pertenece a la cuenca hidrográfica del valle medio del Magdalena, limita al norte con San Pablo Bolívar, al este con el municipio de Barrancabermeja en Santander, al suroeste con el municipio de Puerto Berrio, al oeste con Remedios en Antioquia y en el costado occidental del Río Magdalena; con una temperatura promedio entre los 24°C a 31 °C y una precipitación media anual 2906 mm/año (Vélez, 2001). Su localización regional se determina en la Figura 1 .

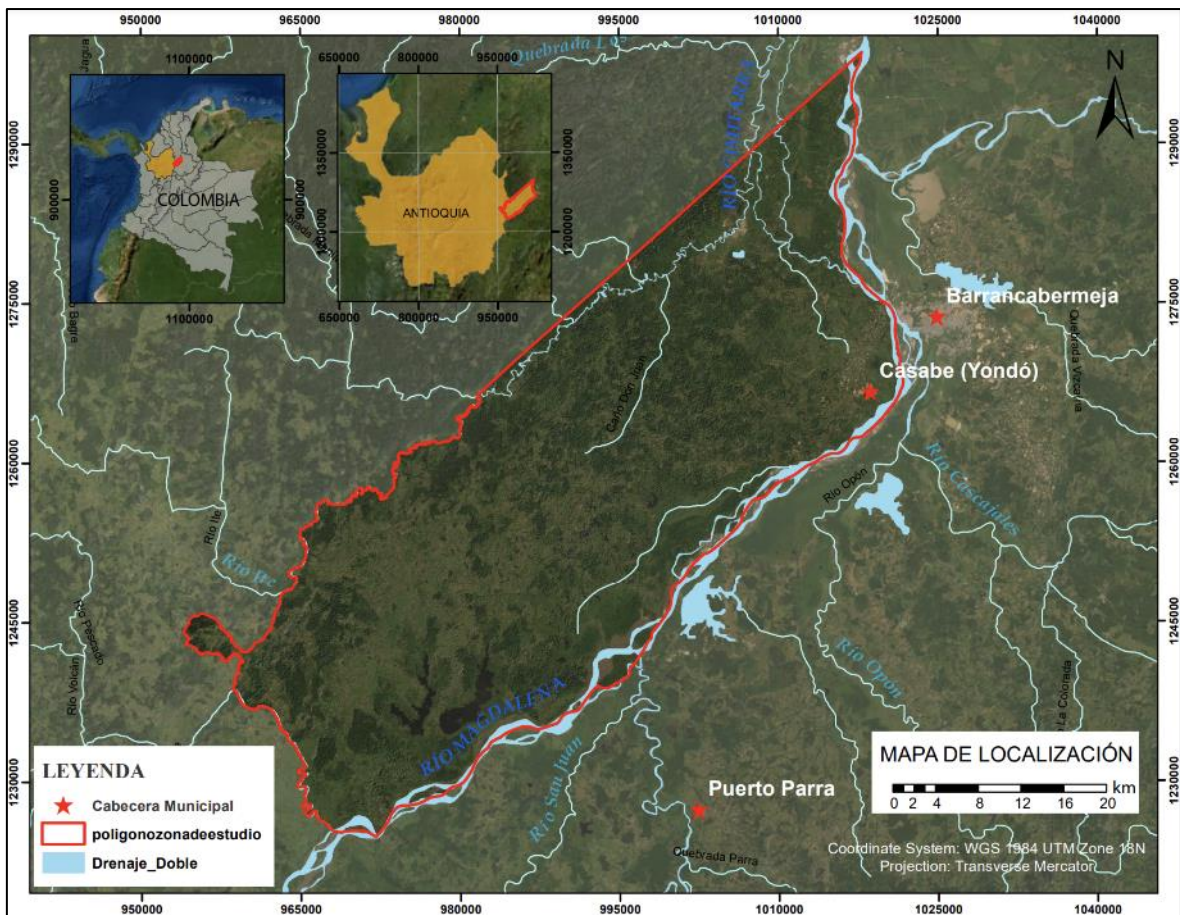


Figura 1. Mapa de localización regional del área de estudio. Municipio de Yondó, Antioquia.

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El desarrollo del Modelo Hidrogeológico Conceptual para el municipio de Yondó se llevó a cabo tomando como referencia los parámetros planteados en los datos del informe “lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua (IDEAM, 2013)”, del cual se elaboró un plan de ejecución de las actividades descrito a continuación (Figura 2).

5.1 Recopilación, depuración y análisis de información bibliográfica del área de estudio

Revisión y depuración de la documentación existente en el área de estudio, que permitiera elaborar un modelo hidrogeológico conceptual de la zona.

5.2 Modelo geológico básico

Se planteó el modelo geológico base, utilizando la cartografía geológica de las planchas publicadas por el SGC; modificadas según la tercera edición del año 2020 del Mapa Geológico de Colombia escala 1: 1M. Además, se utilizó de referencia la interpretación de ensayos geofísicos encontrados en la zona, con el fin de detallar la información geológica disponible y así definir las unidades hidrogeológicas.

5.3 Modelo hidrológico básico

En este modelo se tuvo en cuenta el inventario de puntos de agua reportado por la corporación autónoma regional (Corantioquia), evaluando su disponibilidad y uso. También, con la estimación de las variables climáticas monitoreadas en la zona (precipitación, evapotranspiración, temperatura, etc.) se hizo el cálculo de la recarga mediante el balance hídrico de suelos según Schosinsky (2006). De esta manera se obtuvo un acercamiento a la disponibilidad y potencial de las aguas subterráneas que puedan ser explotadas.

5.4 Caracterización Hidráulica.

Utilizando los parámetros hidráulicos registrados en la bibliografía se hizo una interpretación y definición de las características hidrogeológicas del acuífero; con el fin de mirar la dinámica y flujo del agua subterránea general en el municipio.

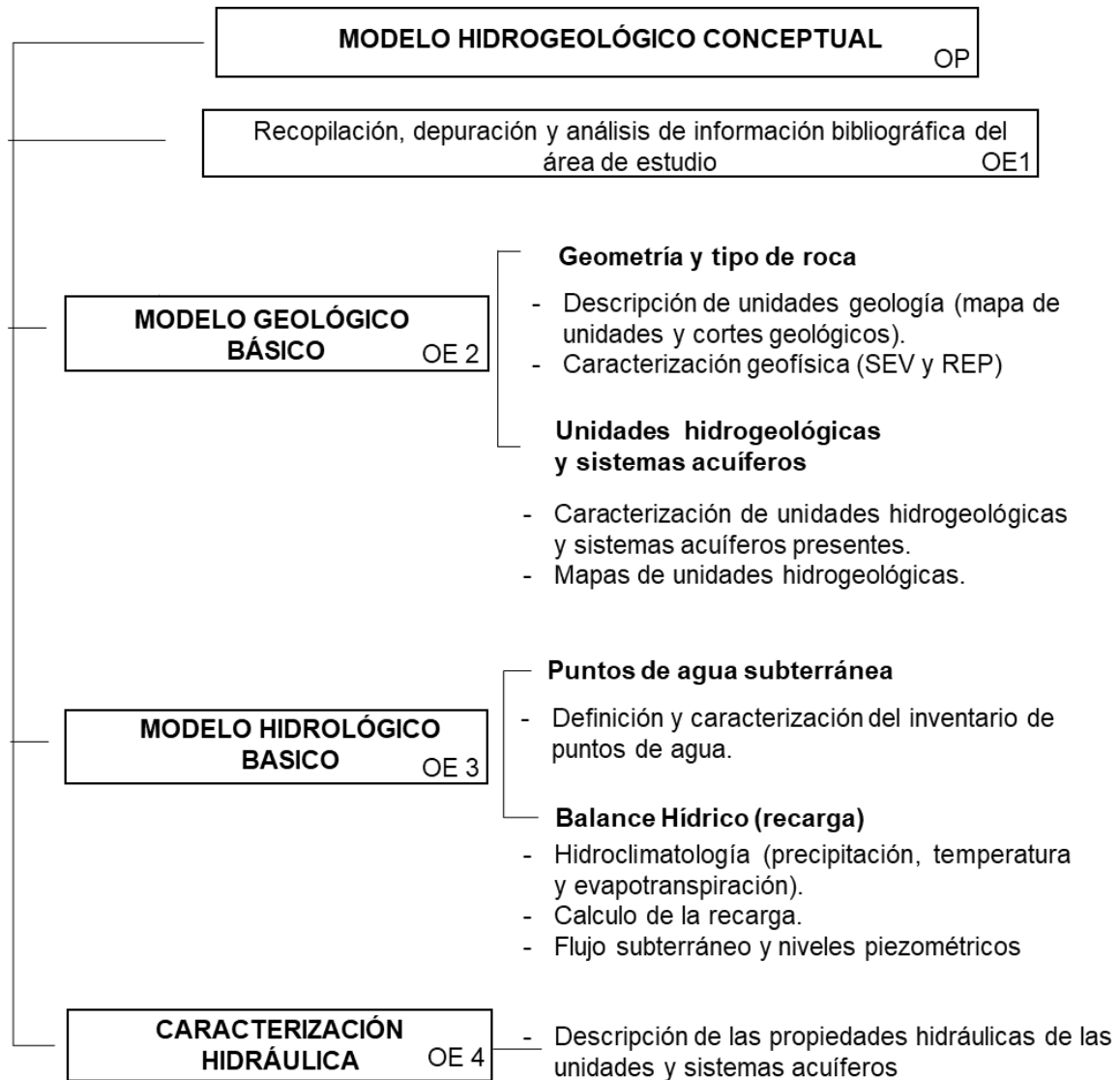


Figura 2. Estructura metodológica para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual. OP: Objetivo principal. OE: Objetivo específico.

6. MATERIALES

Para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual se cuenta con información limitada en el área de estudio (municipio de Yondó - Antioquia) la cual se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales para la elaboración de modelo hidrogeológico conceptual.

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	INSUMOS	
Modelo Geológico básico		
Unidades Geológicas	Geología básica 1:100.00 (SGC)	
Geofísica	16 SEV, 15 registros de pozo (PERCONSA)	
Modelo Hidrológico básico		
Inventario de puntos de agua	123 puntos de agua CORANTIOQUIA - PERCONSA	
Balance hídrico estimación de la recarga (Schosinsky, 2006).	Suelos	Cartografía de suelos de Antioquia 1.100.000 (IGAC)
	Cobertura vegetal	Cartografía de cobertura vegetal 1.100.000 (IDEAM), 2018. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000.
	Pendientes	MDT 12.5 m (ALOS PALSAR)
	Precipitación	5 estaciones meteorológicas (IDEAM)
	Caracterización Hidráulica	
Pruebas de bombeo	12 pruebas de bombeo (PERCONSA)	

6.1 Modelo Hidrológico básico

6.1.1 Cartografía geológica disponible.

La geológica fue realizada con base en la cartografía existente obtenida de recopilación y depuración de información bibliográfica y cartográfica del SGC escala 1.100.000 presentes en las Planchas 108, 118, 119 y 133, y modificadas según la tercera edición del año 2020 del Mapa Geológico de Colombia escala 1: 1M.

6.1.2 Geofísica

La interpretación del modelo de capas geoeléctricas, se realiza con el fin de conocer la geología a profundidad por medio de resistividades y dichos valores arrojados puedan ser correlacionarlos con la información geológica disponible. Se recopiló

información de 65 SEV's del estudio de Evaluación Del Potencial Acuífero de la Zona De Yondó del año 2001 y para este proyecto se implementan 16 SEV's y 15 registros eléctricos del año 2019 suministrados por la empresa PERCONSA, distribuidos en su mayoría en la zona norte del área de estudio. En la Tabla 2 se presentan los estudios geoelectrónicos consultados y en la Figura 5 la localización de dichos SEV's.

Tabla 2. Estudios geoelectrónicos consultados

Estudio consultado	Autor	Año	Cantidad de sondeos/Registros eléctricos de pozo
Evaluación Del Potencial Acuífero De La Zona De Yondó	(Vélez, 2001)	2001	65
Información suministrada	PERCONSA	2019	16/15

Fuente: CORANTIOQUIA, PERCONSA.

6.2 Modelo Hidrológico básico

6.2.1 Inventario de puntos de agua subterránea

Se recopiló la información de diferentes bases de datos para alimentar el inventario de puntos de agua; en CORANTIOQUIA se identificaron 97 pozos, y 19 pozos registrados por la empresa de PERCONSA entre los que se tiene pozos y aljibes dentro del área de estudio. En la Figura 10 se presenta la localización de dichos puntos hidrogeológicos y en la Tabla 3, se presenta las principales características por tipo de captación, así como el número correspondiente a cada una de ellas.

Tabla 3. Captaciones de agua subterránea.

Tipo de captación	No. de puntos	Nivel del agua* (m)	Caudal* (l/s)	Procedencia
Pozos	113	11.01 ±10.41	0.31 ± 1.35	Corantioquia/Perconsa
Aljibes	3	2.68 ± 1.89	0	Corantioquia

*Se indican los valores promedio más o menos una desviación estándar

6.2.2 Hidroclimatología

La hidroclimatología se determinó según los datos meteorológicos de las estaciones operadas por el IDEAM cercanas al área de estudio (Tabla 4) y la variable de temperatura fue tomada del "CRUTS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset" (Harris et al, 2020).

6.3 Caracterización Hidráulica

6.3.1 Ensayos hidráulicos

Los parámetros hidráulicos fueron proporcionados por la empresa PERCONSA; se cuenta con 17 pruebas de bombeo constante de 24 horas dentro del municipio de Yondó. Con los datos de bombeo existentes se determinaron las condiciones hidráulicas principales con el fin de saber el comportamiento del acuífero y realizar un comparativo de los comportamientos hidráulicos que presenta cada pozo.

7. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

7.1 Modelo geológico básico

7.1.1 Geología regional

Considerando los rasgos tectónicos, geológicos y geográficos, la cuenca del río Magdalena es dividida en inferior, medio y superior (IDEAM, 2013). El área de estudio se encuentra ubicada en el norte de Colombia, en la cuenca del Valle medio del Magdalena (VMM) siendo una cuenca compleja, formada como resultado de varios eventos geológicos y afectada por los diferentes procesos tectónicos (Sarmiento, 2001).

Según Sarmiento (2001), el VMM se deposita en la apertura originada por el levantamiento de la CC y CO de los Andes Colombianos; en el Mesozoico la apertura al Este de la cordillera central se da por esfuerzos de rumbo de componente extensional originando la cuenca intra-arco que cubre la cuenca del VMM, Cordillera Oriental y Llanos Orientales; al Oeste colombiano, en el cretácico tardío, se presentó un evento de colisión de la corteza oceánica con el continente, generando esfuerzos compresionales en la CC, que fueron migrando hacia la actual zona del VMM y generaron la división de la megacuenca ante-arco existente en el momento en Cuenca de los Llanos y Cordillera Oriental; de esta manera terminando el cenozoico se genera la consolidación de la cuenca intra-montana de VMM (Gómez, 2001).

En el bloque del VMM afloran cuerpos de rocas ígneas y rocas metamórficas de basamento con edades desde Mesozoico y Proterozoico – Paleozoico respectivamente. Se encuentran también estratos de rocas sedimentarias del Mesozoico al Cenozoico con ambientes de formación que varía desde origen marino, transicional a continental. Todo esto junto a sedimentos no consolidados con edades desde el Terciario hasta el Cuaternario (Sarmiento, 2001).

Las formaciones presentes en la zona de estudio son los depósitos cuaternarios asociados al Río Magdalena (depósitos aluviales, depósitos de llanura, depósitos fluvio-lacustres y los depósitos de terraza aluvial); las rocas sedimentarias de la Formación Mesa y Grupo Real; Batolito de Segovia, conjunto volcánico de la

Malena y el Gneis de san Lucas. Cabe resaltar que el VMM por su complejidad estructural y sus características litológicas es un excelente objeto desde el punto de vista convencional de hidrocarburos por lo que en la zona de Yondó se reportan importantes yacimientos (Malagón et al., 2021).

A continuación, en Tabla 8 del anexo, se presenta la descripción de las formaciones presentes según el servicio Geológico colombiano (Gómez et al., 2008).

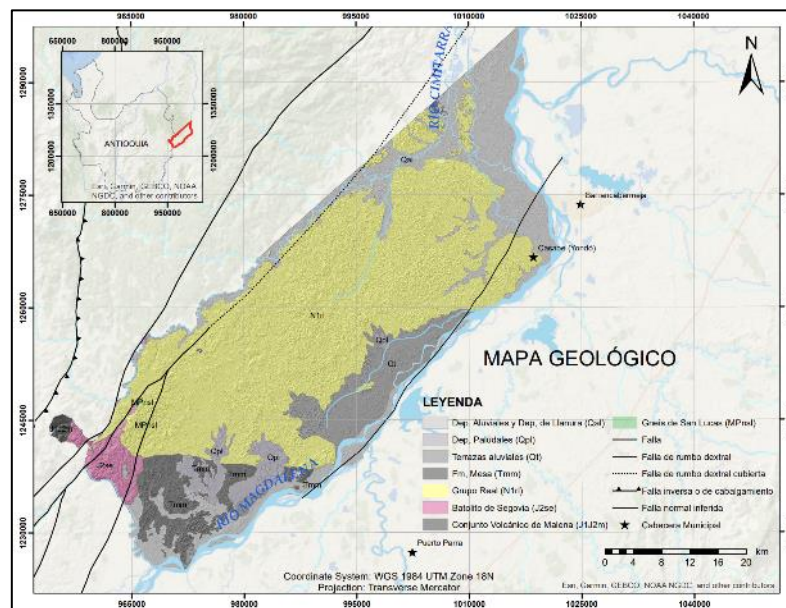


Figura 3. Geología Regional del área de estudio Yondó - Antioquia.

7.1.1.1 Geofísica

La exploración geofísica ha contribuido a la exploración de las aguas subterráneas, existe una gran variedad de métodos geofísicos (magnéticos, gravimétricos, radiométrico, electromagnético, sísmico, eléctrico), donde se aplicará dependiendo de la sensibilidad del método a las propiedades físicas de roca relacionada con el recurso buscado en este caso agua subterránea siendo los dos últimos los más utilizados (García et al., 2011).

Mediante el método Eléctrico de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) se evalúan las condiciones geométricas del acuífero, su extensión lateral, las propiedades de las formaciones según su litología, la salinidad del agua y sus plumas de contaminación (Minambiente, 2014). Por otro lado, también se cuenta con registros eléctricos de pozo donde se miden las características litológicas y petrofísicas de las capas de un terreno, además de suministrar información sobre de los fluidos

presentes en los poros de las rocas (Garduza, 2019).

Además, los registros de Resistividad, Potencial Espontáneo (SP) y Rayos Gamma, son utilizados para establecer los topes y bases (espesores) de los diferentes estratos atravesados y dan indicación sobre la posible cantidad y calidad del agua.

Con la correlación de las curvas geoeléctricas se obtiene secciones de resistividades de las capas, mostrando la continuidad o discontinuidad de estas. Es necesario que allá un patrón de resistividades ligados a diferentes tipos de litología para la ejecución del modelo hidrogeológico básico.

Se tomó información de los sondeos eléctricos verticales realizados por Vélez, (2001); estos correlacionándose con los SEV'S y registros de pozo realizados por la empresa PERCONSA S.A.S en el año 2019 en el municipio de Yondó, utilizando el dispositivo geoelectrico Schlumberger con arreglos de abertura de electrodos entre 1.5 y 150 metros.

En este caso se evidencia un patrón de resistividades entre los SEV's y los registros eléctricos de pozo que permiten apreciar la disposición de los diferentes estratos se pueden apreciar intercalaciones de capas de arenas de tamaño medio y limos con resistividades mayores a 20 Ohm.m y capas de arcillas y limos con resistividades menores a 20 Ohm.m.

A partir de los datos suministrados, se obtienen una serie de capas con resistividades específicas que se ajustan y generan modelos alternativos, determinando así los más adecuados y estos correlacionándose con los registros eléctricos de pozo presentes en la zona. En la Figura 4 se puede observar un patrón entre las curvas de los SEV's y los REP mostrando similitud en la litología según las resistividad.

Una vez obtenidos estos modelos matemáticos de los sondeos eléctricos, se definen horizontes de interés hidrogeológico a partir de los valores de conductividad eléctrica del agua subterránea y finalmente, teniendo como referencia la geología del sitio se realiza la interpretación hidrogeológica.

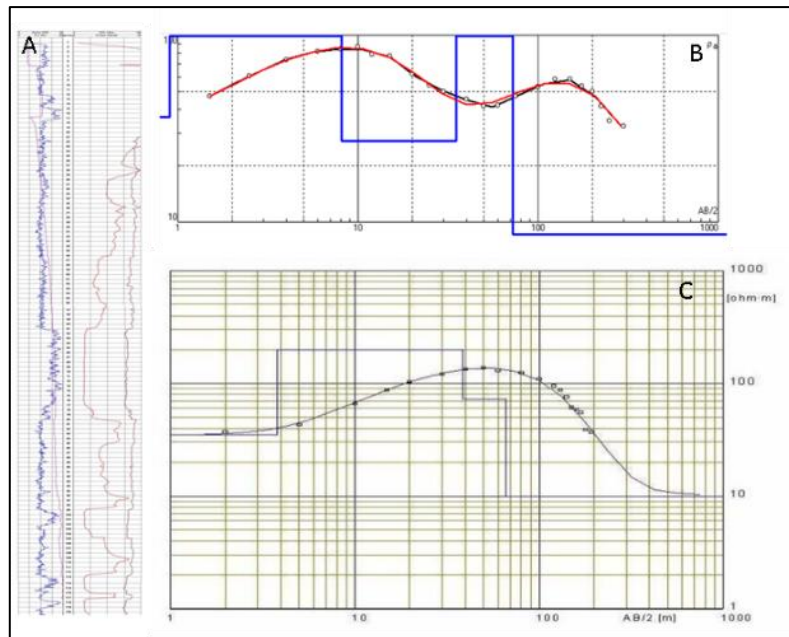


Figura 4. A. Registro geoelectrico de pozo de referencia (PERCONSA), B. Curva de resistividad eléctrica (PERCONSA), C. Curva de resistividad eléctrica (Vélez, 2001).

- **Cortes geoelectrico**

Utilizando los SEV'S y REP presentes en el área y junto a la información disponible del inventario de puntos de agua subterránea fueron generados dos (2) cortes geoelectricos, que muestran una perspectiva de la situación geológica del subsuelo y dan una idea de la geometría de los acuíferos existentes. En la Figura 5 se presenta la dirección de los cortes que se describirán a continuación en las Figura 6 y Figura 7.

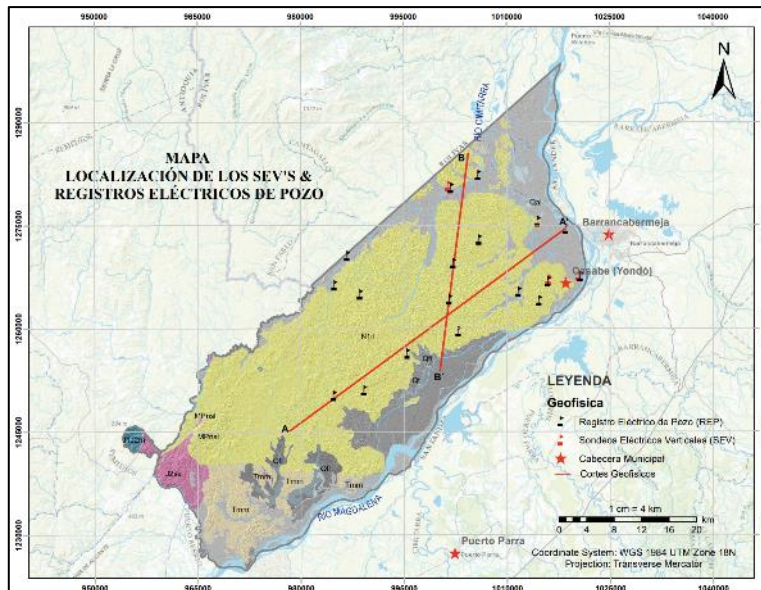


Figura 5. Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV'S), Registros Eléctricos de Pozo (REP) y dirección de los cortes geoelectrónicos (línea roja).

Teniendo en cuenta los cortes realizados se puede evidenciar que la zona de mayor influencia viene siendo la formación Terciaria caracterizada como Grupo Real (A2) y en una menor proporción la formación de origen Aluvial (A1).

En el corte A – A" (Figura 6), se observa que los perfiles litológicos tienen resistividades promedio de 15 – 20 Ohm.m relacionados a sedimentos más finos como limos intercalados con arcillas en menor espesor con resistividades de 30 Ohm.m hasta 110 Ohm.m para las arenas las cuales tienen tamaños finos y medios, sus espesores son de gran importancia para el aprovechamiento de este recurso hídrico subterráneo.

La Formación Depósitos Aluviales, se caracterizan por estar ubicados en la parte más baja topográficamente y es la que se localiza más cerca al río o afluente, estos depósitos aluviales se caracterizan por tener sedimentos finos y medios como arenas de diferentes tamaños con unas porosidades altas presentando resistividades que oscilan entre los 20 Ohm.m y 100 Ohm.m.

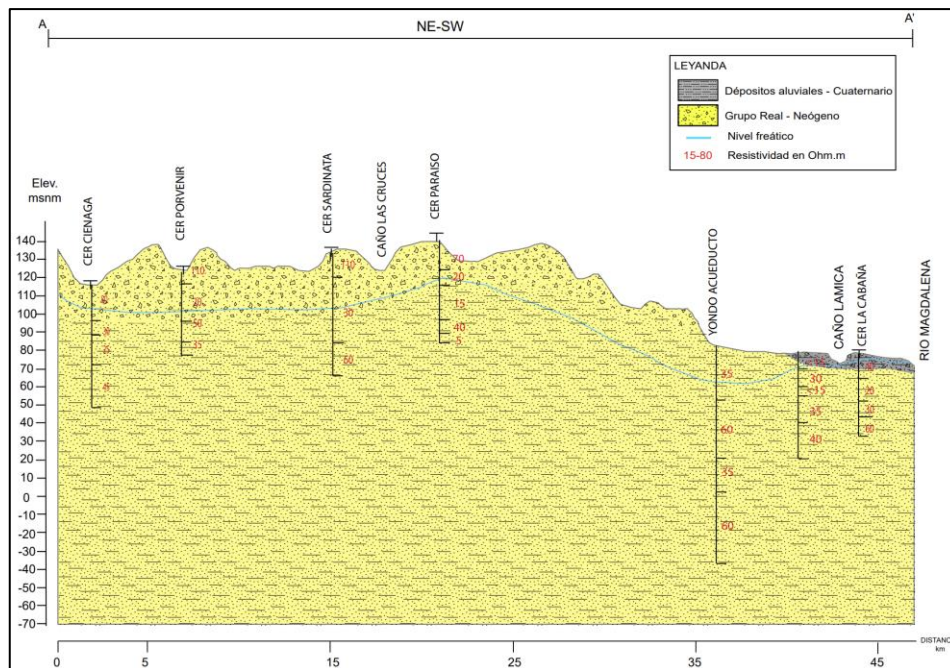


Figura 6. Sección Geoeléctrica A – A´

En el corte B -B" (Figura 7), se observa que los perfiles litológicos tienen resistividades de 20 Ohm.m para los sedimentos más finos como limos intercaladas con arcillas en menor espesor, a partir de los 30 Ohm.m se evidencia que los sedimentos corresponden a arenas finas intercaladas con arenas de tamaño medio con una porosidad alta.

Teniendo la correlación estratigrafía se determina que el área de interés esta localizada sobre una formación la cual está compuesta en su mayoría de arenas finas y medias la cual se intercala de limos y en menor espesor de paquetes de arcillas (menores a 15 Ohm.m), es normal tener resistividades por encima de los 80 Ohm.m los primeros 10 metros de profundidad ya que los niveles freáticos hacen que la conductividad sea más elevada.

Para el caso del área que corresponde a la Formación Real se determina que los perfiles hacen parte de una secuencia de sedimentos de tamaño fino y medio correspondiente a las arenas evidenciadas en los registros eléctricos el cual están intercaladas de sedimentos más finos los cuales no superan los 20 Ohm.m y se caracterizan por tener un paquete de limos intercaladas en menor espesor de arcillas.

En el caso de la formación Depósitos Aluviales se determina que los perfiles hacen

parte de una secuencia de sedimentos finos que en su mayoría corresponden a arenas de tamaño fino y medios intercaladas con espesor muy pequeños de limos, esta formación a diferencia de la Formación Real se caracteriza por no tener la presencia de materiales como arcillas y paquetes grandes de limos y arcillas.

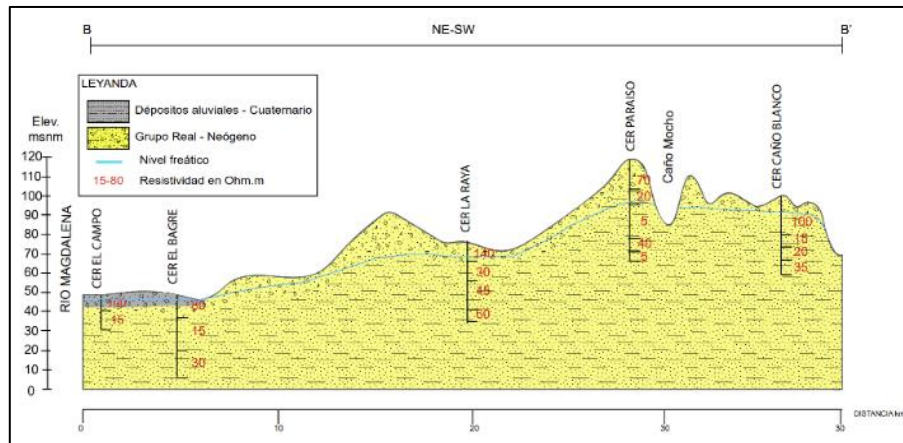


Figura 7. Sección Geoeléctrica B – B´

7.1.2 Hidrogeología regional

7.1.2.1 Provincias hidrogeológicas

El Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010) dividió el territorio colombiano en 16 provincias hidrogeológicas y a su vez definidas según la tectonoestatigrafía, coincidiendo con los límites de las cuencas sedimentarias (Barrero et al, 2007).

El IDEAM, 2010, definió estas unidades hidrogeológicas como acuíferos de tipo, acuitardos, acuífugas y acuícludo, que según sus características físicas de la roca (porosidad y permeabilidad) permiten la circulación y almacenamiento del agua subterránea. A partir de esto el Estudio Nacional del Agua en el año 2014 (IDEAM, 2015) estas provincias hidrogeológicas las subdividió en 61 sistemas acuíferos para todo Colombia.

La zona de estudio se localiza sobre provincia hidrogeológica del Valle medio del Magdalena (VMM) donde se concentran las formaciones de interés en este trabajo Figura 8.

1.1.1.1 Sistema acuífero

La zona de Yondó se localiza en el sistema acuífero Nare-Berrio-Yondó, caracterizado por rocas de origen sedimentario (depósitos aluviales, una secuencia de arenas y gravas con variaciones de facies); usualmente es explotado para uso doméstico y para actividades agropecuarias y petroleras. (IDEAM, 2013).

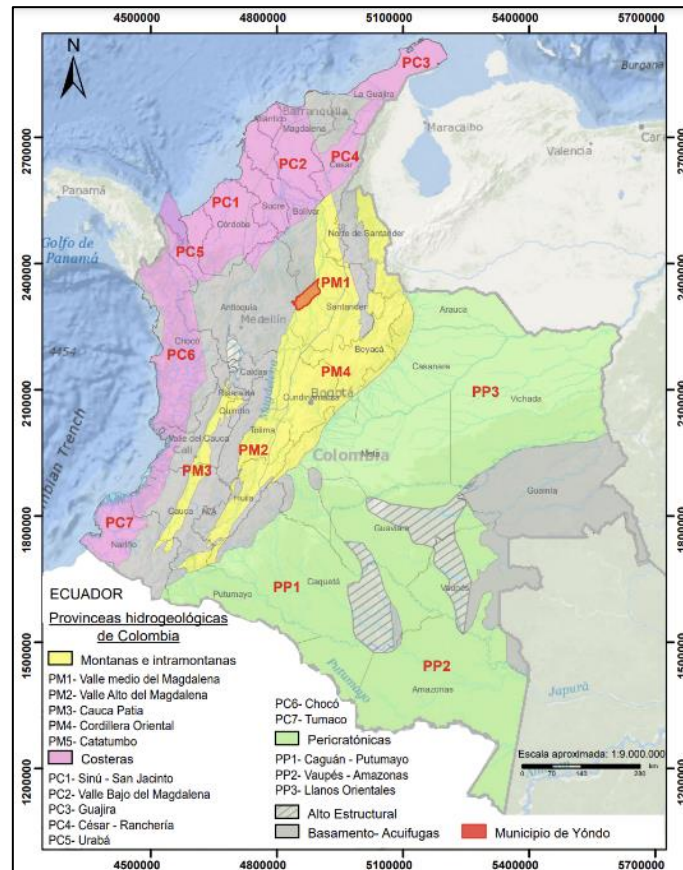


Figura 8 . Provincia hidrogeológica Valle Medio del Magdalena

Fuente: modificado de IDEAM, (2013)

- **Sistema Acuífero Nare-Berrio-Yondó SAM1.1**

El acuífero Nare-Berrio-Yondó se encuentra controlado por un sistema estructural complejo, presenta unidades calcáreas de ambientes marinos profundos de edad cretácica (Barrero,2007).

Según Malagón et al, (2021) lo define como un acuífero regional con un área superficial de 14913 km² aproximadamente, presenta una temperatura promedio de 25.6°, con precipitaciones de 2871 mm/año de régimen bimodal y una evapotranspiración potencial de 1313 mm/año, presentando déficits hídricos en la

zona norte del VMM.

Este sistema acuífero (SAM1.1) se encuentra conformado por diferentes unidades hidrogeológicas principalmente por sedimentos poco consolidados; dentro de estas unidades se encuentran **depósitos aluviales recientes y de terrazas** asociados al Río Magdalena; Las **rocas sedimentarias** poco consolidadas Formación Mesa (Tmm) y Grupo Real (N1rl) y en menor proporción por **rocas ígneas** (Batolito de Segovia (J2se) y el Conjunto Volcánico de La Malena (J1J2m)) y **metamórficas** (Complejo Cajamarca edad paleozoica) (Malagón et al, 2021). Según Malagón, (2017), Estas unidades conforman “acuíferos libres a semiconfinados, multicapa en unidades recientes y acuíferos semiconfinados a confinados en unidades más antiguas del Neógeno”.

Estas unidades hidrogeológicas se describirán a continuación según POMCA del Río Carare, (2018)

Ac. Terrazas del Río Magdalena (Qtz): Este acuífero, aunque no cuenta con estudios hidrogeológicos, es considerado de tipo libre a semiconfinado y es explotado principalmente por aljibes.

Ac. Depósito Aluvial del Río Magdalena (Qal): Es un acuífero de tipo confinado y multicapa de extensión regional, el flujo subterráneo presenta una dirección preferencial hacia el norte aportándole al Río Magdalena y su uso principal es para consumo humano, agrícola y riego de cultivos.

Ac. Mesa (NgQp). Se considera de tipo libre a semiconfinado un acuífero, continuo de extensión regional, su dirección de flujo es hacia el Río Magdalena, aportándole a este en épocas de estiaje. Su principal explotación es para uso doméstico, agrícola y industria petrolera.

El IDEAM, (2013) menciona que la permeabilidad del sistema acuífero SAM1.1 varía entre 0.5 y 20 m/d calculado por Arismendi et al., (2004). Para la infiltración se tiene valores de 0 y 500 mm/año con espesores saturados de 80 a 230 m; y transmisividades que varían entre 100 a 200 m²/día (IDEAM,2014b) en (Malagón, 2017).

El régimen hidrogeológico del acuífero está controlado por el Río Magdalena, por lo que la dirección de flujo regional subterráneo converge hacia este con sentido Norte (INGEOMINAS,2003) en Malagón et al, 2021).

Además, en épocas donde la precipitación es mayor, el Río Magdalena aporta a la recarga del acuífero, sin embargo en épocas donde la precipitación es menor puede generarse lo contrario, donde las unidades potencialmente acuíferas aportan al caudal del Río Magdalena (Malagón et al,2021).

Las principales fuentes superficiales dentro del sistema acuífero son la quebrada La Malena, quebrada Balcanes, Caño Negro, Río Nare y caño San Pablo. Y aledañas están los ríos San Bartolo al norte, Magdalena al oriente y Cocorná al sur IDEAM,2013.

según IDEAM, (2014) Las fuente y zona de recarga de este acuífero son las siguientes:

Ac. Terrazas del rio Magdalena: se considera la precipitación su principal fuente de recarga.

Ac. Depósito Aluvial Rio Magdalena: Debido al tipo de litología que presenta su capacidad de infiltración es alta y su recarga se da gracias al aporte del Río Magdalena y sus tributarios y por precipitación,

Ac. Mesa: Según las características litológicas su capacidad de infiltración es baja y se recarga principalmente por precipitación.

Ac. Real: presenta características similares que Ac, Mesa.

7.1.2.2 Unidades hidrogeológicas definidas

Con base en la información geológica, el inventario de puntos de agua subterránea, la hidráulica y la prospección geofísica, se realizó la evaluación del potencial hidrogeológico y la conceptualización sobre su funcionamiento definiéndose tres (3) unidades hidrogeológicas de la Tabla 9 del Anexo, siendo los de la zona norte los acuíferos con mayor importancia debido al alto aprovechamiento de este recurso hídrico subterráneo. Para la categorización de estas unidades hidrogeológicas se

realizó con base a la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH, 1995). El Mapa Hidrogeológico se realizó a una escala de 1:100.000 siendo el resultado de las diferentes unidades geológicas según sus características hidrológicas.

Desde la perspectiva hidrogeológica determinada en Tabla 9 del Anexo, los acuíferos presentes se agruparon teniendo en cuenta dos categorías: Sedimentos y rocas con flujo intergranular y; Sedimentos y rocas con limitados recursos de aguas subterráneas. Se presentan las características de las unidades identificadas (A1, A2, A3 y C1) observadas en la Figura 9.

- **Sedimentos y Rocas con Flujo Intergranular / Porosidad Primaria**

En este componente se determinan tres (3) sistemas acuíferos A1, A2 y A3 correspondientes a los depósitos aluviales y de Llanura de Inundación (Qal) y terrazas aluviales (Qt), para la categoría A1; Rocas sedimentarias de Formación Mesa (Tmm) y Grupo Real (N1rl) para la A2 y depósitos fluvio-lacustres (Qfl) para la unidad A3.

A1. Sistema de Depósitos Aluviales y de Llanura de inundación (Qal)

Según Cañas et al., (2019) en el acuífero del VMM el sistema de depósitos aluviales son caracterizados como acuífero local de tipo libre, discontinuo con porosidad primaria y transmisividades que varían de 20 a 250 m²/día, esta unidad presenta litología de arenas de tamaño medio a fino, con intercalaciones de limolitas y ciertas capas de gravas matriz soportados.

Vélez, (2001) clasifica en la zona de estudio los depósitos aluviales como acuíferos semiconfinados con caudales que no sobrepasan a los 6 LPS, la litología de esta zona presenta intercalaciones de sedimentos de tamaño fino, como arenas, limos o arcillas arenosas; con resistividades eléctricas 5 – 50 Ohm.m para materiales finos y resistividades hasta de 100 Ohm.m para paquetes arenosos. Estos depósitos presentan un espesor variable alcanzando unos 80 metros.

Los registros de pozo y las pruebas de bombeo recopiladas en este estudio evidencian características similares a las planteadas anteriormente, con valores de transmisividades del orden de 30 a 87 m²/día Tabla 10, resistividades menores a

50 Ohm.m para litologías de materiales finos intercalados con limos y arcillas y

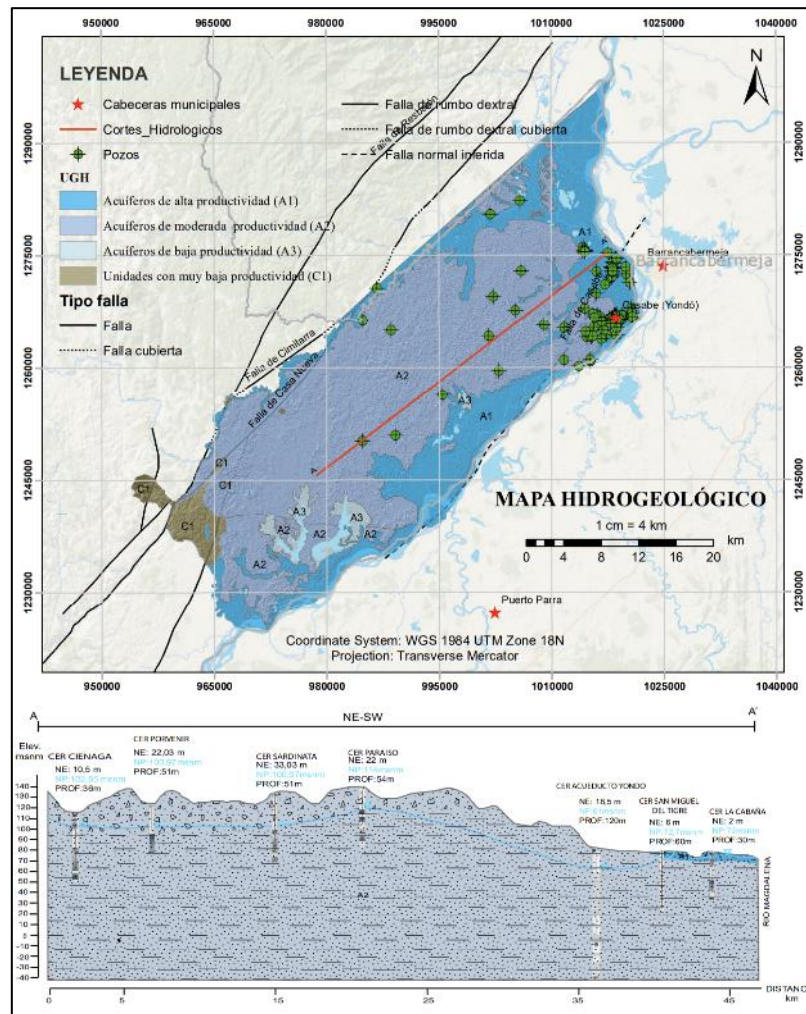


Figura 9. Mapa de Unidades Hidrogeológica.

mayores a 50 Ohm.m para arenas gruesas a medias intercaladas con limos con algunas capas de arcillas (Figura 6). Dentro de estas unidades se registraron 42 puntos de agua (41 pozos y 1 aljibe), de los cuales ocho (8) presentan niveles de agua registrados, entre los 0.1 y 7 metros de profundidad; mientras que los niveles piezométricos están entre los rangos de 100 a 70 msnm disminuyendo hacia el Río Magdalena (Figura 14), clasificándose como un acuífero principalmente libre, aunque en algunas zonas puede considerarse como semiconfinado por la diferencia de los materiales de la unidad a lo largo del área de estudio. Con respecto a la productividad, gracias a las pruebas realizadas por la empresa PERCONSA se tiene un registro de 4 pozos con capacidad de producción de agua de 1.3 LPS.

A1. Terrazas Aluviales (Qat)

Litológicamente estos depósitos se encuentran clasificados por cantos redondeados presenta mala selección con una matriz predominantemente arenosa de grano medio a grueso con material arcilloso presentando espesores variables entre 3 y 4 metros (Fonseca P, et al.,2011; Fonseca, et al., 2012). Para esta unidad no se encontraron datos que permitan definir detalladamente la unidad acuífera; aunque debido a la similitud que presenta con los depósitos Qal se integró dentro de la unidad acuífera A1.

A2. Sistema de Acuífero Grupo Real (N1r)

El grupo real cuenta con la mayoría de los puntos de agua registrados en la zona de estudio. Litológicamente presenta arenas de grano fino a grueso en matriz limo arcillosa, con variaciones de facie a granulometrías finas disminuyendo su permeabilidad; esta unidad cuenta con un espesor total es de 3.600 m (Morales et al.,1956 en Cañas et al.,2019). Según Cañas et al., (2019) el Grupo Real en el VMM es un acuífero regional libre por porosidad primaria en capas superiores menores a 20 metros y un acuífero de tipo confinado a semiconfinado en capas mayores de 20 metros con transmisividades de 46 a 204 m²/día.

En el estudio de Vélez, (2001), la zona de estudio esta unidad es caracterizada como Formación Mesa, pero la cartografía geológica del 2020 del servicio geológico colombiano actualiza esta información determinándola como Grupo Real. Vélez, (2001) clasifica esta unidad hidrológicamente como 2 tipos de acuífero confinado y semiconfinado; la unidad H1 conformada litológicamente por gravas arenosas, presentando profundidades promedio de 0 – 50 m con espesores aproximados de 20 m y niveles piezométricos que varían entre 5 y 2.5 m; la unidad H2 está conformada por gravas a profundidades promedios de 80 m, se desconocen sus características hidráulicas.

Según las captaciones de agua subterránea, las características hidráulicas y la geofísica existente en la zona reportada por PERCONSA se caracterizó esta unidad geológica como acuífero tipo semiconfinado a confinado de mediana productividad dependiendo de las variaciones de los materiales a largo del área con caudales de 1.2 a 1.6 l/s excepto el pozo del Acueducto de Yondó con una profundidad de 120 metros que presenta un caudal de 14 l/s. En la zona cuenta con 72 pozos y 2 aljibes

de acuerdo con el inventario de puntos de agua, las cuales 13 captaciones cuentan con pruebas de bombeo registra niveles piezométricos entre los rangos de 50 a 115 msnm. Estos puntos de agua presentan transmisividades inferiores a 200 m²/día (Tabla 10) unificados según los perfiles geoelectricos, generando capas acuíferas con granos de tamaño fino a medio en una matriz limo arcillosa con resistividades que varían entre 5 a 25 Ohm.m y resistividades mayores a 50 Ohm.m asociada a litologías de arenas medias con presencia de gravas y intercalaciones de limos.

A2. Sistema Acuífero Grupo Mesa (N2Q1m)

Esta unidad se compone de arenas medias, gruesas a gravas, con intercalaciones de arcillas y limos (Cañas et al., 2019), presenta un espesor de 575 metros (Taborda, 1965 en Cañas et al., 2019). Esta unidad no cuenta con pruebas de bombeo que capten esta unidad para ser clasificada hidrológicamente, pero sin embargo la Formación Mesa se comporta litológicamente muy similar al Grupo Real por lo que es muy difícil ser diferenciadas en campo; por efecto de este trabajo se le confieren las mismas características hidrogeológicas que la formación anteriormente mencionada.

A3. Depósitos fluvio – lacustres (Qfl)

No se cuenta con caracterización litológica que nos permitiera realizar una descripción hidrogeológica detallada. Sin embargo, las descripciones litológicas realizadas en campo por el Servicio Geológico Colombiano en: Fonseca, et al., (2011), Fonseca, et al., (2015) y Maya, et al., (2015) describen estos depósitos como sedimentos finos limos y arcillas. Se puede caracterizar como un acuífero de muy baja productividad con espesor aproximado de 3.5 metros.

- **Sedimentos y rocas esencialmente carentes de recursos explotables de agua subterránea.**

En la cartografía hidrogeológica la categoría C1 lo conforman rocas ígneas y metamórficas, en ocasiones fracturadas; de muy baja o nula productividad caracterizándose por ser impermeable, por tanto, es incapaz de absorber o transmitir agua en la que se han agrupado el Batolito de Segovia (J2se), Conjunto volcánico de la Malena (J1J2m) y El Gneis de San Lucas (MPnsl) determinándose como un

acuífugo.

7.2 Modelo hidrológico básico

7.2.1 Inventario de puntos de agua

Esta fase es una de las más importantes para los modelos hidrogeológicos dando a conocer las características hidrológicas de una zona, además por medio de estas captaciones dan un acceso al acuífero por medio de pozos aljibes, surgencias naturales o manantiales correspondientes a la descarga. Permitiendo conocer la disponibilidad y uso de este recurso hídrico en el área de Yondó y tener una perspectiva del comportamiento y las características hidrogeológicas potencialmente acuíferas (Minambiente, 2014). El análisis de dicha información posibilita conocer su dirección de flujo subterráneo en la zona.

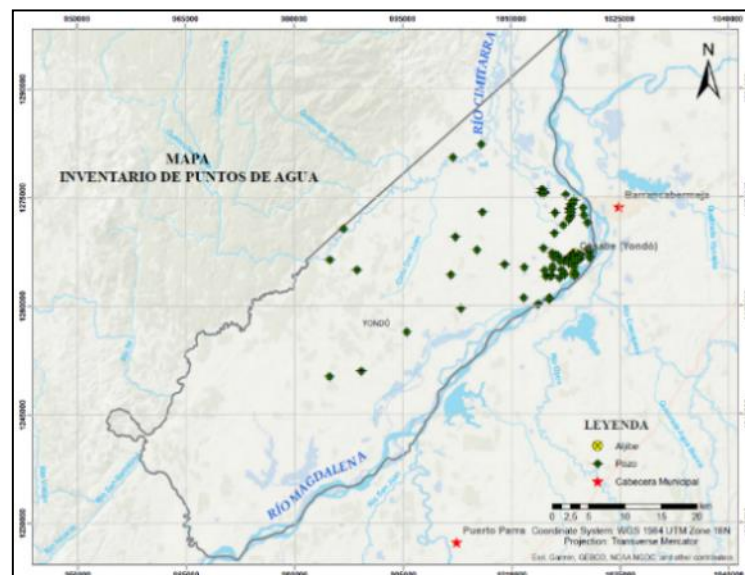


Figura 10. Inventario de puntos de agua.

En el presente modelo se recopiló la información de diferentes bases de datos, en CORANTIOQUIA se identificaron 97 pozos y 19 datos de la empresa de PERCONSA entre los que se tiene pozos y aljibes, localizadas en la zona de estudio. En la Figura 10 se presenta la localización de dichos puntos.

Generalmente en el municipio de Yondó el agua subterránea es utilizada para actividades de uso agropecuario, doméstico y desarrollos de hidrocarburos (IDEAM, 2013). Los aljibes presentan profundidades entre los 3 m y 8 m; los pozos con profundidades entre 12 m y 120 m la mayoría construidos en tubería de PVC

con diámetros de 4" y 8" y caudales promedios reportados de 1.5 l/s.

7.2.2 Balance hídrico

En términos generales la recarga es definida como el proceso donde entra agua a la zona saturada del suelo, comenzando a hacer parte de las reservas subterráneas de agua procedente del exterior (Scanlon et al., 2002). Normalmente un sistema acuífero se va recargando de forma natural a partir del agua lluvia, o por medio de transferencias derivadas de otros acuíferos adyacentes como también originarse de manera artificial (Custodio & Llamas , 2001) y terminan surgiendo por las zonas de descarga (manantiales) reintegrando el agua a la superficie (Faustino 2006).

Tener conocimiento de las zonas de recarga nos permite tomar medidas de protección ya que son la principal entrada de agua a los acuíferos, pero también son áreas de alta susceptibilidad a la entrada de contaminantes en la parte más superficial de estos.

Para la estimación recarga existe una infinidad de métodos y uno de los más empleados es el de balance de suelos según Schosinsky, (2000), el cual evalúa las entradas por medio de la precipitación e infiltración de agua en el medio y la salida generada por la evapotranspiración y descarga de los acuíferos. Una de las ventajas de esta metodología es que genera un margen de error menor del 80%, teniendo en cuenta diferentes variables que contribuyen a la recarga como la precipitación, capacidad de infiltración de los suelos, retención pluvial, cobertura vegetal, profundidad de raíces, evapotranspiración real, retención pluvial, uso del suelo y pendiente del terreno.

Es de suma importancia tener un conocimiento del balance hídrico ya que nos brinda información cuantificada del recurso del agua y así obtener un uso más racional de este recurso (Schosinsky, 2006).

Partiendo de la metodología propuesta por Schosinsky, (2006) se calculó la recarga por balance hídrico de suelos teniendo en cuenta las variables en la Figura 11.

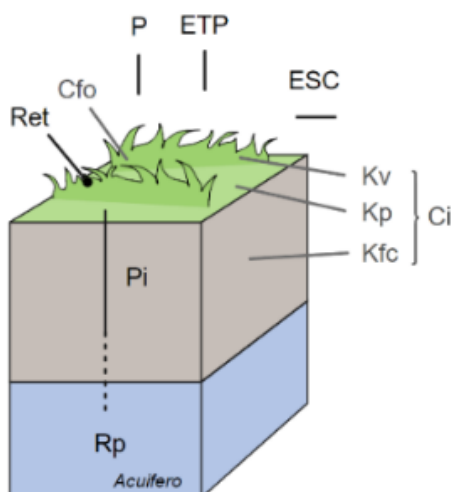


Figura 11. Esquema de variables para evaluar.

7.2.2.1 Pluviosidad

La precipitación es una de las fuentes principales para la recarga de los acuíferos, para evaluarla se analizaron datos de cinco estaciones meteorológicas que opera el IDEAM (Estación Aeropuerto, Yondó, Churí, Coquera y Ramplas) con un rango de 37 años en un periodo que corresponde entre los 1985 - 2022, cabe mencionar que las únicas estaciones que se encuentra localizada dentro de la zona de estudio es la estación Yondó y Estación Ramplas, las otras aledañas al área Figura 12 del Anexo.

Acorde con los registros históricos de la estación Yondó en la zona norte del municipio, se observa que el comportamiento temporal de la precipitación es bimodal observándose en el primer semestre (marzo a mayo, siendo el último mes donde más llueve (361.76 mm); y en el segundo semestre (septiembre – noviembre) siendo el primer mes con mayores precipitaciones que rondan los 398.05 mm. Por otra parte, se evidencia dos periodos secos: de junio a julio y de diciembre a febrero siendo enero el mes donde menos llueve durante el año (41.96 mm).

La estación Ramplas ubicada en la zona sur del área de estudio presenta un comportamiento similar que estación anteriormente descrita. Se puede inferir que la recarga influye en los meses donde el suelo está en punto de saturación por ende

aumenta su infiltración durante los meses más lluviosos.



Figura 12. Precipitación promedio de la estación Yondó y Ramplas.

Figura 12, similar a la registrada por Vélez, 2001. se define que la zona que presenta mayor precipitación es al Este del municipio, alcanzando pluviosidades de 259 mm/mes.

Se determina con las 5 estaciones operadas por el IDEAM la precipitación mensual promedio multianual para la zona, utilizando el método de los polígonos de Thiessen obteniendo un valor de precipitación promedio anual para Yondó de 2906 mm/año observado en la del Anexo.

Tabla 4. Precipitación promedio mensual multianual (mm).

ESTACIÓN	YONDO [23160010]	RAMPLAS [23100070]	COQUERA [23180120]	CHUCURI [23130010]	AEROPUERTO YARIGUIES [23155030]	ÁREA DE ESTUDIO 1895 m ²
X	967564,78	1014730,76	1005097,247	1029710,248	1017487,544	
Y	1226330,44	1275719,89	1252309,655	1268752,921	1290466,345	
TIPO	PM	PM	PM	PM	SP	
ENERO	42	36	35	60	54	47
FEBRERO	74	70	64	93	98	80
MARZO	181	155	160	232	174	193
ABRIL	283	250	288	282	283	273
MAYO	362	328	358	363	352	352
JUNIO	285	244	293	254	254	260
JULIO	248	229	256	238	226	239
AGOSTO	322	264	309	326	262	306
SEPTIEMBRE	398	332	332	387	333	370
OCTUBRE	392	330	419	412	394	383
NOVIEMBRE	291	204	296	314	306	275
DICIEMBRE	128	100	111	147	127	127
TOTAL	3006	2542	2920	3107	2864	2906

Fuente: IDEAM

PM: Estación Pluviométrica

SP: Estación Sinóptica Principal

7.2.2.2 la fracción de lluvia interceptada por el follaje (Cfo)

La interceptación de las lluvias por follaje es considerada el 12% de la precipitación mensual (Butler, 1957), sin embargo, cuando son coberturas de bosques muy densos se considera del 20% (Linsley et al., 1958). Teniendo en cuenta lo anterior se realiza el mapa de interpretación por el follaje donde:

Cfo = 0.12 al follaje.

Cfo = 0.2 a los bosques densos.

7.2.2.3 Retención de lluvia por follaje (Ret)

Para el calculo de la Ret se tuvo en cuenta los enunciados plasmados por (Schonsinky,2006):

“Si $P \leq 5$ mm/mes, $Ret = P$.

Si el producto (P) multiplicado por (Cfo) es ≥ 5 mm/mes, $Ret = (P)(Cfo)$.

Si P es > 5 mm/mes y el producto (P)(Cfo) < 5 , $Ret = 5$.

Donde:

P = Precipitación mensual del mes (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje (mm/mes).

Cfo = Coeficiente de retención en el follaje, en bosques densos Cfo=0.20 y otra

Cfo = 0.12 (adimensional).”

7.2.2.4 Infiltración (Kfc)

El Kfc es uno de los factores que mas influye en la infiltración debido a la textura del suelo según la ecuación dada por Schosinsky y Losilla, (2000).

“ $K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154fc - 0.723$.

Donde:

Kfc (adimensional) = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo).

fc (mm/día) = Infiltración básica del suelo.”

Es necesario tener en cuenta que el rango de fc cumpla con lo siguiente enunciado para poder ser utilizada.

“Si fc se encuentra entre 16 a 1568 mm/día $K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154fc - 0.723$.

Para valores de $fc < 16$ mm/día, $K_{fc} = 0.0148fc/16$.

Para valores de $fc > 1568$ mm/día, $K_{fc} = 1$.”

En el mapa de coeficiente de infiltración Figura 20 del Anexo se generó con base la cartografía de suelos de Antioquia escala 1.100.000 (IGAC) del año 2007, dándole un valor de fc según la tabla de Rawls et al., (1983) permitiendo obtener el potencial de infiltración, donde los suelos franco-arenosos generan un mayor coeficiente de infiltración debido a su textura, mientras que los suelos arcillo-arenosos y los suelos arcilloso- limosos un coeficiente de infiltración de intermedio a bajo.

7.2.2.5 Fracción que infiltra por efecto de pendiente (Kp).

El mapa de pendientes se genero a partir del modelo digital de elevación, reclasificado según Schosinsky & Losilla, (2000) – Cuadro 1, asignándole un Kp a partir de la pendiente del terreno. Como se puede observar en la Figura 21 del

Anexo, las zonas de pendientes muy planas de 0.02%-0.06% se les determino un coeficiente de infiltración alto, mientras que en las zonas mayores al 7% se asignó un coeficiente bajo; definiéndose que las zonas de pendientes muy planas presentan mayor infiltración que las zonas con mayores pendientes presentan mayor escorrentía. Así como se determina en el mapa de la Figura 21 del Anexo las zonas con pendientes de 0.02% y 0.06% están asociadas a los depósitos y ciertas zonas de formaciones sedimentarias, que se presentan en color verde.

7.2.2.6 Fracción que infiltra por cobertura Vegetal (Kv)

según la cobertura vegetal suministrada por CORANTIOQUIA del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) del año 2018 a escala 1:100.000. se le asignan coeficientes de infiltración Kv según los distintos tipos de cobertura existentes en la zona de estudio determinadas en la Figura 22 del Anexo.

Como podemos observar las zonas donde se retiene menor o gran cantidad de agua van ligadas según el tipo de cobertura, mostrando mayor infiltración en las zonas boscosas y menor infiltración en zonas de cultivos y asentamientos humanos.

7.2.2.7 Coeficiente de infiltración (Ci)

Para determinar este coeficiente se tiene en cuenta la pendiente del terreno y la cobertura generando un mapa de Ci, basado en la ecuación (ONU, 1972):

$$"Ci = Kp + Kv + Kfc \text{ (adimensional)}$$

Entonces se tiene que

Si $k_p + k_v + k_{fc}$ es mayor de 1, $Ci = 1$.

Si $k_p + k_v + k_{fc}$ es menor o igual a 1, entonces $Ci = k_p + k_v + k_{fc}$."

En la Figura 23 del Anexo, se observa que las áreas con menor pendiente coinciden con las zonas boscosas y de pastizal manifestando una alta a moderada capacidad de infiltración relacionada a suelos franco-arenosos y arcillo-arenosos este potencial corresponde a los depósitos cuaternarios y formación sedimentaria del Grupo Real, sin embargo se puede determinar que las zonas con pendientes

mayores al 7% y con suelos arcillo-limosos la capacidad de infiltración disminuye.

7.2.2.8 Infiltración pluvial mensual (P_i)

Esta se determina por la siguiente ecuación según Schosinsky y Losilla, (2000), teniendo en cuenta en cuenta que el C_i no puede ser mayor de 1:

$$P_i = (C_i) (P - Ret).$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo (mm/mes)

C_i = Coeficiente de infiltración (adimensional).

P = Precipitación mensual del mes (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje.”

Aplicando lo anterior mente dicho se procedió hacer un cruce de los ráster por medio de algebra de mapas para obtener el P_i . Según el resultado las áreas de baja pendiente presentan mayor infiltración asociadas a depósitos y formaciones sedimentarias del Grupo Real, sin embargo no toda se infiltra al acuífero una parte es retenida por las raíces de las plantas, un porcentaje es retenido por el suelo, mientras que otro es devuelto a la atmosfera por medio de la ETP, finalmente el restante después de dichos procesos pasa a filtrarse al subsuelo, para alojarse como agua subterránea. En la Figura 24 del Anexo se puede observar el mapa de coeficiente de infiltración.

7.2.2.9 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial viene siendo la fracción de la precipitación que no llega a filtrarse o evaporarse, alimentando las corrientes superficiales en una cuenca (Ordoñez, 2011).

La escorrentía mensual para este trabajo se calcula a partir de la siguiente ecuación según Schosinsky y Losilla, (2000).

$$ESC = P - Ret - P_i.$$

Donde:

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

P = Precipitación mensual (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje.

ESC = Escorrentía superficial en mm/mes.”

En la Figura 25 del Anexo las zonas de alta pendiente presentan mayores escorrentías por ende menor infiltración, mientras que las zonas de poca pendiente presentan menor escorrentía y mayor infiltración. Las áreas de baja pendiente están asociadas con los depósitos cuaternarios y formaciones sedimentarias del Grupo Real, sin embargo, las zonas de alta pendiente se asocian con las rocas ígneas y metamórficas presentes en la área.

Con el propósito de establecer un marco general de referencia se genero el balance hídrico con el fin de evaluar la recarga potencial de los acuíferos por la precipitación (custodio & Llamas, 2001) que puede presentar una zona en un periodo determinado, a partir de la precipitación y la temperatura media mensual, utilizando el sistema de clasificación de Thornthwaite, (1948) según la formula.

$$ETP = 16 (10T/I)$$

Dónde:

ETP: evapotranspiración en mm.

I: índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i , donde i es función de la temperatura media normal mensual [$i: (t/5)^{1,514}$].

T: temperatura media mensual (no normal) en °C a: exponente empírico, función de I.

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239.”$$

Tabla 5. Balance hídrico Yondó Antioquia

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
P (mm)	47,23	80,16	193,1	273	351,8	260,5	238,6	305,7	370,1	383,0	275,1	126,6
ETP(mm)	143,4	135,5	152,6	150	154,1	151,7	159,6	155,6	143,6	135,3	131,6	141,4

Se puede observar que los meses de enero, febrero y diciembre sobrepasa la precipitación promedio mensual, definiendo que en estos meses se presenta una recarga nula.

7.2.2.10 Recarga potencial del acuífero

La recarga se considera satisfactoria si el volumen de agua que se infiltra en el suelo es suficiente para llegar a la capacidad de campo y suplir las demandas de la evapotranspiración de las plantas (Schosinsky, 2006). se calcula mediante la ecuación Schosinsky y Losilla, (2000):

$$R_p = (P_i - ETR.)$$

Donde:

R_p = Recarga potencial mensual en mm/mes

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

ETR = Evapotranspiración real en mm/ mes.”

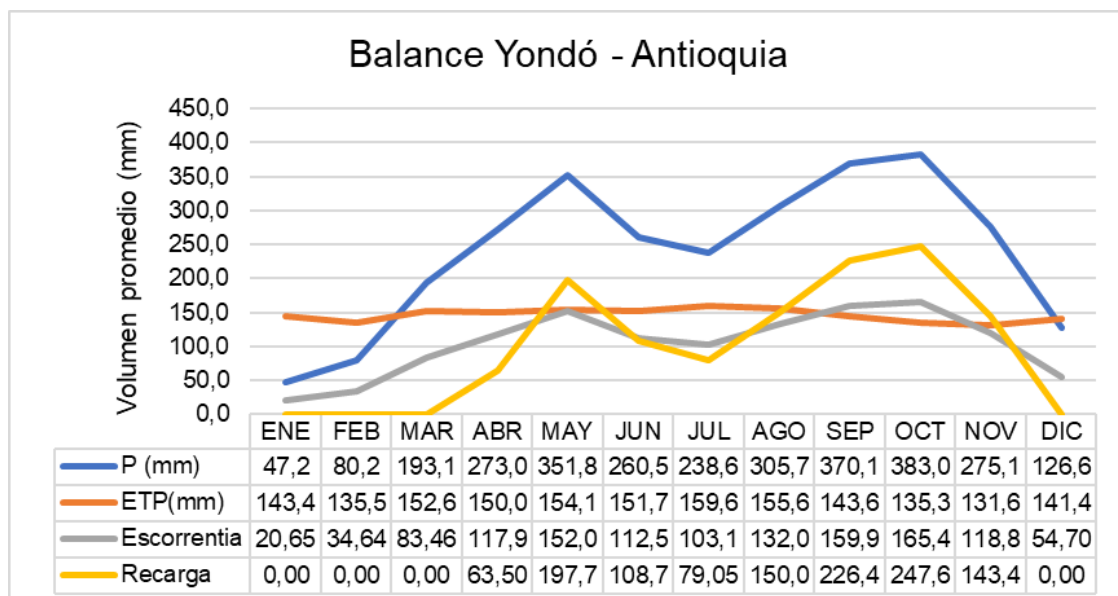


Gráfico 1. Balance Hídrico subsuperficial.

En el Gráfico 1, se puede inferir que los meses con mayor potencial de recarga van de mayo a noviembre, sin embargo, en enero, febrero, marzo y diciembre presentan un potencial de infiltración nulo; se evidencia que en los meses mas lluviosos mayo y octubre la escorrentía es mayor esto basándose en la curva que presenta una tendencia muy parecida a la de la precipitación.

También se puede determinar los meses con mayor evapotranspiración evidenciados en el Gráfico 1, donde la ETP en los meses de enero, febrero y diciembre sobrepasa los valores de precipitación promedio mensual con la posibilidad de llegar la humedad al punto de marchitez concluyendo que durante estos meses no se presentara infiltración ni recarga potencial del acuífero.

En la Figura 13 se determina zonas con mayor potencial de recarga con valores de 262 mm/mes, determinando que estas áreas se ven asociadas con los sedimentos del neógeno, siendo este el acuífero por excelencia de la zona; las áreas con pendientes mayores al 7% presentan un potencial de recarga mucho mas bajo. Cabe resaltar que la pendiente es una variable muy importante a la hora de evaluar la recarga debido a que a mayor recarga áreas de bajas pendientes y menor escorrentía.

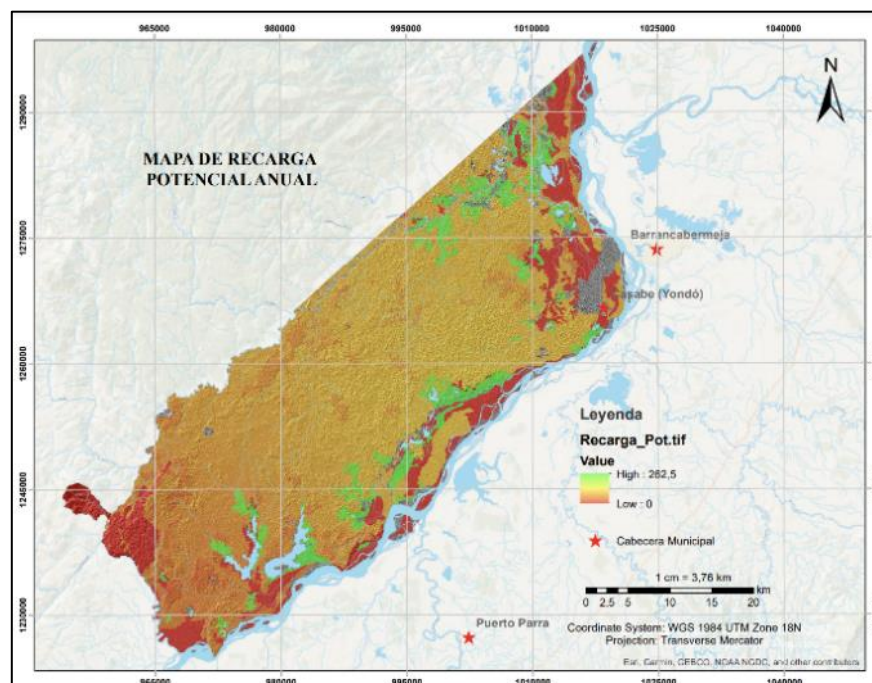


Figura 13. Recarga potencial mensual.

Determinada la recarga mensual se calcula el volumen según la geología presente (Tabla 6).

Tabla 6. Volumen (mm) de recarga mensual generada por formación.

Formación geológica	volumen mm
Depósitos aluviales	122.337.986
Depósitos fluviolacustres	23.622.862
Terrazas aluviales	71.809.762
Formación Mesa	30.273.792
Grupo Real	445.818.098
Batolito de Segovia	3.068.493
Conjunto Volcánico de Malena	174.819
Gneis de San Lucas	86.821

7.2.3 Dirección de flujo y niveles piezométricos

El nivel piezométrico es tomado de 33 pozos, los cuales permitieron establecer con la herramienta de SURFER - Surface Mapping System, versión 7.02. la superficie freática delimitada por líneas equipotenciales también conocidas como isopiezas (freeze y Cherry, 1979). En la Figura 14 se puede inferir que el agua en el área de estudio presenta una dirección de flujo hacia el río Magdalena y otra dirección hacia el Cimitarra. al Noreste del mapa (Figura 14) se evidencian los dos escenarios, una donde el río Magdalena gana agua, lo que me indica que el acuífero aporta agua a este, y en ciertas zonas donde las líneas de flujo salen del río aportando este al acuífero, y el otro escenario evidenciado al Noroeste donde se presenta un flujo atraído por el río Cimitarra. En las áreas donde se presenta la dirección de flujo predominante se consideran zonas con potencial de recarga evidenciado en la zona norte, donde la mayoría de captaciones se encuentran ubicados en los depósitos aluviales (A1), presentando una dirección de flujo atraído hacia el río Magdalena con una dirección hacia el Norte.

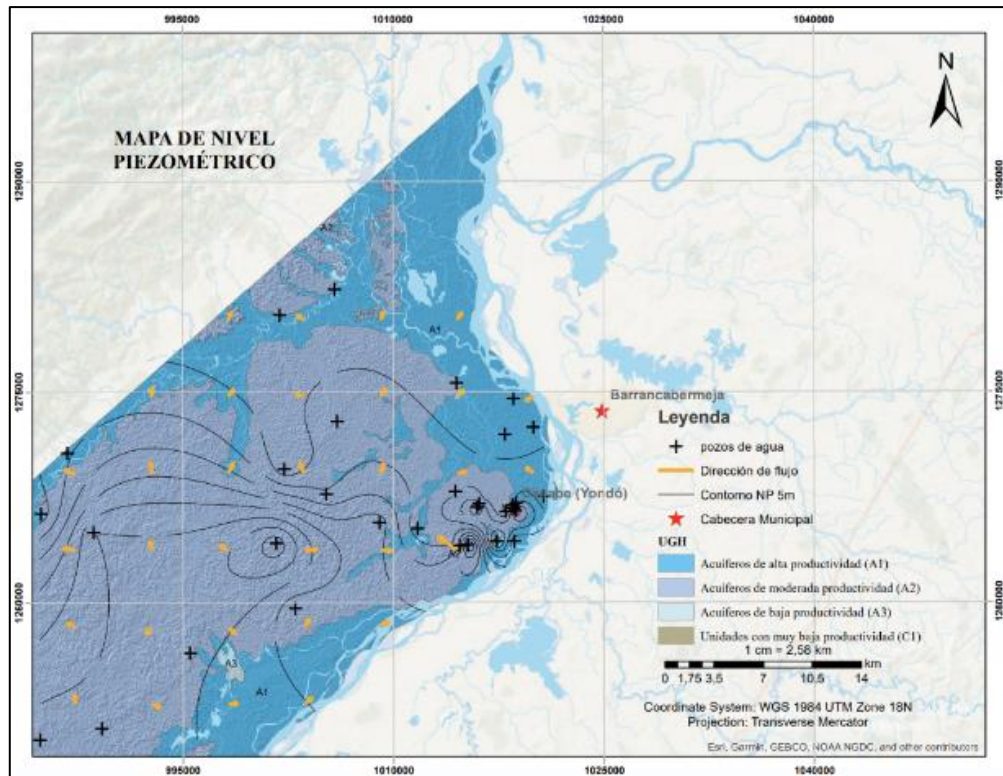


Figura 14. Nivel piezométrico y dirección de flujo.

7.3 Caracterización hidráulica

Las pruebas de bombeo se emplean para determinar las características hidráulicas de un pozo y del acuífero que captan, suministrando datos sobre su transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S); información con respecto al comportamiento del acuífero frente a un bombeo. En estos casos es necesario tanto la conductividad hidráulica (K), como el coeficiente de almacenamiento (S), determinan el caudal de bombeo más recomendable y profundidad de donde ubicarse la bomba respecto al caudal determinado de explotación, existencia de bordes impermeables cercanos, zonas de recarga entre otros y proceder a una clasificación de los acuíferos y darle un buen manejo a este recurso hídrico (Villanueva & López, 1984).

Atendiendo a las características geológicas e hidrológicas de Yondó, la empresa PERCONSA utiliza el Aquifer Test, Versión 2016.1, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc. (Roehrich). Para hacer la interpretación y definir las características hidrogeológicas del acuífero; el análisis de los suministrados se hace con base a las Tabla 7 según Villanueva & López, (1984).

Tabla 7. Transmisividad hidráulica de acuerdo con el tipo de acuífero

T(m ² /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	pozos de menos de 1 l/s con 10 m de presión teórica
10 < T < 100	Baja	pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de presión teórica
100 < T < 500	Media a alta	pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de presión teórica
500 < T < 1000	Alta	pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de presión teórica
T > 1000	Muy alta	pozos superiores a 100 l/s con 10 m de presión teórica

Fuente: (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984)

En la Tabla 10 del Anexo se determina las coordenadas de los 17 pozos existentes y la dirección del corte en la Figura 15. Para los parámetros evaluados de cada pozo lo obtuvieron con el software Aquifer Test, Versión 2016.1, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc. (Roehrich). Determinados los parámetros hidráulicos se tuvo en cuenta los niveles estáticos, niveles dinámicos y abatimientos registrados de cada pozo con el fin de saber el comportamiento del acuífero mediante bombeo, sus respectivos abatimientos registrados totales y el abatimiento aprovechable.

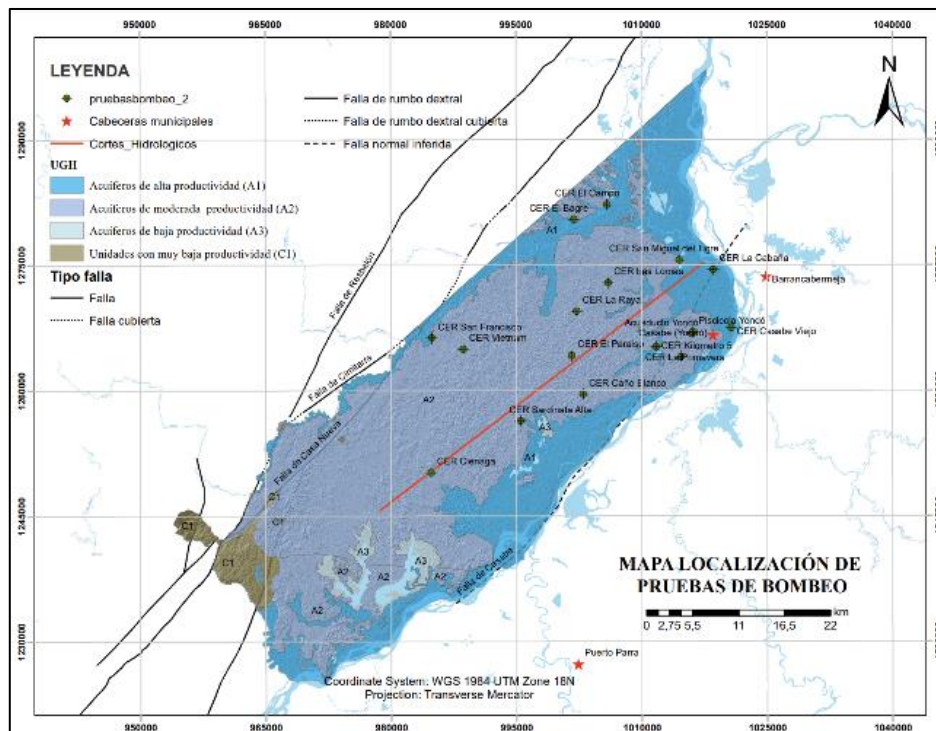


Figura 15. Localización de pruebas de bombeo.

Se obtuvo que de los 17 pozos con prueba de bombeo realizados por la empresa PERCONSA, la mayoría tiene entre 40 y 50 metros de profundidad con sistemas de bombeo los cuales explotan caudales de 1.30 l/s en promedio y solo en el caso del pozo del acueducto de Yondó su profundidad es de 120 metros con un aforo de 14.10 l/s.

En el caso de los niveles piezométricos localizados al oriente del área de estudio están por debajo de los 120 m.s.n.m con niveles freáticos que se encuentran desde los 10 a los 40 metros, en el caso de la zona urbana del municipio en la zona norte los niveles piezométricos inician desde los 61 m.s.n.m con niveles freáticos desde los 2 metros de profundidad. esto indicándonos que posiblemente dichos pozos estén captando agua de diferente acuífero debido a que los niveles piezométricos no presentan similitud y que los niveles dinámicos varían en todos los pozos.

Los pozos tienen bombeo en promedio de 1 l/s en los centros educativos rurales (CER) y para el caso del acueducto su bombeo es de 14 l/s promedio al día.

Teniendo los niveles dinámicos de los pozos se determinó con el bombeo que se extrae, estos abatimientos registrados son bajos por lo que el aporte del acuífero es alto respecto al nivel de bombeo extraído por el municipio, esto teniendo en cuenta que los pozos en su mayoría no superan los 70 metros de profundidad.

En el caso de las transmisividades calculadas por PERCONSA por medio del software Aquifer Test, Versión 2016.1, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc. (Roehrich), se tienen valores similares de transmisividad en un 90% de los pozos existentes que oscilan desde los 10 a los 100 m²/día, estas transmisividades hacen referencia a acuíferos libres y semiconfinados los cuales se correlacionan con la estratigrafía de la formación geológica existente, Grupo Real y la Formación de Depósitos Aluviales, donde se caracteriza por tener una primera capa de arenas de tamaño medio fino y medio hasta unos 20 metros de profundidad aproximadamente, seguido de espesores de materiales finos como limos y arcillas las cuales hacen parte de esa capa impermeable los cuales van hasta los 30 metros aproximados, en esta capa se puede observar una correlación de los niveles estáticos de los pozos ya que en algunos pozos están localizados después de los

20 metros de profundidad.

Se observa en la Figura 16 que los niveles estáticos de los pozos tienen un patrón topográfico coherente en el Grupo Real y también un patrón donde los niveles están mucho más altos en los depósitos Aluviales.

Teniendo esto se puede determinar que en el municipio de Yondó se pueden encontrar dentro de los acuíferos A1 y A2 pozos que captan acuíferos tipo libres y semiconfinados; debido a la heterogeneidad litológica de las unidades. Para el caso de los pozos localizados en los depósitos aluviales se determina que no existen capas impermeables las cuales determinan que no hay presencia de una capa sello por lo que esos pozos según su transmisividad y los valores de los registros eléctricos son en su mayoría acuíferos libres.

Los pozos localizados sobre el Grupo Real son diversos según de la zona donde se encuentre. Generalmente presentan una capa acuífera con disponibilidad de recurso hídrico subterráneo entre los primeros 15 – 20 metros de profundidad. A esto le siguen unas capas que muestran resistividades inferiores a los 15 Ohm.m por lo que se caracterizan por zonas poco permeables; luego de los 30 metros de profundidad los pozos tienden a tener valores de resistividad más altos el cual corresponde a zonas de materiales de tamaño más grueso lo que determina que esos pozos tienen aporte de acuíferos libres y semiconfinados los cuales también se explotan actualmente.

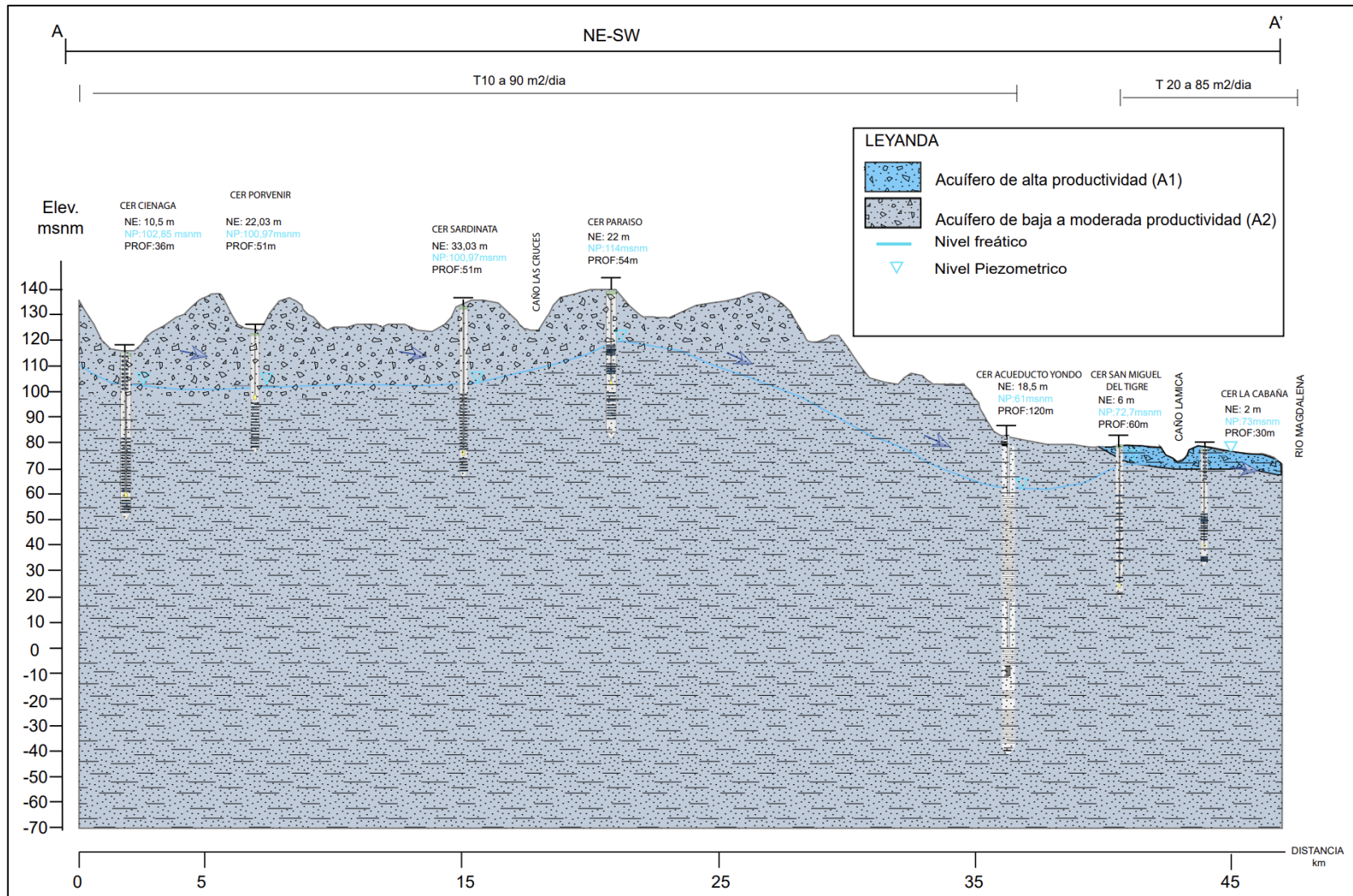


Figura 16. Perfil hidráulico.

8. DISCUSIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PLANTEADO

El presente modelo hidrogeológico es la representación generalizada de la dinámica y estática de un sistema hidrogeológico donde se describe el comportamiento de los acuíferos, la definición de las unidades hidrogeológicas, y características hidráulicas y del flujo de las aguas subterráneas, para el municipio de Yondó Antioquia (Figura 17). El modelo se ubica sobre la provincia hidrológica Valle Medio del Magdalena, y pertenece al sistema acuífero Nare-Berrio-Yondó (IDEAM, 2013).

Según los datos registrados periódicamente por las estaciones pluviométricas del IDEAM cerca de la zona de Yondó, en la zona norte se observa un comportamiento bimodal de la precipitación, siendo la mayor precipitación de 398.05 mm. Por otro lado, el periodo más seco registra una pluviosidad de 41.96 mm (Figura 12). Entre los meses lluviosos (mayo – noviembre) dado la disponibilidad de lluvia es donde se registra la recarga, sin embargo entre los meses secos (diciembre, enero y febrero), debido al balance entre la precipitación y evapotranspiración no se evidencia recarga debido a que la humedad de los suelos llega al punto de marchitez (Gráfico 1).

En el esquema de síntesis del Modelo Hidrológico Conceptual (Figura 17) se exponen los valores promedios anuales para las variables analizadas a partir de los ráster calculados. La mayoría de las variables analizadas para este cálculo no se obtuvieron valores reales de campo ya que la información secundaria carecía de ellas por lo que se utilizaron en su mayoría estándares de la bibliografía para realizar cálculos aproximados, obteniéndose valores como la recarga promedio de 756.6 mm/año, este dato cercano al registrado por Vélez, (2001) el cual estimo una recarga promedio general en la zona de 833.51 mm/año. Se puede observar que la zona donde presenta mayor recarga se asocia a las rocas sedimentarias del Grupo Real (A2) y depósitos cuaternarios (A1), siendo este el acuífero último el acuífero más captaciones en la zona. Para las zonas de altas pendientes que concuerdan con la geología de rocas cristalinas el potencial de recarga es mucho más bajo y estaría dado por porosidad secundaria (sistemas de fallas o fracturamiento).

En la Figura 14 el agua presenta un flujo hacia el Río Magdalena y Cimitarra con dirección preferencial hacia el Norte.

En la zona preferencial del proyecto se evidencia zonas con un grado de permeabilidad media a baja, el primero relacionado al Grupo Real diferenciando dos tipos de acuíferos; uno en las zonas más retiradas del Río Magdalena se comporta como acuífero semiconfinado y en zonas más cercanas a río como acuíferos libres, su litología muestra capas arenosas de tamaño medio a fino con intercalaciones de limos y arcillas. Los depósitos aluviales compuestos por sedimentos no consolidados con características litológicas de arenas de grano muy fino a medio, con intercalaciones de limos y algunos niveles gravas con transmisividades del orden de 30 a 87 m²/día comportándose como acuíferos tipo libre.

Debido al rango de transmisividades presentes desde los 10 m²/día a los 90 m²/día, clasificando sus transmisividades según Villanueva & López, (1984), corresponde a zonas de baja productividad con pozos que pueden producir desde 1 l/s y 10 l/s de presión teórica.

Teniendo en cuenta los niveles piezométricos de los pozos existentes se encuentra que los pozos localizados en la formación Grupo Real tiene un comportamiento heterogéneo y están sobre esos acuíferos libres a semiconfinados los cuales sus niveles productivos más utilizados hacen parte de capas de arenas a partir de los 20 metros de profundidad. Para los pozos ubicados en los Depósitos Aluviales se determinó que hacen parte de un sistema acuífero principalmente libre.

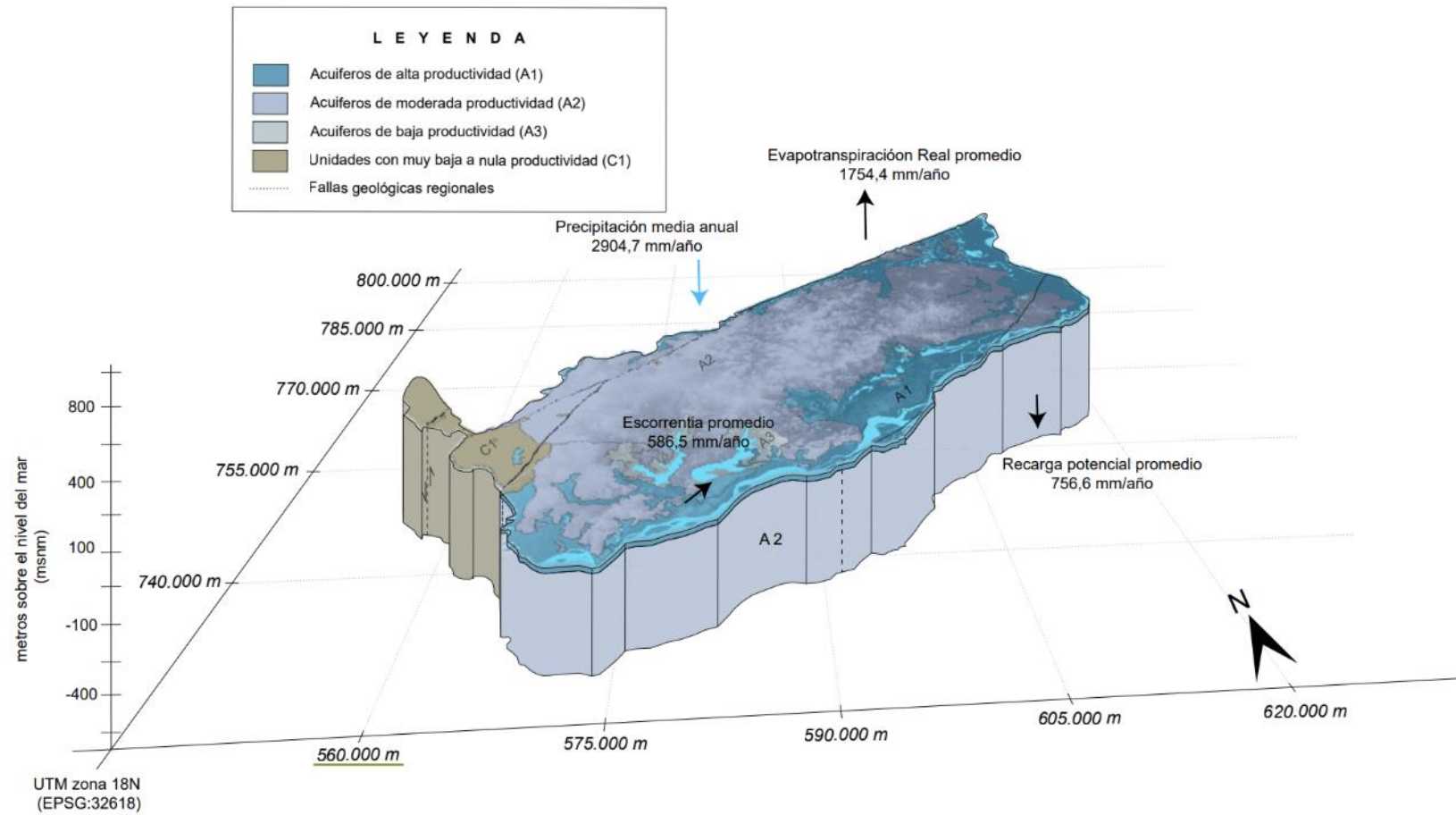


Figura 17. Modelo Hidrológico Conceptual del municipio de Yondó.

9. CONCLUSIONES GENERALES DEL MODELO

El modelo hidrogeológico conceptual realizado permitió conocer de manera generalizada la estructura y variables más representativas que rigen el comportamiento del recurso hídrico subterráneo en el municipio de Yondó – Antioquia. Este estudio presenta una herramienta que permitiría gestionar y comprender el comportamiento del agua subterránea en el municipio; con este se ayudaría a la toma de decisiones respecto a problemáticas ambientales del recurso hídrico de parte de las autoridades competentes. Se cuenta con lo necesario para dar alternativas iniciales que aporten al conocimiento de los acuíferos, siendo algunos de los hallazgos principales del modelo:

- Los resultados de los datos meteorológicos presentan un comportamiento de la precipitación media mensual bimodal, con registros de mayor precipitación de 398.05 mm, y por otro lado el periodo más seco registra una pluviosidad de 41,96 mm.
- La recarga potencial promedio de la zona de estudio es aproximadamente de 756,6 mm/año, siendo las formaciones del Grupo Real y los depósitos aluviales cuaternarios los que tienen mayor potencial de infiltración.
- Las zonas de mayor infiltración coinciden con pendientes bajas, cobertura vegetal de bosque y pastos que presentan suelos franco-arenosos, mostrando escenarios factibles para la infiltración y almacenamiento del agua.
- En general, dado de su gran extensión en el municipio, en gran parte de la zona es posible la explotación de aguas subterráneas por medio de pozos o aljibes localizados dentro de las unidades hidrogeológicas: Depósitos aluviales (A1) y la Formación Grupo Real (A2).
- Los resultados interpretados con los datos geofísicos permitieron corroborar y detallar la geología del subsuelo con la geología descrita por la bibliografía.
- En la zona norte del municipio de Yondó se encuentra localizadas las principales explotaciones petrolíferas, siendo la zona con mayor vulnerabilidad a la contaminación de agua subterránea.
- Los datos de transmisividad presentan áreas de recarga baja debió al tipo de litología presente en la zona.

- Se aconseja la concientización de la población para el uso consciente y adecuado del recurso hídrico subterráneo, no solo en su consumo sino además en su cuidado.

El modelo hidrogeológico conceptual presentado en este documento representa un primer acercamiento sobre la conducta del recurso hídrico subterráneo en la zona estudiada únicamente utilizando la información de la bibliografía. Sin embargo, dada la escasez y detalle de los datos utilizados, es necesario de la profundización de dicho modelo para obtener resultados más precisos, sobre todo de las variables ambientales analizadas. Por ejemplo, la recarga calculada es un valor muy generalizado dado que la mayoría de las variables no contaban con información real de campo si no que fueron tomados estándares de la bibliografía lo más cercano posible al escenario, por eso se recomienda en estudios posteriores mejorar los datos de la recarga a través de datos medidos en campo.

Para futuros estudios se esperaría que el modelo hidrogeológico conceptual sea mejorado no solo en la adquisición de datos precisos de campo y redes de monitoreo, sino también en el desarrollo de un modelo numérico más preciso, y contemplar la caracterización hidrogeoquímica y del estado del agua subterránea.

10. BIBLIOGRAFÍA

- AIH. (1995). *Legenda internacional para mapas hidrogeológicos*. Paris.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A., & Martínez, J. F. (2007). *Colombian sedimentary basins: nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal*. Bogotá, Colombia.: Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).
- Butler, S. (1957). *Engineering Hydrology*.- 356 págs. . EE.UU.: Prentice Hall Inc.
- Calle, B., González, H., R. de la Peña, D., Escorce, B., Durango, J., & Otros. (1980). *Mapa preliminar de la Plancha 166 (Jericó) Escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Cañas, H., Pérez, O., Ruíz, D., Herrera, W., Morales, C. J., Alvarado, S., . . . Watson, A. (2019). *Modelo Hidrogeológico Conceptual Valle Medio del Magdalena Planchas 108 y 119 Puerto Wilches, Barrancabermeja, Sabana de Torresy San Vicente Chucurí*. Bogotá D.C.: SGC.
- CAR. (2018). *Formulación del Plan de Ordenamiento y Manejo de La Cuenca Hidrográfica Río Carare Minero*. Cundinamarca.
- Custodio, E., & Llamas , R. M. (2001). *Hidrología Subterránea. 2ª ed.* Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Faustino, J. (2006). *Notas de clase para el curso identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica*. San Salvador: CATIE.113 p.
- Fonseca , H. A., Fuquen, J. A., Mesa, L. D., Talero, C. A., Pérez, O. G., Porras, J. J., . . . García, Y. (2012). *Cartografía Geológica de la Plancha 108- PuertoWilches, Escala 1:100.000*. Sogamoso: INGEOMINAS.
- Fonseca, H. A., Fuquen, J. A., Mesa, L. D., Talero, C. A., Pérez, O. G., Porras, J. J., . . . García , Y. (2011). *Cartografía Geológica de la Plancha 133- Puerto Berrío Escala 1:100.000 Memoria Técnica*. Sogamoso: Ingeominas.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater. Prentice Hall . . New Jersey, USA:* 604p.
- García, J., Lopez, N., & Muñoz, J. (2011). *Aplicación De La Prospección Geofísica Utilizando El Método Shlumberger para la Exploración Del agua subterránea en Canton Los Magueyes, Colonia Santa Lucia, Municipio de Ahuachap*. Salvador.
- García, M., & Vargas, N. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA. . Bogotá D.C.*

- Garduza Rueda, V. M. (2019). *Manual de Registros Geofísicos de Pozo y algunas Aplicaciones 2ª vol.* Mexico: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, A.C.
- Gómez , E. (2001). *Tectonic Controls On The Late Cretaceous to Cenozoic sedimentary fill of the Middle Magdalena Valley Basin, Eastern Cordillera and Llanos basin, Colombia.* New York: Cornell University.
- Gómez, L. A., Patiño, A., Lancheros, A. J., Guerra, A., Renzoni, G., Beltrán, A., . . . Manrique, M. (2009). *Cartografía Geológica y Muestreo Geoquímico escala 1:100.000 de las Plancha 119 .* Barrancabermeja, Bogotá: Ingeominas.
- Gómez, L. A., Patiño, A., Renzoni, G., Beltrán, A., Quintero, C., & Manrique, M. (2008). *Cartografía Geológica y Muestreo Geoquímico escala 1:100.000 de las Plancha 119 - Barrancabermeja.* Bogotá: Ingeominas.
- Harris, I., Osborn, T., Jones, P., & Lister, D. (2020). *Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset.* . Obtenido de <https://rdcu.be/b3nUI>
- Hincapié Vélez, G. (2003). *ATLAS DE AGUAS SUBTERRANEAS DE COLOMBIA EN ESCALA 1:500.000.* Bogotá.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010. I. .* Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.420 p.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. .* Bogotá, D. C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales 72p.
- IDEAM. (2013). *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas.* Bogotá, D. C.: : Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.
- IDEAM. (2014b). , *Sistemas Acuíferos de Colombia Anexo 4 ENA 2014, Fichas síntesis de sistemas acuíferos y aguas subterráneas frente a indicadores.* Colombia,: IDEAM, 77 p.
- IDEAM. (2018). *Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018.* Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC. (2007). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Antioquia.*
- IPCC, . (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working*

- Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, : In press, doi:10.1017/9781009157896.
- Linsley , R., Khler , M., & Paulus. (1958). *Hydrology for engineers*. McGraw Hill, NuevaYork.: 340 págs.
- Malagón, J. P. (2017). *Análisis Hidrogeoquímico Multivariado del Agua Subterránea del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Malagón, J., Piña, A., Argüello, S., & Donado, L. (2021). *Análisis hidrogeoquímico multivariado del agua subterránea del sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena*. Colombia: Estudio a escala regional Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73.
- Mantilla, D. (2021). *Inventario de puntos de agua subterránea, un instrumento para la gestión del recurso hídrico*.
- Matus Silva, O. D. (2007). *Elaboración Participativa de una Metodología para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en Subcuencas Hidrográficas, Aplicada a la Subcuenca del Rio JUCUAPA, Matagalpa Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica: Tesis de Maestría.
- Maya, M. y. (2015). *Elaboración de la Cartografía Geológica Conjunto de Planchas Escala 1:100.000 Ubicadas en Cuatro Bloques del Territorio Nacional, Identificados por el Servicio Geológico Colombiano Plancha 118- San Francisco*. Medellin: Ingeominas
- Minambiente. (2014). *Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos*.
- ONU. (1972). *Manual de instrucciones, estudios hidrológicos*. . San José, Costa Rica.: 540 págs. ONU Publ. N° 70.
- Ordoñez Gálvez, J. (2011). *Cartilla Técnica Ciclo Hidrológico. Peru: . Perú.: Foro Peruano para el Agua—GWP* .
- Rawls, W., ASCE, M., Brakensiek, L., & Miller, N. (1983). *GREEN-AMPT INFILTRATION PARAMETERS FROM SOILS DATA*. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Sarmiento, L. (2001). *Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Inferences from tectonic models*. . Netherlands

research, School of Sedimentary Geology: Thesis Doctoral.

- Scanlon, B., Healy, R., & Cook, P. (2002). *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. . Hydrogeol Journal, 18-39. doi:10.1007/s11269-017-1865-5.
- Schosinsky , G. (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.-* . Costa Rica: Rev. Geol. Amér. Central, 34-35: 13-30.
- Schosinsky , G., & Losilla, M. (2000). *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. . Revista Geológica de América Central 23, 43–55.
- Thornthwaite, C., & Mather. ., J. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Laboratory of Climatology. . NJ, USA.: Centertown.
- Vélez, M. (2001). *Evaluación del Potencial de los Acuíferos de La Zona de Yondó*. Medellín.
- Villanueva Martínez, M., & Iglesias López, A. (1984). *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. España: Instituto Geológico y Minero de España.

11. ANEXO.

Tabla 8. Formaciones geológicas de la zona de estudio.

Unidad geológica	Litología	Características	Edad
Depósitos Aluviales	<p>Se caracterizan por una serie de arenas mal gradadas, con intercalaciones de arcillas, y depósitos inconsolidados de conglomerados, se encuentran compuestos por rocas genéticamente diversas, las cuales se destacan por la predominancia de cuarzoarenitas, cuarzo lechoso, chert, rocas vulcano sedimentarias, metamórficas e ígneas con presencia de arenas de grano medio a muy fino, gravas, arenas y limos, la mayor parte de los cantos que constituyen el depósito son redondeados a subredondeados, presentan una selección moderada con un elevado transporte puesto que estos materiales proceden de las partes altas de la cuenca del Río Magdalena y de sus afluentes</p>	<p>Esta unidad se encuentra ocupando una gran extensión del área de estudio, se caracteriza por suprayacen discordantemente parte de la Formación Mesa, el Batolito de Segovia y el Conjunto Volcánico de La Malena. Estos depósitos son de un valioso interés económico puesto que en ciertos lugares presenta un gran contenido de oro diseminado en las gravas y la matriz arcillosa que integran esta unidad. Con espesores máximos de 5 metros.</p>	Cuaternario
Depósitos fluviolacustes	<p>Esta unida litológicamente se encuentra conformada por sedimentos finos,</p>	<p>Dentro del área de estudio estos depósitos se encuentran asociados</p>	

Unidad geológica	Litología	Características	Edad
	<p>principalmente arenas y material lodoso de color N7, con altos contenidos de materia orgánica, restos vegetales desarrollados en ambientes principalmente de baja energía y de alta periodicidad estacional que permiten la acumulación de este tipo de material</p>	<p>con antiguas zonas de inundación del río Magdalena y parte de las áreas actualmente constituidas por ciénagas y meandros abandonados del mismo río, como producto de la intensa dinámica fluvial representada por la acción de socavación y sedimentación difusa que dan lugar al desprendimiento y conformación de cuerpos de agua aislados. Espesores de 2 a 3 metros.</p>	Cuaternario
Depósitos de terraza	<p>Litológicamente los depósitos de terraza se encuentran conformados por cantos redondeados de rocas ígneas y sedimentarias dentro de las cuales se encuentran chert, cuarzoarenitas, granitos y material piroclástico entre otros. Los tamaños van desde guijos de 5cm aproximadamente hasta cantos de 20 a 25cm de diámetro, presentan una mala selección, son redondeados a subredondeados y de</p>	<p>Estos depósitos constituyen una pequeña porción dispersa en algunas de las zonas planas, donde los procesos de depositación evidencian un notable cambio de energía dentro del transporte de sedimentos, dando lugar a cambios granulométricos en los materiales depositados horizontalmente. Espesores máximos de 5 metros</p>	Cuaternario

Unidad geológica	Litología	Características	Edad	
Formación Mesa	<p>colores variables de acuerdo al tipo de rocas involucradas. La matriz predominantemente es arenosa de grano grueso a medio, moderadamente seleccionado constituida por cuarzo, feldespatos, moscovita, líticos, óxidos de hierro y material arcilloso.</p>	<p>La expresión morfológica de la Formación Mesa corresponde a sistemas de terrazas erosionadas y colinas bajas, probablemente como producto de estados avanzados de erosión del Río Magdalena. Aunque esta unidad se extiende ampliamente, se encuentra en afloramientos aislados de poco espesor - inferiores a los 30m, en los que se puede observar principalmente areniscas líticas, areniscas feldespáticas ricas en líticos volcánicos y areniscas conglomeráticas con guijos finos a medios de rocas volcánicas andesíticas, pumita, cuarzo ahumado y chert. Internamente exhiben estratificación cruzada en artesa, estratificación</p>	<p>El nombre de Mesa no corresponde a una localidad geográfica o accidente topográfico, sino que hace referencia a la característica geomorfológica que presentan estos sedimentos que por efectos de la erosión se destacan en las planicies como grandes mesas. Por lo general, los estratos yacen horizontales o buzan ligeramente hacia el oeste, pero las rocas más cementadas tienen posiciones más variables; suprayacen inconformemente rocas cristalinas y aumentan su espesor hacia el este, donde son disectadas por</p>	Neogeno

Unidad geológica	Litología	Características	Edad
Grupo Real	<p>cruzada cabalgante y el Río Magdalena</p> <p>estratificación plana paralela continua</p> <p>Arenisca gris amarillento de grano grueso a muy grueso friable, feldespática y con conglomerática con intercalaciones de conglomerados y arcillolitas arenosa de color verde que predominan hacia el parte superior. Conglomerado gris amarillento friable con guijos de arenisca, rocas ígneas, metamórficas de 15cm de diámetro; debajo arenisca griaamarilenta clara de grano grueso que se alterna con conglomerados con guijos de areniscas rocas ígneas y metamórficas, las areniscas predominan hacia la parte media. Hacia la base se presenta una continuidad de alternancia de conglomerados grueso friable con los quijos de arenisca limolita, rocas ígneas y metamórficas algunos de chert y muy pocos de rocas volcánicas en capas de hasta 2m de espesor; con areniscas gris amarillenta de grano grueso a conglomerática friable</p>	<p>En el VMM el Grupo Real se presenta gran extensión con aproximadamente 2000 metros de espesor acumulados durante el Neógeno</p>	

Unidad geológica	Litología	Características	Edad
	<p>altamente feldespática en capas de hasta 1.5m de grueso alternada con capas de conglomerados en capas de hasta 2m de grueso. Cabe mencionar que esta formación tiene porosidad del 25%; siendo una roca óptima para el almacenamiento de petróleo.</p>		
<p>Batolito de Segovia</p>	<p>pórfido monzogranito, el metamorfismo está asociado al contacto con rocas precámbricas pertenecientes al Complejo Metamórfico de San Lucas. También afloran cuarzomonzonitas con textura fanerítica, holocristalinas</p>	<p>Este nombre fue designado a la unidad cartografiada en el flanco oriental del Departamento de Antioquia como "rocas ígneas localizadas principalmente al este de la Falla de Otú" descritas como dioritas y cuarzodioritas. Álvarez (1983) utiliza por primera vez el término Batolito de Segovia para referirse al cuerpo plutónico localizado al nororiente del Departamento de Antioquia que se extiende hacia el norte del Departamento de Bolívar.</p>	<p>Jurásico</p>
<p>Conjunto Volcánico de la Malena</p>	<p>Según González, H (2001) está constituido por flujos volcánicos, riolíticos a</p>	<p>Feininger (1970) reporta esta unidad al este de la Falla Otú, la describe</p>	

Unidad geológica	Litología	Características	Edad
	<p>riodacíticos, brechas volcánicas y tobas hacia la parte superior del conjunto; diques basálticos, lamprófidos, pórfidos andesíticos y traquíticos son abundantes localmente. Los flujos de lavas ácidas y brechas volcánicas están hacia la base del conjunto, se caracterizan por su color rojizo, con intercalaciones de niveles vulcano – sedimentarios constituidos por clastos de tamaño grava, de rocas volcánicas en una metástasis riolítica de color rosado</p>	<p>como cuerpos de rocas volcánicas félsicas, con textura porfídica hasta afanítica; relacionados con el extremo sur del Batolito de Segovia.</p> <p>González, H., (2001) considera dos cuerpos: uno occidental de 17 km de longitud, en sentido norte – sur y ancho irregular entre 2 y 7km y un segundo cuerpo hacia el este, separado del anterior por la diorita del Batolito de Segovia, con 12 km de extensión en sentido noreste, por 2km de ancho.</p>	Jurásico
Gneis de San Lucas	<p>Se presenta como un cinturón de rocas metamórficas de alto grado. Petrográficamente consiste en neises cuarzo-feldespáticos (neises cuarzo-feldespáticos con biotita, neises cuarzo-feldespáticos con hornblenda) y rocas metamórficas (neis hornblendico, granulitas, metagabros)</p>	<p>Bogotá y Aluja (1981) denominaron esta unidad litoestratigráfica como Neis Cuarzo Feldespático de San Lucas, al paquete rocoso que se extiende desde la Serranía de San Lucas al norte, hasta el suroccidente de Puerto Berrío. Esta unidad ha sido relacionada dentro de la Geología del Cuadrángulo I-9 al oriente del Departamento de Antioquia</p>	Proterozoico

Unidad geológica	Litología	Características	Edad
		(INGEOMINAS, 1970) descrita como una unidad litoestratigráfica de rocas metamórficas del Proterozoico ubicadas al este de la Falla de Otú.	

Tabla 9. Características de las unidades hidrogeológicas.

SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR / POROSIDAD PRIMARIA							
A1	Depósitos	Depósitos aluviales y de llanura de inundación	Está compuesta por sedimentos no consolidados de areniscas de grano muy fino a medio, con intercalaciones de limolitas, presentan algunos niveles de gravas matriz soportada, embebidos en arenas finas y limos, con transmisividades del orden de 30 a 87 m ² /día.	Espesores variables hasta 10 m (Cañas et al., 2019)	Transmisividad 30 a 87 m ² /día (PERCONSA)	42 (pozos y aljibes)	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional de alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial.
		Terrazas aluviales	gravas clasto soportadas a matriz soportadas con arenas, con intercalaciones de limos.	espesores entre 3 y 4 m	transmisividad varían entre 100 a 250 m ² /día (Cañas et al., 2019)	No se dispone de datos	
A2	Sedimentaria	Grupo Real	Niveles arenosos mal seleccionados de grano fino a grueso embebidos en una matriz limoarcillosa, presenta variaciones faciales a granulometrías más finas las cuales disminuyen su permeabilidad.	3.600 m (Morales et al., 1956 en Fonseca, et al., 2012)	Transmisividades inferiores a 200 m ² /día (PERCONSA)	74 (pozos y aljibes)	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, de mediana productividad, conformados por sedimentos cuaternarios

		Formación mesa	Está constituida por areniscas, limolitas y conglomerados clasto soportado a matriz soportada débilmente consolidados con intercalaciones de capas delgadas de arcillolitas, considerados como depósitos de origen fluvial.	575 m (Taborda, 1965 en cañas, et al., 2019).	No se dispone de datos	no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial, glaciofluvial, marino y volcanoclástico.
A3	Depósitos	Depósitos fluviolacustres	Sedimentos finos, principalmente arcillas y limos de tamaño de grano limo-arcilloso, limo-arenoso y arcillo-arenoso	aproximados de 3.5 m	No se dispone de datos	Sistemas acuíferos discontinuo de extensión local, de baja productividad, conformada por sedimentos cuaternarios y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente aluvial lacustre, coluvial, eolico y marino marginal.

SEDIMENTOS Y ROCAS ESENCIALMENTE CARENTES DE RECURSOS EXPLOTABLES DE AGUA SUBTERRÁNEA

C1	Ígneo	Batolito de Segovia	abundancia de fragmentos rocosos distribuidos de manera caótica dentro de una matriz granular de tonos 10YR8/6 a 5YR4/4 producto de la meteorización de lavas acidas que transportaron consigo rocas intrusivas que van desde granitos, monzogranitos, dioritas cuarzomonzonitas y granodioritas	270km	Fuente especificada no válida.	
		Conjunto volcánico de la Malena	constituido por flujos volcánicos, riolíticos a riolacíticos, brechas volcánicas y tobas hacia la parte superior del conjunto; diques basálticos, lamprófidos, pórfidos andesíticos abundantes localmente.	Varían entre 12 a 17 km	Fuente especificada no válida.	No se dispone de datos
	Metamórfico	Gneis de San Lucas	Gneises cuarzo feldespáticos con lentes de anfibolita y mármol.		Desconocido	Por sus características litológicas, es de baja importancia hidrogeológica.

Tabla 10. Características hidráulicas de los pozos profundos existentes.

PRUEBA DE BOMBEO	X	Y	Nivel estático del agua	Nivel de bombeo estabilizado	Abatimiento registrado	Caudal aforado LPS	Capacidad específica (q/s)	Abatimiento disponible	Abatimiento aprovechable	profundidad de instalación de la bomba	profundidad de pozo	THEIS transmisividad m ² /día	coeficiente de almacenamiento (s)	conductividad (k)	Unidad hidrogeológica
CER CIENAGA	984794,04	1250219,59	10,05	23,10	13,05	1,20	0,09	25,95	12,90	22,00	36,00	1,04 × 10 ⁻¹	2,95 × 10 ⁻⁵	4,03 × 10 ⁻¹	A2
CER EL BAGRE	1001918,65	1280494,74	3,19	7,55	4,36	1,20	0,28	40,81	36,45	18,00	44,00	8,64 × 10 ⁻¹	1,00 × 10 ⁻⁴	2,12 × 10 ⁻⁰	A2
CER EL CAMPO	1005839,90	1282298,29	3,50	13,63	10,13	1,30	0,13	17,50	7,37	16,00	21,00	4,71 × 10 ⁻¹	1,81 × 10 ⁻²	5,52 × 10 ⁻¹	A1
CER LA CABAÑA	1018594,74	1274492,35	2	3,06	1,06	1,30	1,23	28,00	26,94	16,00	30	8,66 × 10 ⁻¹	1,59 × 10 ⁻¹	3,09 × 10 ⁻⁰	A1
CER LA PRIMAVERA	1011750,33	1265298,97	3,19	7,55	4,36	1,30	0,30	36,81	32,45	16,00	40	3,01 × 10 ⁻¹	1,56 × 10 ⁻³	3,01 × 10 ⁻¹	A1
CER LA RAYA	1002239,78	1269524,72	8,28	10,44	2,16	1,40	0,65	31,72	29,56	16,00	40	1,07 × 10 ⁻²	1,00 × 10 ⁻⁷	3,39 × 10 ⁻⁰	A2
CER LAS LOMAS	1006009,76	1272922,63	9	10,28	1,28	1,60	1,25	31,00	29,72	23	40	1,97 × 10 ⁻²	1,00 × 10 ⁻⁷	6,34 × 10 ⁻⁰	A2
CER SAN FRANCISCO	984896,92	1266322,81	12	20,54	8,54	1,40	0,16	42,00	33,46	21	54	4,10 × 10 ⁻⁰	1,00 × 10 ⁻⁷	9,76 × 10 ⁻²	A2
CER CAÑO BLANCO	1002999,95	1259602,31	9,87	11,07	1,20	1,60	1,33	30,13	28,93	16	40	2,32 × 10 ⁻²	1,00 × 10 ⁻⁷	7,70 × 10 ⁻⁰	A2
CER EL PARAISO	1001651,60	1264213,27	22,00	44,00	22,00	1,20	0,05	32,00	10,00	46,00	54,00	6,31 × 10 ⁻⁰	1,24 × 10 ⁻⁵	1,97 × 10 ⁻¹	A2
CER KILOMETRO 5	1014724,88	1264058,65	30	39,16	9,16	1,30	0,14	42,00	32,84	39	72	2,24 × 10 ⁻¹	1,00 × 10 ⁻⁷	5,33 × 10 ⁻¹	A2
CER SAN MIGUEL DEL TIGRE	1014519,05	1275624,60	6,3	12,15	5,85	1,30	0,22	47,70	41,85	16	54	1,76 × 10 ⁻¹	3,42 × 10 ⁻³	3,69 × 10 ⁻¹	A2
CER SARDINATA ALTA	995494,31	1256389,15	33,03	36,06	3,03	1,30	0,43	17,97	14,94	18	51	9,70 × 10 ⁻¹	1,00 × 10 ⁻⁷	5,40 × 10 ⁻⁰	A2
ACUEDUCTO YONDO	1016000,92	1266793,09	24,1	38,2	14,10	14,50	1,03	95,90	81,80	40	120	1,16 × 10 ⁻²	2,44 × 10 ⁻⁴	1,21 × 10 ⁻⁰	A2
CER VIETNAM	988647,30	1264985,54	17	20,77	3,77	1,50	0,4	23,00	19,23	21	40	6,43 × 10 ⁻¹	1,00 × 10 ⁻⁷	2,80 × 10 ⁻⁰	A2
CER CASABE VIEJO	1020720,24	1267527,73	1,5	3,07	1,57	1,30	0,83	28,50	26,93	16	30	4,28 × 10 ⁻¹	8,62 × 10 ⁻¹		A1
PISCICOLA YONDO	1016134,66	1267046,88	9,22	21,23	12,01	2,00	0,17	30,78	18,77	38	40	1,98 × 10 ⁻¹	4,41 × 10 ⁻⁶	9,74 × 10 ⁻¹	A2

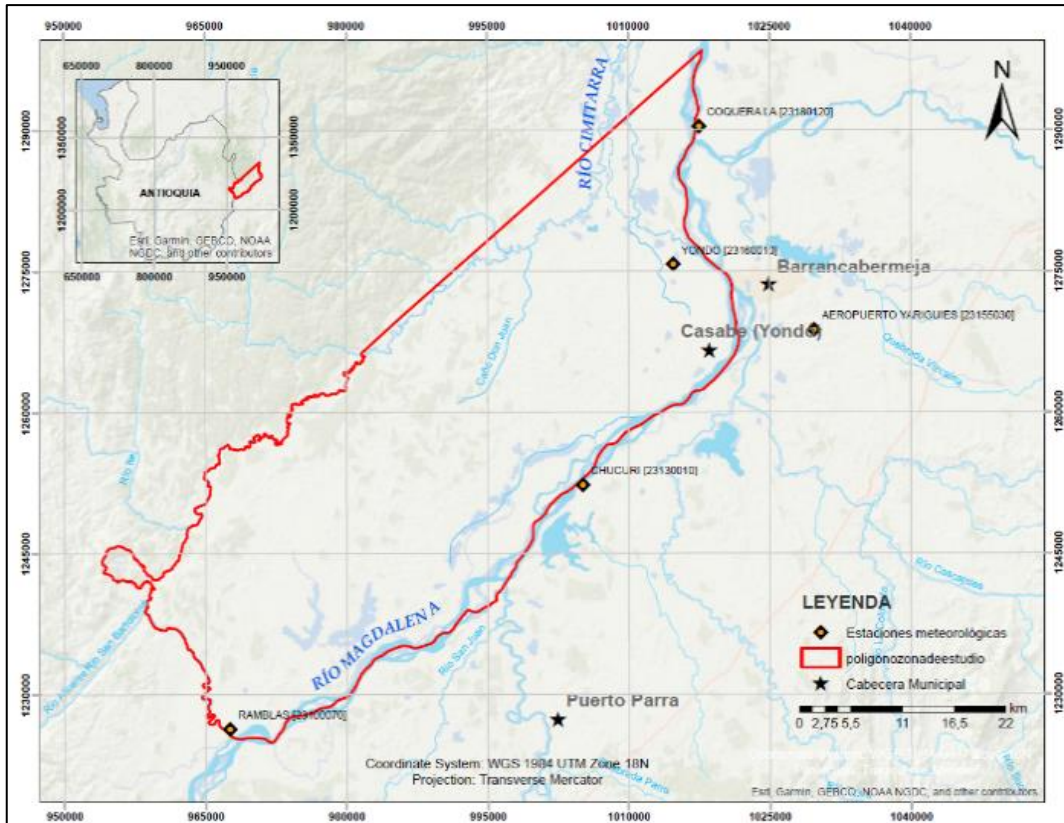


Figura 18. Localización de las estaciones meteorológicas

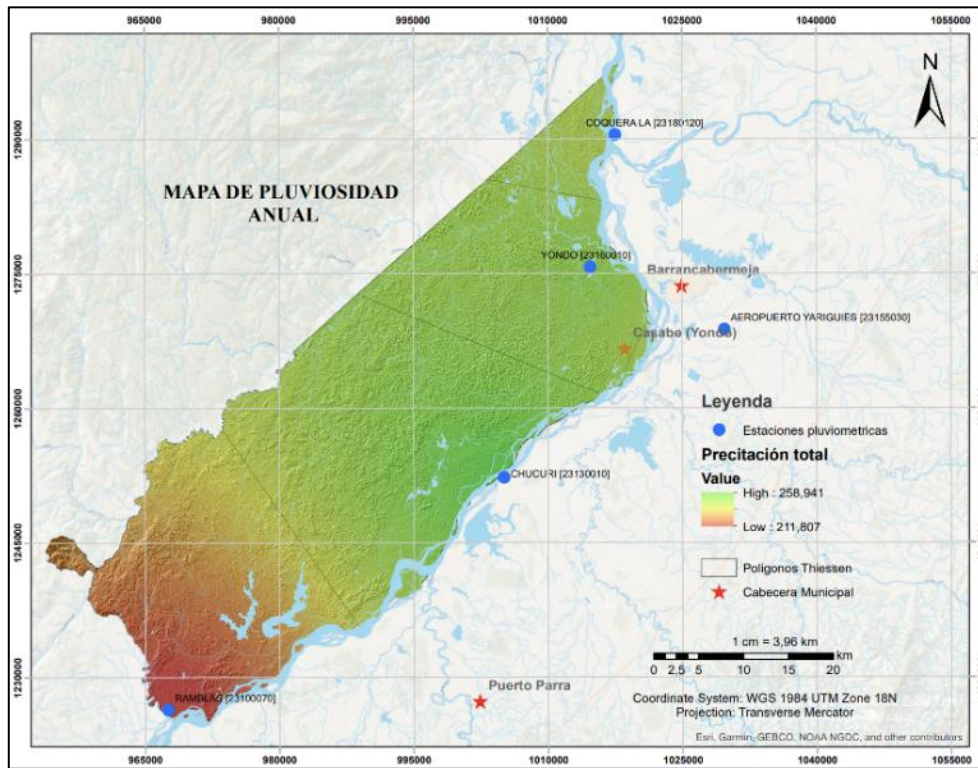


Figura 19. Precipitación anual promedio

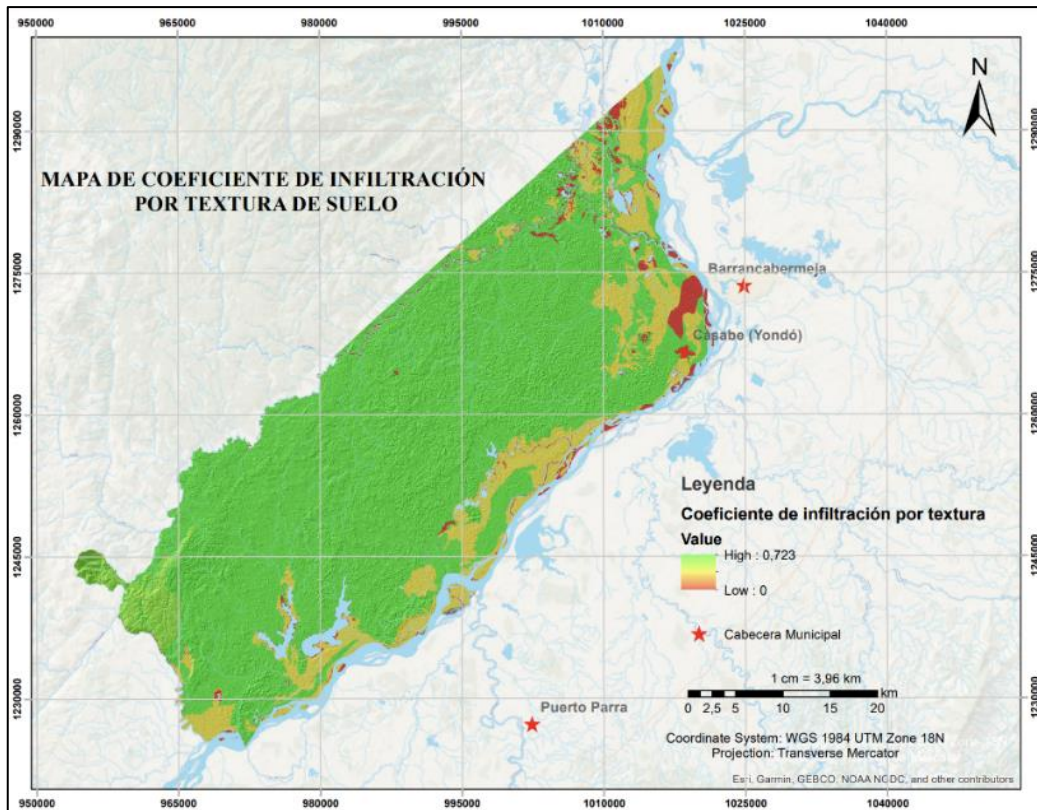


Figura 20. Coeficiente de infiltración por textura de suelo.

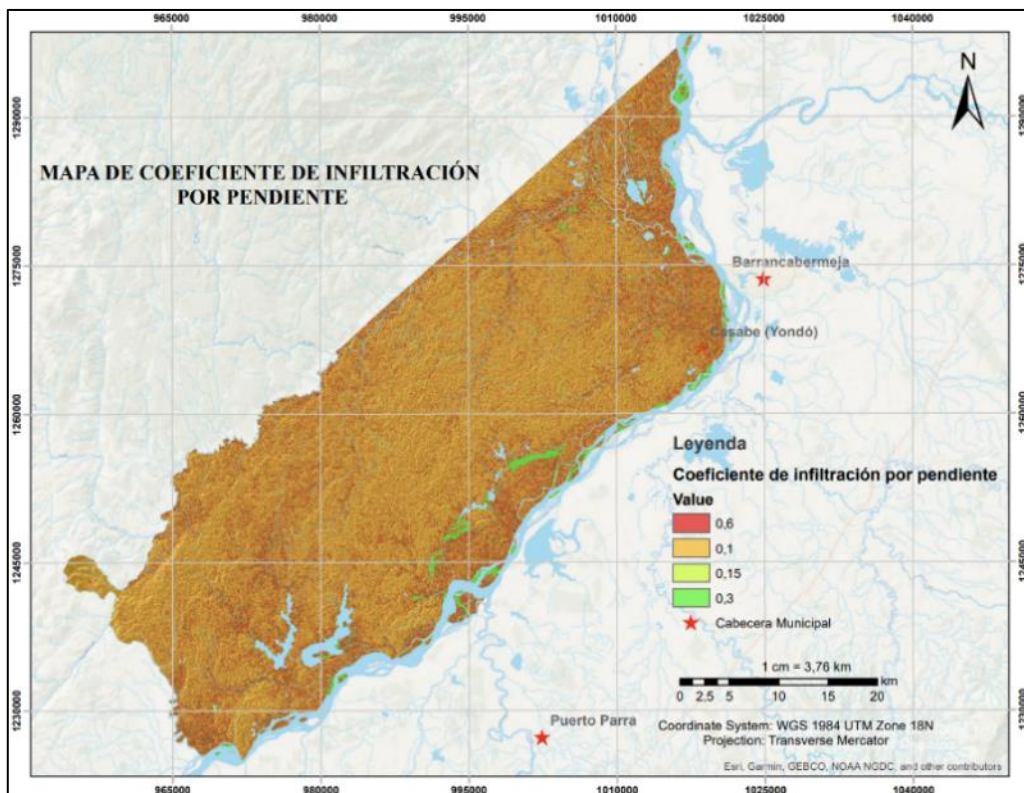


Figura 21. Coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente.

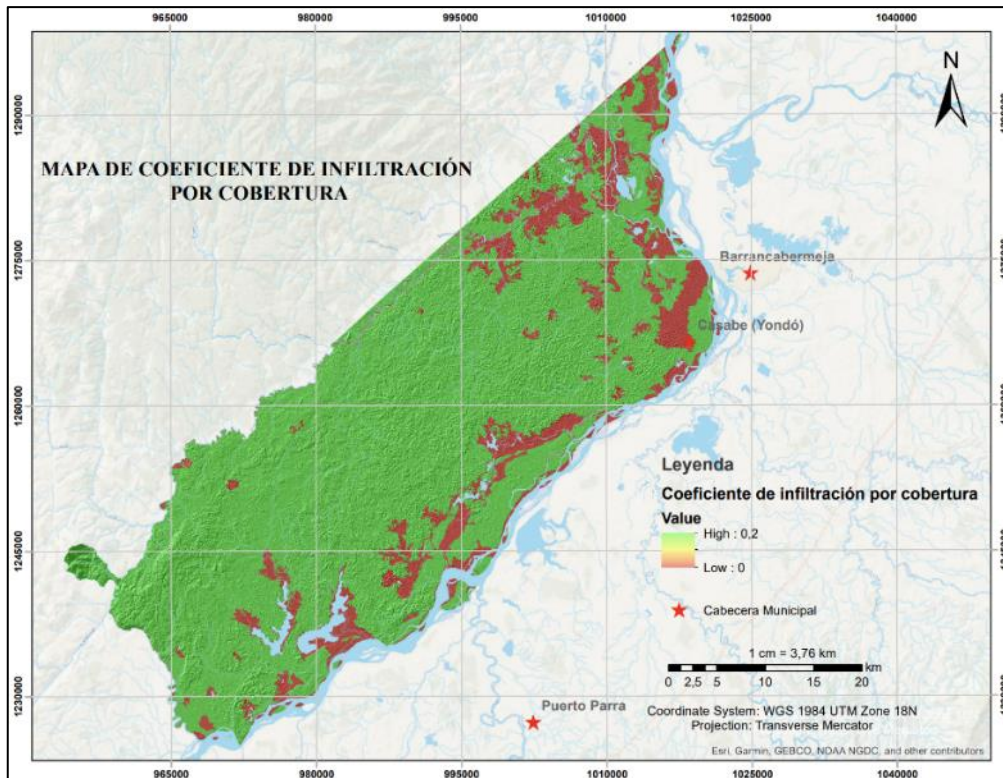


Figura 22. Coeficiente de infiltración por cobertura.

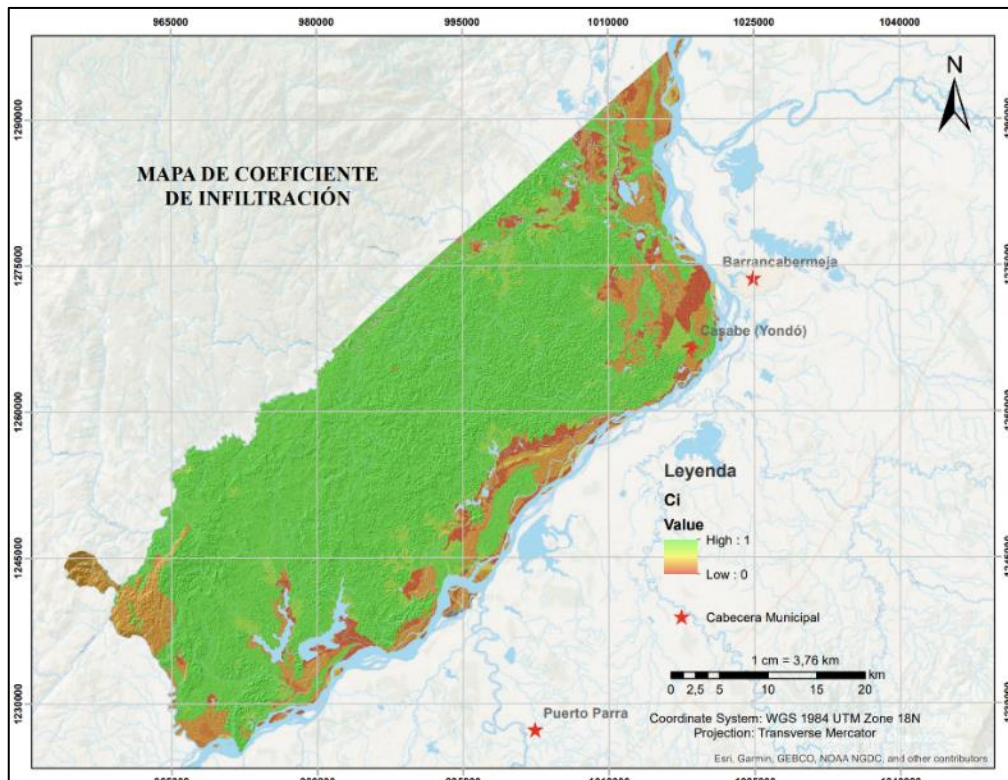


Figura 23. Coeficiente de infiltración Ci

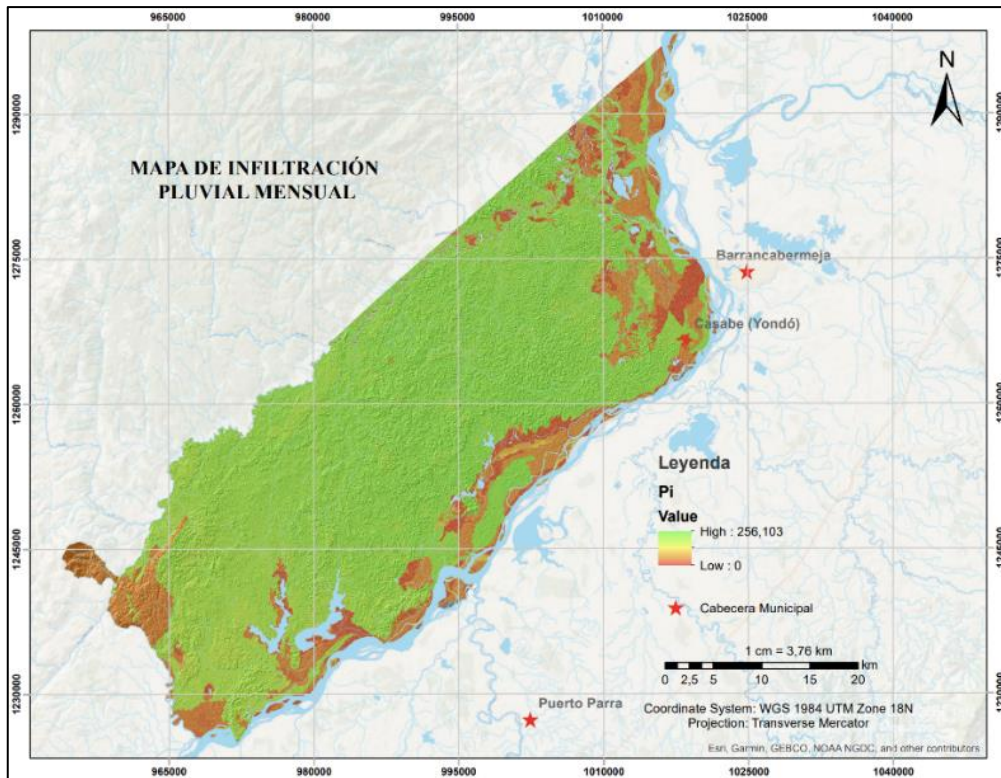


Figura 24. Infiltración Pluvial mensual.

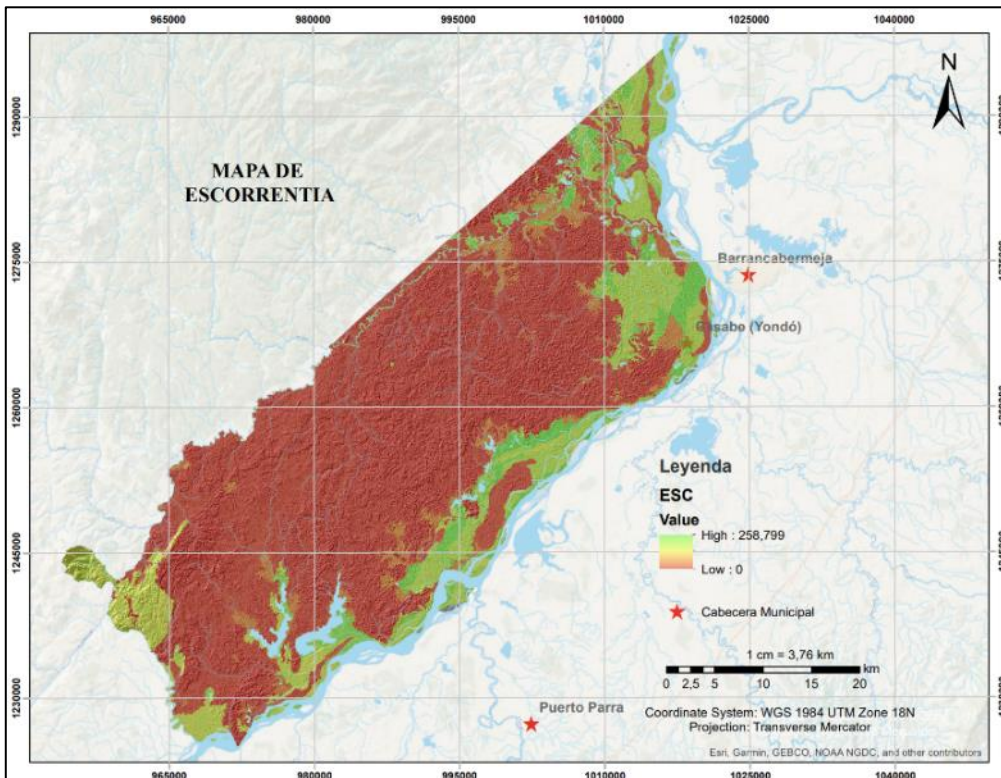


Figura 25. Escorrentía.