

**DESARROLLO DE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL BASE EN EL
MUNICIPIO DE PULÍ, CUNDINAMARCA**

ANYI ALEJANDRA BELTRÁN RABA

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2019**

**DESARROLLO DE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL BASE EN EL
MUNICIPIO DE PULÍ, CUNDINAMARCA**

ANYI ALEJANDRA BELTRÁN RABA

CAMILO ANDRES VARGAS TERRANOVA
Ingeniero Ambiental y Sanitario
MSc. Geología Ambiental y Recursos Geológicos
(Director)

MIGUEL ANGEL CAÑÓN RAMOS
Ingeniero Ambiental
MSc. En Hidrosistemas
(Codirector)

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2019

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios por ser mi fortaleza y el pilar de mi vida, porque Él ve las cosas que no son como si lo fueran, porque sé que me acompañó durante este proceso y hoy gracias a Él lo logré.

A mis padres quienes fueron mis primeros y mejores maestros, a ellos por enseñarme el verdadero valor de las personas y por creer siempre en mí, por la inmensa fe que han tenido, y que con trabajo y esfuerzo me lograron traer hasta este punto, sin ellos nada de esto hubiera sido posible, ellos son la motivación de mi vida.

Alejandra Beltrán Raba

RESUMEN

Utilizando herramientas informáticas como Python y ArcGis, el análisis de información de entidades gubernamentales y corporativas, y el trabajo de campo realizado, se desarrollaron tres de los cuatro modelos hídricos que conforman un modelo hidrogeológico conceptual base para el municipio de Pulí. Estos modelos aportan insumos y herramientas que permiten conocer la dinámica del agua subterránea de la zona y su potencial de extracción para el abastecimiento de agua potable para la población. El modelo hidrogeológico conceptual base, como su nombre lo indica, sirve de base para desarrollar un modelo más completo, sin embargo, debido a limitaciones técnicas y económicas no se logró desarrollar uno de estos modelos. El modelo geológico, es uno de los tres modelos desarrollados y está conformado por la identificación de la geometría, el tipo de roca y la delimitación de las unidades hidrogeológicas y de los sistemas de acuíferos; el modelo hidrológico, permitió realizar un balance hidrológico, identificar las zonas de recarga, transición y descarga, y realizar los mapas de flujo con información de las estaciones hidrometereológicas presentes en la zona; y el modelo hidroquímico, que con el análisis de muestras de agua tomadas in situ, permitió conocer la calidad de la misma y la relación existente entre el acuífero y los aportes al sistema. Gracias a estos modelos se pudo determinar la gran capacidad de retención de agua del suelo, lo que permite inferir la alta probabilidad de presencia de agua subterránea en la zona y la buena calidad de la misma haciendo necesario únicamente un pre tratamiento del agua para su uso, dando un valor agregado a la gestión del recurso hídrico en Pulí.

Palabras clave: acuífero, modelo hidrogeológico conceptual, modelo geológico, modelo hídrico, modelo hidroquímico.

ABSTRACT

Throughout this document, will be developed three of the four models that compound a base conceptual hydrogeological model, for the Pulí Municipality. Those models were elaborated using computer tools, information of governmental and corporative organizations sources and doing field work. The geological model is one of the models, it is formed by the geometrical identification and sort of rocks, and the delimitation of hydrogeological unities and aquifer systems. With the data of hydro-meteorological stations present in the municipality, were possible to make a hydric balance, to identify aquifer-recharge, transition and discharge zones and to make flow maps, which form the hydrological model; the hydro-chemical model allowed to recognize the water quality through the analysis of the underground-water samples taken. The fourth model is the hydraulic model which, by technical and economic issues, could not be elaborated, making impossible to reach the main objective of this investigation. Thanks to these three models was possible to determine the soil water-retention capacity, deducing the high probability of found huge reservoirs of underground-water in the municipality and the good quality of the water.

Key words: Aquifer, hydrogeological conceptual model, geological model, hydrochemical model, hydrological model.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Normativa Ambiental vigente.....	27
Tabla 2 Valores permisibles para el índice de la calidad del Agua para Consumo humano.....	34
Tabla 3 Inventario puntos de captación del agua.	39
Tabla 4 Valores promedio de temperatura media mensual de todas las estaciones. ..	44
Tabla 5 Valores de humedad relativa.....	47
Tabla 6 Cálculo de la evapotranspiración.	52
Tabla 7 Cálculo del índice de luz por iteración.	52
Tabla 8 Balance Hídrico Thornthwaite.	53
Tabla 9 Resultado Balance Hídrico.....	54
Tabla 10 Parámetros fisicoquímicos aljibe Lomalarga.	56
Tabla 11 Parámetros fisicoquímicos aljibe El Tabor.....	57
Tabla 12 Parámetros fisicoquímicos aljibe Talipa.....	58
Tabla 13 Grupos de suelos.	62

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Método de las proporciones ¡Error! Marcador no definido.

Ecuación 2 Balance Hídrico ¡Error! Marcador no definido.

Ecuación 3 Ecuación de Temperatura ¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1 Mapa división política del municipio de Pulí-Cundinamarca. ¡Error!

Marcador no definido.

Imagen 2 Bocatoma municipio de Pulí ¡Error! Marcador no definido.

Imagen 3 Actividades económicas del municipio de Pulí.¡Error! Marcador no
definido.

Imagen 4 Diagrama metodología Modelo Hidrogeológico¡Error! Marcador no
definido.

Imagen 5 Ecuación Balance Hídrico ¡Error! Marcador no definido.

Imagen 6 Mapa de Estaciones Hidrometeorológicas ¡Error! Marcador no definido.

Imagen 7 Mapa de la distribución de la precipitación media mensual¡Error! Marcador
no definido.

Imagen 8 Precipitación media total anual..... ¡Error! Marcador no definido.

Imagen 9 Mapa de distribución media mensual de Temperatura¡Error! Marcador no
definido.

Imagen 10 Mapa de distribución media mensual de Evaporación¡Error! Marcador no
definido.

Imagen 11 Mapa de distribución media mensual- Humedad Relativa¡Error! Marcador
no definido.

Imagen 12 Mapas mensuales de la ETP..... ¡Error! Marcador no definido.

Imagen 13 Déficit mes de Enero, Julio y Agosto. ¡Error! Marcador no definido.

Imagen 14 Mapas mensuales de Almacenamiento del suelo; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 15 Litología municipio de Pulí-Cundinamarca. . **Error! Marcador no definido.**

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 Evidencia fotográfica. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 2 Datos de temperatura media mensual. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 3 Datos de precipitación media mensual. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 4 Datos de caudal..... **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 5 Datos de humedad relativa. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 6 Promedio de precipitación por estaciones. ... **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 7 Estaciones hidrometeorológicas por clase y categoría. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 8 Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 9 Gráficos ecuación lineal mapas isothermas. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 10 Formato captura de información modelo hidroquímico. **Error! Marcador no definido.**

ANEXO 11 Histogramas de las estaciones más cercanas al municipio de Pulí... ¡Error!

Marcador no definido.

ANEXO 12 Distribución espacial de la ETP del mes de enero al mes de diciembre. ¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE ABREVIATURAS

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua.

EOT: Esquema de Ordenamiento Territorial.

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

CAR: Corporación Autónoma Regional.

SGC: Sistema Geológico Colombiano.

ETP: Evapotranspiración.

ETR: Evapotranspiración Real.

ENA: Estudio Nacional del Agua.

mg: miligramo.

L: litro.

cm: centímetro.

PP: Precipitación.
ZR: Zona de recarga.
ZD: Zona de descarga.
ZT: Zona de tránsito.
PER= Evapotranspiración potencial del mes (mm).
P= Lluvia mensual (mm) al 95% de probabilidad.
RFU= Cantidad de agua acumulada en el suelo y disponible para cultivos (mm).
AET= Evapotranspiración actual (mm).
NE= Nivel estático.
ND= Nivel dinámico.
Ss= Abatimiento.
S = Coeficiente de almacenamiento.
Q= Caudal.
T= Transmisividad.
K= Conductividad hidráulica.
CE= Capacidad Específica.
S= Coeficiente de almacenamiento.

GLOSARIO

Aljibe: descrito como un reservorio de agua que se encuentra instalado a nivel subterráneo, los cuales posibilitan el almacenamiento de agua potable, con profundidades de más de 5 metros y contruidos para captar el agua lluvia que se infiltra a través de los medios porosos de las rocas en el suelo, por entre sus partículas a través de los orificios que dejan las raíces de las plantas[35].

Acuífero: rocas que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas, en contacto directo con la atmosfera a través de los poros y fisuras de la roca [2].

Agua subterránea: es agua que se filtra a través de grietas y poros de las rocas y sedimentos que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas arenosas o rocas porosas del subsuelo. El agua se almacena y mueve en las formaciones geológicas que tienen poros o vacíos [3].

Balance hidrológico: es una herramienta que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de la conservación de la masa o la ecuación de la continuidad[43], de acuerdo con este principio, cualquier diferencia entre las entradas y las salidas deben reflejarse en un cambio en el almacenamiento de agua[43].

Coeficiente de almacenamiento: si se produce un cambio en el nivel de agua en un acuífero saturado, o una unidad confinada, una cantidad de agua puede ser almacenada o liberada. El coeficiente de almacenamiento (S), es el volumen de agua, por unidad de área y cambio en altura de agua, que una unidad permeable absorberá o liberará desde almacenamiento [42].

Porosidad: constituye una red de canales de pequeño diámetro por los cuales circula el agua subterránea, se encuentran distribuidos por todo el volumen de roca y puede manifestarse en diferentes cantidades dependiendo al tipo de esta [3].

Pozo de agua subterránea: perforaciones que llegan hasta el acuífero y se llenan parcialmente con el agua subterránea, siempre por debajo del nivel freático. Los pozos proveen un suministro confiable de agua para uso doméstico, irrigación y las industrias [42].

Transmisibilidad: es el volumen de agua que atraviesa una sección de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro, se representa como la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua [3].

Zona de recarga: es una forma de gestión hídrica que introduce agua en los acuíferos subterráneos [3]. Debido a condiciones climatológicas, geológicas y topográficas, parte de las precipitaciones se infiltran en el suelo, llegando a recargar los acuíferos en las partes bajas de una cuenca, una vez almacenada en estos, puede ser extraída para distintos usos [42].

Zona de descarga: es la evidencia más viable de identificar el funcionamiento del agua subterránea, es el sitio donde el agua aflora (superficie) y representa la fase final de recorrido del flujo subterráneo; así, el agua ha adquirido propiedades particulares (salinidad, pH, OD, entre otros) teniéndose una continuidad específica de caudal en el tiempo que condiciona la presencia de determinado suelo y de una vegetación acorde con las variables del caso [3]. Una zona de descarga puede estar representada por un manantial, lago salino, entre otros [42].

CONTENIDO

GLOSARIO.....	11
INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVOS.....	18
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. MARCO DE REFERENCIA.....	19
2.1. Marco contextual.....	19
2.1.1. Localización.....	19
2.1.2. Abastecimiento.....	20
2.1.3. Economía.....	21
3. MARCO TEÓRICO.....	22
3.1.1. Modelo hidrogeológico conceptual.....	22
3.1.2. Modelo geológico básico.....	23
3.1.2.1. Geometría y tipo de roca.....	23
3.1.2.2. Delimitación de unidades hidrogeológicas y sistemas de acuífero.....	23
3.1.3. Modelo hidrológico.....	24

3.1.4. Modelo hidráulico.....	25
3.1.5. Modelo hidroquímico.....	26
4. MARCO NORMATIVO	27
5. METODOLOGÍA.....	29
5.1. MODELO HÍDROLOGICO	29
5.1.1. Inventario puntos de captación del agua	29
5.1.1. Recopilación estaciones hidrometeorológicas y llenado de datos	30
5.1.2. Análisis espacial (Arcgis y Python).	31
5.1.3. Método de Thornthwaite para el cálculo de la ETP.....	32
5.2. MODELO HIDROQUÍMICO.	33
5.2.1. Determinación de parámetros a medir.....	33
5.2.2. Localización y toma de muestras.	35
5.3. MODELO GEOLOGICO.....	36
5.4. MODELO HIDRAULICO	36
6. DESARROLLO CENTRAL	37
6.1. MODELO HIDROLOGICO	37
6.1.1. Inventario puntos de captación del agua	37
6.1.2. Recopilación estaciones hidrometeorológicas y llenado de datos.	40
6.1.3. Análisis espacial (Arcgis y Python).	42
6.1.4. Balance hídrico por el método de Thornthwaite.	51
6.2. MODELO HIDROQUÍMICO.	55
6.2.1. Determinación de parámetros a medir.....	533
6.2.2. Localización y toma de muestras.	35
6.3. MODELO GEOLOGÍCO.....	59
6.3.1. Clasificación del suelo	62
6.3.2. Geomorfología	64
6.3.4. Provincia hidrogeológica y Sistema de acuífero.....	62
7. CONCLUSIONES.....	75
8. RECOMENDACIONES	76
9. BIBLIOGRAFÍA	77

INTRODUCCIÓN

Según la Asamblea General de las Naciones Unidas, el derecho humano al acceso al agua potable y saneamiento es esencial para el cumplimiento de todos los derechos humanos, y garantizar el desarrollo de diferentes actividades, satisfaciendo sus necesidades sin comprometer los recursos naturales y posibilidades de las futuras generaciones [1]. Para el año 2011, 41 países experimentaban estrés hídrico; 10 de ellos estaban a punto de agotar su suministro de agua dulce renovable y ahora dependen de fuentes alternas [2].

Una de las fuentes más usadas en el mundo es el agua subterránea, recurso natural que provee de vital sustento al ecosistema al ofertar grandes volúmenes de agua dulce. Posee un gran número de ventajas ya que tiene excelente calidad natural, pues en general es libre de patógenos, color y turbiedad, siendo esta de fácil consumo ya que no requiere altos costos de tratamiento o el tratamiento requerido es mínimo y está ampliamente distribuida en la naturaleza. Igualmente, este recurso permite el desarrollo de sistemas de abastecimiento en lugares muy próximos a los sitios donde se presente ausencia del recurso hídrico superficial, evitando así la construcción de grandes sistemas de distribución, sus fuentes son confiables y en general no se ve afectado ante la presencia de sequías cortas y puede incrementarse su uso con el tiempo [3]. El agua subterránea es un recurso muy extendido, pero oculto e inaccesible en contraste con el

agua superficial, los cambios en su cantidad y calidad frecuentemente son procesos muy lentos que ocurren debajo de la tierra en grandes extensiones, puesto que no es posible determinar estos cambios a simple vista, es necesario utilizar modelos hidrogeológicos e interpretar los datos obtenidos [4]. El monitoreo de la respuesta de un acuífero y de sus tendencias de calidad son básicos para lograr una gestión eficaz del agua subterránea y cumplir con la principal meta de gestión, o sea, controlar los impactos de la extracción del agua subterránea y de las cargas de contaminantes [5].

El modelo hidrogeológico es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea, este se realiza incorporando toda la información geológica e hidrogeológica disponible en un simple esquema del modelo a realizar, se define la litología dominante, espesores, continuidades y límites, las características, la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua del acuífero a estudiar. Con esta pre-visualización se logra el sistema de flujo característico, el cual es esencial para entender la dinámica del agua a través del sistema hidrogeológico [6]. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterráneas en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos [7].

Este estudio se fundamenta en la problemática que presenta el municipio de Pulí, Cundinamarca, por agotamiento de fuentes superficiales y carencia de una fuente fija para la toma de agua [8]. En los últimos diez años, se denota que la mayoría de los ríos y quebradas son transitorios o se encuentran secos la mayor parte del año, adicionalmente, no se realiza un tratamiento primario dificultando satisfacer las necesidades básicas del municipio [44]. El servicio de agua potable debe garantizar cobertura, cantidad, calidad y continuidad, y así, este preciado recurso sea la base fundamental para la existencia del municipio, asegurando el desarrollo económico, social y ambiental, por esta razón, es importante hallar fuentes alternas que puedan suplir la cantidad de agua requerida por toda la población. A pesar de que el municipio cuenta con reservas de agua para consumo humano, estas fuentes no serán suficientes debido al crecimiento poblacional y económico del municipio de Pulí. Se estima que el consumo de agua en el sector residencial es del 79.1% y 9.5% en el sector rural, equivalente a 130.000 m³ anuales tanto en zona urbana como en la rural [8]. El modelo hidrogeológico conceptual base aporta herramientas para buscar alternativas de manejo, gestión y control integral del recurso hídrico, evaluando así los posibles puntos óptimos para la extracción de agua subterránea en el municipio, teniendo en cuenta lo anterior, las fuentes de aguas subterráneas son un gran potencial debido a la estimación del recurso como reserva natural del mismo.

Mediante el trabajo realizado en campo y la recopilación de información secundaria, el modelo hidrogeológico base entrega los insumos para así lograr fortalecer el estudio del agua subterránea en el municipio de Pulí, desarrollando la mayor cantidad posible de variables pertenecientes al modelo hidrogeológico conceptual, el cual se encuentra integrado por; el modelo geológico, modelo hídrico, modelo hidroquímico y por último el

modelo hidráulico. El alcance de este proyecto se fundamenta en la realización de tres (geológico, modelo hídrico, modelo hidroquímico), de los cuatro sub-modelos. En un inicio el objetivo pretendía desarrollar el modelo completo, pero debido a factores económicos, operativos y técnicos no fue posible la realización del modelo hidráulico. Este proyecto es la base para que a futuro se complete la información del modelo hidrogeológico conceptual.

El modelo geológico está compuesto por las variables; columnas estratigráficas, sondeos eléctricos, descripción hidrogeológica, descripción geológica y mapa geológico. De lo anterior se desarrolló la descripción geológica (Geomorfología, tipo de suelo y litología), descripción hidrogeológica (provincia hidrogeológica y sistemas de acuíferos) y el mapa que reúne la litología representativa del municipio. Por último, el estudio realizado por el IDEAM tiene en su base de datos la información de la columna estratigráfica general de la zona [45]. Fue posible completar las anteriores variables según la disponibilidad de información secundaria por parte de entidades públicas y privadas. De este modelo no fueron posibles los sondeos eléctricos ya que el costo de este es muy elevado, el cual, de ser necesario una concesión de aguas subterráneas para el municipio, se deberá hacer una o varias pruebas geo-eléctricas ya que este es clave para el estudio del acuífero.

El Modelo hidrológico desarrolló la distribución espacio temporal de la recarga, dinámica de flujo (zonas de recarga y descarga), balance hídrico entorno a la información hidroclimática, inventario de puntos de aguas superficiales (aljibes) mediante campañas que permitieron la recolección de información; usos, usuarios, tendencia de la demanda de estos aljibes, estado sanitario de las captaciones, parámetros de recolección, condiciones y cuantificación de aprovechamiento. El alcance de este modelo está definido hasta el balance hídrico, a pesar de que hay una evidencia en la integración de los tres modelos de las zonas de recarga; no se plantea estas como el resultado final de este modelo (hidrológico). Debido a que a que determinar las zonas de descarga es más complejas de definir y van relacionadas a otros criterios (niveles piezómetros, pruebas de bombeo, entre otras).

El Modelo Hidroquímico permite conocer las afectaciones por actividades antrópicas que generen un impacto a la salud humana o al ambiente, se construye a partir del seguimiento de los puntos de captación del agua y del inventario de este, parámetros fisicoquímicos de las aguas captadas para generar productos de valor agregado representados en el cumplimiento de la resolución 2115 y la relación directa entre la roca y ciclo hidrológico [45]. En este modelo se realiza la evaluación de los parámetros de la calidad del agua (alcalinidad, turbiedad, dureza, conductividad, pH, sólidos suspendidos, disueltos, entre otros) definiendo este, como su único alcance.

El modelo hidráulico permite el conocimiento de los acuíferos y está representado por las siguientes variables; capacidad de retención, permeabilidad y capacidad específica, estas se obtienen a partir de las pruebas de bombeo. Estas pruebas no se pudieron

realizar debido a dos factores; los costos que implicaba realizar estas pruebas a todos los aljibes (puntos de captación) y las condiciones del aljibe, pues no cuentan con la profundidad requerida por el IDEAM (Profundidad mínima de 10m) [45]. La profundidad estimada en promedio de estos aljibes era de mínimo 35cm y un máximo de 2,25m. Por estas dos razones este modelo no pudo realizarse.

1. OBJETIVOS.

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar el modelo hidrogeológico base del municipio de Pulí, Cundinamarca.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Definir las variables hidrogeológicas de la zona de interés, de acuerdo al modelo acuífero unitario.
- Evaluar los puntos de agua y fuentes hídricas locales, con base en el modelo hidrológico.
- Desarrollar cartografía temática base, como apoyo a la gestión hidrogeológica municipal.

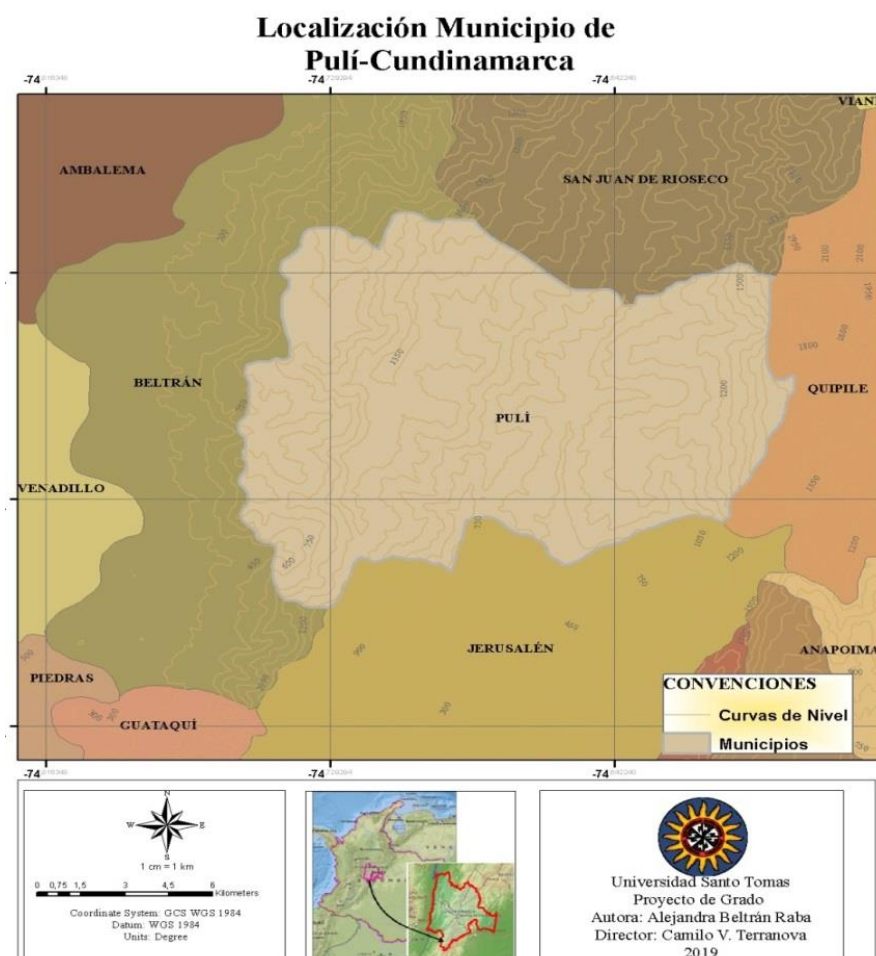
2. MARCO DE REFERENCIA.

2.1. Marco contextual.

2.1.1. Localización.

El municipio de Pulí se encuentra ubicado al occidente del departamento de Cundinamarca, en la provincia del Magdalena centro, sobre el ramal oriental de la Cordillera de Los Andes [9]. Este municipio limita con San Juan de Rioseco por el norte, Beltrán por el occidente, con Quipile por el oriente y por ultimo con Jerusalén por el sur, como se observa en la imagen 1.

Imagen 1 Mapa localización del municipio de Pulí-Cundinamarca.



Fuente: Elaboración propia.

Está dividido en 17 veredas, entre las cuales se encuentran: Gibraltar, La Quina, Cabrera, La Hamaca, Palestina y Valparaíso corresponden a la inspección de Palestina; por su parte las veredas de Ocandá, Capial, Paramón, el Palmar la Hoya, el Manantial, Loma tendida, Guayaquil, el Carmen, Talipa, Loma Larga y Betania.

Adicionalmente el municipio es una zona ondulada de relieve quebradizo. De altura en un rango de 600 m.s.n.m y 1.700 m.s.n.m, cuenta con una geomorfología privilegiada ya que es testigo del río Magdalena, el cual fluye por el valle que une a los departamentos de Cundinamarca y Tolima, sin contar que desde ahí se puede apreciar el parque nacional de los nevados, la cordillera central y el pie de monte de la cordillera oriental.

2.1.2. Abastecimiento

Este municipio cuenta con una población total de 2.999 habitantes de los cuales 662

habitantes se encuentran localizados en el casco urbano y 2.337 se ubican en la zona rural [9]. Actualmente la población urbana se abastece del agua proveniente de aljibes, son más de 20 distribuidos en todo el territorio, los cuales cuenta con una bocatoma que conduce el agua a tanques de almacenamiento para así ser distribuida en las veredas próximas a estos nacederos, claro ejemplo como se muestra en las imágenes 1a y 1b.

Imagen 2 Bocatoma municipio de Pulí.

1a. Bocatoma Lomalarga



1b. Desarenador Lomalarga



Fuente: Elaboración propia.

Estas fuentes de abastecimiento son de gran importancia para el desarrollo económico de la población. Son reservas de agua para consumo humano y abastece un 79.1% para el sector urbano y 9.5% en el sector rural, equivalente a 130.000 m³ anuales tanto en zona urbana como en la rural [8].

2.1.3. Economía

El Municipio cuenta con un clima templado ideal para el desarrollo de varias actividades económicas [13], entre las cuales se encuentra; la agricultura resaltando los cultivos de café, plátano, yuca, caña panelera, cacao, en un área aproximada a 2.400 hectáreas y 250 hectáreas en cultivos como; el maíz, frijol y habichuela. Cuenta también con la producción de pastos aptos para la ganadería, con una población bovina de 7.189 cabezas caprinos, ovinos, porcinos y equinos dentro de los que se reconocen ejemplares caballares, mulares y asnales, propios para el desarrollo integral de la zona. La producción panelera marca un punto importante en la transformación de materias primas que lleva a portas del sector secundario de la economía [9].

También existe la economía extractiva, a una mayor escala el petróleo, el cual es extraído del piedemonte del valle del río Magdalena y en menor escala, el recebo, piedra y grava.

3. MARCO TEÓRICO

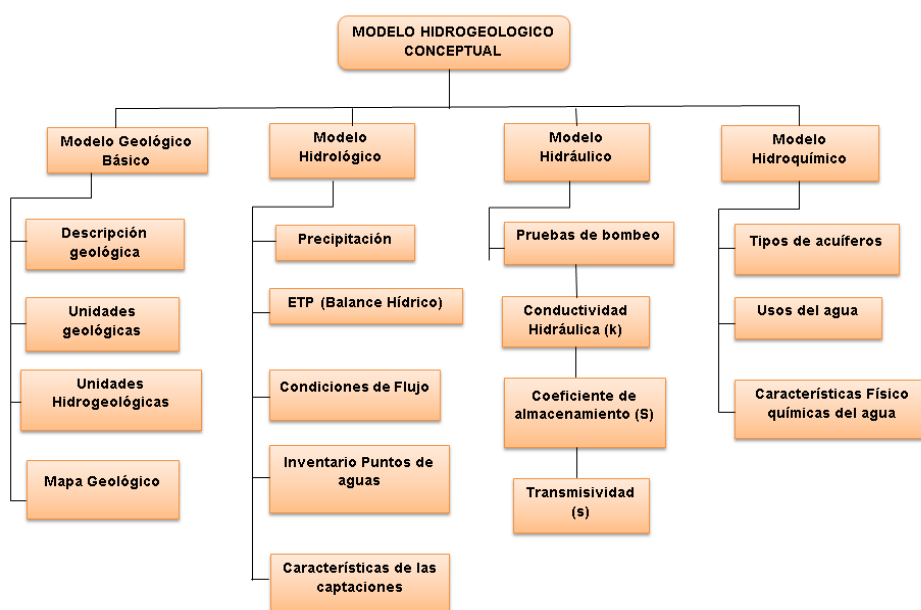
3.1. Modelo hidrogeológico conceptual

Se entiende por modelo hidrogeológico la representación matemática de las condiciones estáticas y dinámicas de un sistema de flujo de agua subterránea [10], de esta manera lograr incorporar toda la información geológica e hidrogeológica disponible de una zona de interés. Esta representación involucra la geometría de los acuíferos, delimitación de las unidades hidrogeológicas de acuerdo a su propiedad de almacenar y transmitir agua, las características hidráulicas, la posición de los niveles piezométricos, las condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico y de zonas de recarga y descarga [10]. Para lograr identificar el sistema de flujo de las aguas subterráneas y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos [11]. Para visualizar el modelo de acuerdo a algunos

componentes con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidroquímica e hidráulica, logrando así emplear las bases del modelo hidrogeológico conceptual en la zona de estudio, permitiendo que éste sea un insumo para implementar herramientas que permitan validar y comprender a mayor detalle las aguas subterráneas.

El modelo hidrogeológico conceptual explicado en la imagen 3, muestra los componentes de cada modelo en particular. Esta forma de modelo es implementada por el IDEAM, por lo cual, es la guía de todo el proyecto.

Imagen 3 Diagrama del modelo hidrogeológico conceptual.



Fuente: [14].

3.1.1. Modelo geológico básico

Este modelo es utilizado para lograr representar un volumen de rocas, que a su vez muestra la litología, mineralización, alteración u otro tipo de atributo geológico del macizo rocoso, permitiendo así, el conocimiento de la morfología y representarlo lo más cercano a la realidad y así poder relacionar las unidades en diferentes tipos de modelos, ya que es una parte fundamental en el procedimiento de estimación de reservas de un depósito de agua. El modelo geológico básico está dado por la geometría, tipo de roca y la delimitación hidrogeológica y sistemas de acuíferos [12].

3.1.1.1. Geometría y tipo de roca

Para poder describir el modelo geológico básico es necesario integrar conceptos que van relacionados a este, logrando así una descripción más clara del modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio. Este busca integrar la información de los métodos directos e indirectos, observar la estructura y propiedades de la tierra directamente de las rocas que componen la superficie terrestre, de las rocas extraídas en sondeos, perforaciones petrolíferas o excavaciones de pozos de agua [13]. El método indirecto, el cual conoce la estructura y propiedades de los materiales que componen el suelo, a partir de pruebas que sirven para deducir cómo son, de qué están hechos y cómo están dispuestos los materiales que no se ven; mediante la densidad, magnetismo, gravedad, ondas sísmicas [14]. El modelo geológico da a conocer los procesos que dieron origen al tipo de roca que forma parte de la unidad geológica de interés, logrando identificar el material y su capacidad de almacenar y transportar agua, además el modelo conceptual sirve como indicativo para definir los posibles límites y las áreas en donde puedan encontrarse características similares, es decir, las áreas con posibilidades de encontrar acuíferos para la extracción del recurso hídrico [13]. La geometría y tipo de roca involucra también la observación directa, la cual busca ver el objeto de estudio, esto se hace sin intervenir o alterar el ambiente, este método es utilizado en ocasiones para completar o comprobar información extraída por fuentes secundarias, como lo son encuestas, cuestionarios, información tomada anteriormente en el municipio, entre otros, haciendo el método más efectivo y dando así mayor información que aporte a nuestra investigación [15].

3.1.1.2. Delimitación de unidades hidrogeológicas y sistemas de acuífero

El acuífero no hace referencia ni a la naturaleza litológica ni a la edad de la unidad geológica, sino sólo a su capacidad de almacenar agua. El agua almacenada en estas unidades geológicas es conocida con el nombre de agua subterránea, cuando el agua almacenada en un acuífero está en contacto directo con la atmósfera a través de los poros y fisuras de la roca se denomina “acuífero libre”. La capacidad para almacenar agua se mide a partir del coeficiente de almacenamiento (S), que se define como el volumen de agua que proporciona una columna de agua en el acuífero de base unitaria. El espesor saturado del acuífero al descender en una unidad muestra el potencial hidráulico [16]. Desde el punto de vista hidrogeológico se clasifican las rocas en acuíferos libres; rocas que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas, acuitardos; rocas que almacenan agua, pero transmiten lentamente el fluido, acucludos; rocas con una capacidad de almacenamiento apreciable, pero con capacidad de transmisión prácticamente nula y acuífugos; rocas que ni almacenan ni transmiten agua [17].

3.2. Modelo hidrológico.

El balance hidrológico representa el comportamiento de una gota de agua (precipitación) dentro de una cuenca de interés y su recorrido hasta llegar a las zonas de descarga de la cuenca, el balance debe cumplir la ley de la conservación de la masa, la cual determina que todo lo que ingresa al sistema es lo mismo que sale de éste [18]. Las variables que se ven involucradas en el balance son: la precipitación, escorrentía, infiltración, evapotranspiración y evaporación; incluyendo, que el término “escorrentía” se aplica en ambos casos, tanto en la superficie como en la subterránea [17]. La recarga se puede definir como el agua que ingresa a la zona saturada donde empieza a hacer parte de las reservas subterráneas, el ingreso del agua puede darse por un movimiento descendente del agua debido a la gravedad o por presentar un movimiento horizontal del flujo, debido a las condiciones hidráulicas de las capas que forman el perfil del suelo [17], el agua subterránea es aquella que llega a las formaciones geológicas ocupando un vacío (porosidad y permeabilidad) dependiendo el tipo suelo, cumpliendo una fase del ciclo del agua.

La zona de descarga es aquella donde aflora el agua en la superficie, la cual muestra el final del recorrido del flujo de agua subterránea. Durante el recorrido el agua adquiere ciertas propiedades (temperatura, pH, OD, salinidad), los cuales se encuentran en el intercambio entre agua y roca, otorgando al agua propiedades características del tipo de roca que lo contenía. Así, un suelo asociado con una zona de descarga de agua subterránea ocurre a una elevación topográfica más baja donde se origina la recarga. Las zonas de descarga son más difíciles de identificar, un indicador que ayuda a identificarlos está asociado con la conductividad hidráulica de la roca, la cual puede permitir la infiltración del agua lluvia según la elevación topográfica del lugar [18].

3.2.1. Método de Thornthwaite

El método de Thornthwaite está basado en el cálculo de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una correlación en función de la duración de las horas de luz y el número de días del mes [46]. Este método es empleado en el estudio de la hidrogeología de cuencas y en la estimación del balance hídrico. Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media [46].

Se propuso la siguiente fórmula:

Ecuación 4 Para hallar la ETP.

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

Fuente: [32].

Si la temperatura es <0, los valores de i y de ETP deben ser 0.

$$ETP \text{ sin corr} = 16\left(\frac{10 \cdot t}{I}\right)^a$$

$$a = 675 \cdot 10^{-9}I^3 - 771 \cdot 10^{-7}I^2 + 1791 \cdot 10^{-5}I + 0.49239$$

$$ETP = ETP \sin corr \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{d}{30} \right)$$

EPT= Evapotranspiración potencial corregida.

i= Índice de calor.

N= Número máximo de horas de sol.

d= Número de días del mes.

Thornthwaite interpreto que la radiación solar y la turbulencia atmosférica son factores de importancia en la ETR. Por el contrario, la fórmula empírica de Thornthwaite puede ser usada para cualquier zona en la cual se registran la Temperatura máxima y Temperatura mínima diarias y la capacidad de almacenamiento del suelo [46].

3.3. Modelo hidráulico

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza pueden ser explicados mediante métodos matemáticos o por medio de modelos experimentales, estas pruebas realizadas in-situ tienen que ver con las pruebas de bombeo o el método de Slug tests. La prueba consiste en bombear los pozos, a caudal constante o a caudal variable, siguiendo la evolución del nivel del agua, para ello deberá evaluarse el lugar de la prueba, conocer previamente algunas características del acuífero y tomar determinadas precauciones en relación con la capacidad específica, el coeficiente de almacenamiento y la permeabilidad del suelo. Esta prueba de bombeo se realiza con el objetivo de determinar los parámetros hidráulicos de un acuífero como lo son: la conductividad hidráulica (K), la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) [19]. El método de Slug tests es utilizado en acuíferos libres o confinados y para pozos parcial o totalmente penetrantes. Consiste en medir la recuperación o descenso del nivel del agua en un pozo, después de un cambio instantáneo en el mismo; es una técnica ampliamente utilizada para estimar la conductividad hidráulica in situ. El término “slug” (barra o lingote) se debe a que muchas veces se utiliza la introducción de una barra en el pozo, lo que provoca el ascenso, casi instantáneo, de nivel como si se hubiese introducido un volumen de agua igual al del objeto sólido. Este cambio en el nivel del agua se realiza provocando un repentino descenso o ascenso del nivel piezométrico H, que se recupera hasta las condiciones iniciales [47].

3.4. Modelo hidroquímico

En estudios hidrogeológicos la parte hidroquímica del agua se fundamenta en la composición química del agua subterránea, del agua que ingresa al acuífero y sus reacciones con los minerales presentes en la roca a través de la cual circula y en contacto con la que ha estado almacenada o Sustancias contaminantes que afectan su calidad, siendo estos la evaporación, evapotranspiración, la toma selectiva de iones por

las plantas, la decadencia de la materia orgánica, la meteorización y disoluciones de minerales, la precipitación de sustancias en suelos y acuíferos, las reacciones de intercambio iónico, los procesos de óxido-reducción, los procesos de mezcla de aguas de diferente origen y la actividad antrópica [20].

Para realizar la interpretación de la química de las aguas subterráneas se requieren parámetros de campo como temperatura, pH y conductividad; de igual manera se requiere conocer la concentración de iones mayoritarios sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos; se obtiene argumentos adicionales microbiológicos, orgánicos y volátiles. Se requiere contar con la información acerca de la geología y mineralogía del medio acuífero [21].

4. MARCO NORMATIVO

Colombia está regida por una normatividad específica para el uso y tratamiento del agua para consumo humano, en donde se controlan las características de calidad de la misma las cuales establecen si es apta para consumo, incluyendo los límites permisibles de algunas características físicas, químicas y microbiológicas. En la Tabla 1 se observa la normatividad aplicable al agua para consumo humano.

Tabla 1 Normativa Ambiental vigente.

Normativa	Temática	Descripción
------------------	-----------------	--------------------

Decreto 1575 de 2007	Sistema de Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano	Establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada [22].
Resolución 2115 de 2007	Sistema de Control y Vigilancia para la Calidad del Agua para Consumo Humano	Establece las características, instrumentos básicos y frecuencia del Sistema de Control y Vigilancia para la Calidad del Agua para Consumo Humano [23].
Ley 373 de 1997	Programa para el uso eficiente y ahorro del agua.	Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua [24].
Decreto 2811 de 1974	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	El ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social [25].
Decreto N. 1541 de 1978	Decreto tiene por finalidad reglamentar las normas relacionadas con el recurso agua en todos sus estados, y comprende los siguientes aspectos:	El dominio de las aguas, cauces y riberas, y las normas que rigen su aprovechamiento sujeto a prioridades, en orden a asegurar el desarrollo humano, económico y social, con arreglo al interés general de la comunidad [26].
Decreto 155 del 2004	La metodología para determinar la tasa por uso de agua subterráneas	En lo relativo a las tasas por utilización de aguas superficiales, las cuales incluyen las aguas estearinas, y las aguas subterráneas, incluyendo dentro de estas los acuíferos litorales. No son objeto de cobro del presente decreto las aguas marítima [27].
Decreto 1640 de 2012	Los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.	Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines".
Resolución 815 de 1997	Por la cual se fija un término para la implementación de medidores en los pozos de extracción de aguas subterráneas.	Que de conformidad con el Decreto Ley 2811 de 1974 y demás normas concordantes, son bienes inalienables e imprescriptibles del Estado, entre otros, los estratos o depósitos de las aguas subterráneas, por tanto intransferibles a cualquier título a los particulares, quienes sólo podrán obtener concesiones, permisos o licencias para su uso y goce de acuerdo a la Ley [28]
Resolución 250 de 1997	Tasas para el aprovechamiento de aguas subterráneas.	En bienes inalienables e imprescriptibles del Estado, entre otros, los estratos o depósitos de las aguas subterráneas, por tanto intransferibles a cualquier título a los particulares, quienes sólo podrán obtener concesiones, permisos o licencias para uso y goce de acuerdo a la Ley [29].

Resolución 1391 de 2003	los formatos de solicitud de trámites administrativos ambientales y los formatos que apoyan el proceso de contratación	Al servicio de los intereses generales y se desarrolla con fundamento en los principios de igualdad, moralidad, eficacia, economía, celeridad, imparcialidad y publicidad, mediante la descentralización, la delegación y la desconcentración de funciones [30].
ENA 2014	Creado por el IDEAM, con el objetivo de conocer y estudiar la riqueza en el agua, su uso y las medidas de protección de este elemento valioso. Conformar la base de la información y conocimiento del ciclo hidrológico.	Muestra el estado y la dinámica del agua y los recursos hídricos. Es el insumo técnico para la planificación y la gestión integrada del recurso hídrico en el marco de política Nacional para la Gestión integrada de los Recursos Hídricos que lidera el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [41].
Decreto 1594 de 1984	Del Ministerio de salud, define los procedimientos sancionatorios aplicables al RHS.	Ordenamiento del recurso, la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas, estuarías y servidas. Criterios de calidad para destinación del recurso [44].
Resolución 2173 de 2003	Por la cual se fijan las tarifas para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de control y manejo ambiental.	Servicios de evaluación y seguimiento de licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de control y manejo ambiental [42].
Resolución 3859 de 2007	Se dictan normas respecto al funcionamiento de los medidores de consumo para la explotación de agua subterránea.	Programa para uso eficiente y ahorro del agua, establecen la obligatoriedad de suministrar la información sobre el caudal promedio diario anual en litros por segundo de la fuente de captación [43].

Fuente: Elaboración propia.

Este proyecto busca apoyar el cumplimiento de la norma en cuanto a la calidad y abastecimiento del recurso hídrico, protegiendo la salud humana y los recursos naturales en cuanto a la extracción de este. La regulación de la norma garantiza que el consumo del agua sin un previo tratamiento no represente un riesgo y se tenga un mayor control de estas fuentes.

5. METODOLOGÍA

Durante el desarrollo de este proyecto fue necesaria una investigación de tipo documental y experimental. Contó con datos cualitativos y cuantitativos, los cuales tuvieron que ser

tomados directamente desde la zona de estudio y analizar la información de entidades públicas y privadas, incluyendo, la descripción general del municipio, cartografía, censos prediales, el esquema de ordenamiento territorial (EOT), información de litología, geología y mapas generales de la Corporación Autónoma Regional (CAR) en la sub-dirección encargada del estudio del Magdalena medio, del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Sistema de información geográfica para la planeación y el ordenamiento territorial (SIG-OT). El objetivo general del proyecto pretendía desarrollar los cuatro modelos que forman al modelo hidrogeológico conceptual (Modelos hidrológico, hidroquímico, geológico e hidrodinámico), pero debido a problemas económicos, operativos, técnicos, carencia o ausencia de información, el alcance del proyecto permitió el desarrollo solo de tres modelos, los cuales son; hidrológico, hidroquímico y geológico, estos son la base para que en futuros proyectos se complemente el modelo hidrogeológico conceptual y este sea un gran aporte a la gestión del recurso hídrico en Pulí, Cundinamarca.

A continuación se muestra la metodología implementada por el IDEAM, el cual permitió el desarrollo de cada uno de los modelos; hidrológico, hidroquímico y geológico.

5.1. MODELO HÍDROLOGICO

En esta etapa se desarrolló las siguientes actividades:

- Inventarios puntos de captación.
- Recopilación datos de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM y la CAR.
- Llenado de datos faltantes.
- Valor de la ETP según el método de Thornthwaite.
- Análisis espacial en ArcGis y Python (Balance Hídrico) de las variables; temperatura, precipitación, reserva, déficit, ETP y almacenamiento.

5.1.1. Inventario puntos de captación del agua

En esta actividad se identificaron las principales fuentes de captación y problemáticas correspondientes al abastecimiento del recurso hídrico en el municipio, los cuales están asociados a la ausencia de un tratamiento previo al agua para consumo humano para luego ser distribuida y no representar ningún riesgo para la salud humana, en épocas de sequías largas las fuentes superficiales se encuentran secas impidiendo el desarrollo de diferentes actividades económicas de los habitantes (agricultura, ganadería), la intervención antrópica debido a la economía extractiva (petróleo) que puede llegar a ser una posible causa que genera el agotamiento de las fuentes superficiales en Pulí y por último, un riesgo a futuro por desabastecimiento [8]. La información encontrada en la alcaldía y en la CAR es muy escasa, por lo tanto el levantamiento de datos se realizó directamente en las visitas de campo y con ayuda de los habitantes se logró completar información de estos puntos y su problemáticas relacionadas al abastecimiento. Se realizó siete visitas que permitieron estimar la

cantidad de aljibes, más de 20 distribuidos en todo el territorio, de los cuales se tuvieron en cuenta solo 8 puntos debido a la facilidad de acceso y a su nivel de importancia por sus aportes en volúmenes de agua a la cabecera municipal y a la cantidad de usuarios que se abastecen de estos.

Adicionalmente se tomó como guía el (Formulario único Nacional para inventario de agua subterránea) del IDEAM, evidenciado en la tabla 3. Los instrumentos que permitieron la recolección de información, fueron; una encuesta simple (formato Anexo 15) el cual lleva el nombre del aljibe, tiempo de uso, cantidad de usuarios que se abastecen de estos puntos, forma de captación (bocatomas, tanques de almacenamiento, distribución por bombeo o gravedad) y usos principales. Estas encuestas o test fueron realizadas a los habitantes que habitaban cerca de los aljibes. Para corroborar esta información, se comparó con la base de datos de la alcaldía municipal, adicional a esto, los datos de las coordenadas geográficas no se encontraban en la información recolectada por la alcaldía, así que se realizó la toma de estos puntos con el GPS para lograr integrar la recolección de esta información.

5.1.2. Recopilación estaciones hidrometeorológicas y llenado de datos

Para obtener los datos de la ecuación del balance hídrico se necesitó de estaciones hidrológicas, meteorológicas, climatológicas, pluviométricas y limnimétricas brindadas por el IDEAM y la CAR, las cuales se encuentran en el Anexo 7. Las variables que se tuvieron en cuenta fueron precipitación, temperatura, caudales, humedad relativa, nubosidad, brillo solar, niveles y evaporación.

Estos datos tomados de estaciones distribuidas alrededor y dentro del municipio de Pulí fueron utilizados en el balance hídrico realizado en el programa Python para el análisis espacial del comportamiento de estas variables y para los cálculos realizados en Excel. Se necesitó de la única estación ubicada dentro del municipio para así conocer la oferta disponible en la zona de estudio según los datos arrojados por el balance hídrico, utilizando el método de Thornthwaite ya que este tiene en cuenta la capacidad de retención del suelo y está basado en el cálculo de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una correlación en función de la duración de las horas de luz y el número de días del mes [46].

Para la estimación de datos faltantes se utilizó el método de las proporciones, el cual es llenado con la misma serie de referencia, logrando establecer una razón de proporcionalidad entre la lluvia mensual y anual [31].

La ecuación 1 fue utilizada para el llenado de datos faltantes en cada estación.

Ecuación 1 Método de las proporciones

$$\frac{X}{\bar{X}} = \left(\frac{Pf}{(Pa - \bar{X})} \right)$$

Fuente: [31].

X= Lluvia del mes faltante

$\bar{X}$ = Lluvia promedio del mes faltante

Pf= Total anual (del mes faltante)

Pa= Total anual promedio

Logrando así la totalidad del llenado de datos faltantes de cada estación, se buscó garantizar la validez de cada variable asumiendo que estos valores se asemejan lo más cercano a la realidad y al comportamiento hidroclicmático de la zona de estudio y sus alrededores. Se tuvo en cuenta los posibles errores de estaciones donde había ausencia de información o la distancia con respecto al Municipio para así lograr interpretar una de las posibles causas del agotamiento del recurso hídrico.

5.1.3. Análisis espacial (Arcgis y Python).

Se hizo el balance implementando el software Arcgis y Python, los cuales utilizan un amplio conjunto de herramientas para realizar análisis espaciales y administrar datos de sistemas de información geográfica de forma automática. Partiendo de geoprocesos Arcmap arroja un lenguaje de programación para que estos sean leídos, posteriormente procesados en Python obteniendo resultados a partir de la ecuación (método de Thornthwaite) el balance hídrico y así generar un análisis del comportamiento hidroclicmático de la zona de estudio.

Para la distribución espacial fueron necesarios los datos de precipitación y temperatura en formato Tif (Formato Informático). A demás 12 mapas interpolados con los datos de precipitación media mensual (isoyetas), los cuales fueron elaborados en el programa Arcgis con herramientas de interpolación (IDW), así como 12 mapas de temperatura media mensual (isotermas), los cuales se obtuvieron mediante regresión lineal como el resultado de un gráfico de dispersión y partiendo del modelo de elevación digital de terreno (DEM). Los valores anteriormente mencionados serán reemplazados en la siguiente ecuación.

Ecuación 2 Eq. De Temperatura

$$T = \alpha H + \beta$$

Fuente: [33].

Dónde:

T= Temperatura.

H= Altura sobre el nivel de mar.

α = Gradiente altitudinal de temperatura.

β = Promedio altitudinal de temperatura.

Para llegar a la ecuación 2 se necesitó conocer los doce valores de las isotermas (mapas de temperatura), los cuales se obtuvieron en la ecuación lineal generada en cada gráfico como se muestra en el Anexo 9, agregando línea de tendencia, ecuación de dicho gráfico y el R^2 , el cual nos representa el coeficiente de determinación que sugiere una dependencia de una variable a otra, es decir, la relación que hay entre la altura y la temperatura. Reemplazando en la ecuación 2 se logra obtener el gradiente altitudinal (α) de temperatura y el promedio altitudinal de temperatura (β), que será reemplazando en cada ecuación del gráfico sacadas de Excel, para luego ingresar estos datos en la calculadora de mapas que utiliza formato raster en el programa ArcGis para así tener los 12 valores de las isotermas para que estas sean utilizadas en el programa Python y así, obtener los mapas de la ecuación general del balance hídrico por el método de Thornthwait.

5.1.4. Método de Thornthwaite para el cálculo de la ETP.

Se estimó la cantidad de oferta hídrica que hay en la superficie y en el subsuelo de la zona de estudio teniendo en cuenta la ley de la conservación de la masa aplicada a la ecuación del balance hídrico (ecuación 3) para una cuenca cerrada en un intervalo de tiempo determinado, dando así la variación en el almacenamiento [32].

Ecuación 3 Balance Hídrico

$$P = Es + ETR + I$$

Fuente: [32].

DONDE:

P = Precipitación en (mm/unidad de tiempo), parámetro medido en estaciones

hidrometeorológicas en la zona de estudio.

Es = Escorrentía superficial en (mm/unidad de tiempo), medida en caudales de estaciones de aforo.

ETR = Evapotranspiración real en (mm/unidad de tiempo). Es la suma de la evaporación directa de agua desde la superficie, más la transpiración de las plantas.

I = la infiltración en el terreno (en mm/unidad de tiempo). Parte de la misma puede descargar de nuevo a la superficie tras un tiempo de permanencia más o menos corto, y otra parte se incorporará finalmente a la zona saturada, convirtiéndose en recarga efectiva al acuífero (R).

Partiendo de lo anterior se busca conocer la disponibilidad de agua que hay en el municipio de Pulí, calculando cada variable de acuerdo al método de Thornthwait. Este método es muy utilizado en hidrogeología y en edafología, ya que tiene en cuenta la capacidad de almacenamiento del suelo, temperatura media la cual está directamente relacionada a la evapotranspiración y al índice de luz diaria. Otros componentes como; la ETP, ETR, precipitación, déficit y excesos del balance son reflejados como resultado en las tablas número 6, 7, 8 Y 9.

5.2. MODELO HIDROQUÍMICO.

La hidroquímica busca entender la interacción que hay entre la química y el flujo de aguas subterráneas valorando el impacto de la infiltración de algunos componentes, mejorando el análisis del agua que sale a la superficie y la relación que hay entre el ciclo hídrico y el estado de la calidad del agua, considerando a la precipitación como primera fuente de entrada a los sistemas hidrogeológicos [32]. Para determinar la calidad de las fuentes de abastecimiento del municipio de Pulí, se realizó inicialmente la identificación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, la selección de los puntos y toma de muestras para finalmente ser analizadas en laboratorio.

5.2.1. Determinación de parámetros a medir.

Para determinar la calidad y estado actual del agua utilizada para el abastecimiento de la población, se realizaron diferentes visitas al municipio. Estos parámetros se midieron según lo establecido en la resolución 2115 de 2007, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2 Valores permisibles para el índice de la calidad del Agua para Consumo humano.

ENSAYO	LÍMITES PERMISIBLES RESOLUCIÓN 2115 DE 2007
Alcalinidad total	200 mg/L
Aluminio	0,2 mg/L
Calcio	60 mg/L
Carbono orgánico total	5 mg/L
Cloruros	250 mg/L
Coliformes totales	0 UFC/100 mL
Color aparente	15 UPC
Dureza total	300 mg/L
E.coli	0 UFC/100 ml
Fluoruros	1 mg/L
Fosfatos	0,5 mg/L
Hierro total	0,3 mg/L
In situ cloro residual libre	0,3 - 2 mg/L
In situ pH	6,5 -9,0
Magnesio	36
Manganeso	0,1 mg/L
Molibdeno	0,07 mg/L
Nitratos	10 mg/L
Nitritos	0,1 mg/L
Sulfatos	250 mg/L
Turbiedad	2 UNT
Zinc	3 mg/L
Olor	ACEPTABLE
Sabor	ACEPTABLE
In situ conductividad eléctrica	N.A.
In situ temperatura	N.A.

Fuente: [34].

Estos parámetros fueron analizados in-situ y en los laboratorios de la Universidad Santo Tomas, sede principal, bajo los métodos implementados por el IDEAM para la recolección y toma de muestras.

5.2.2. Localización y toma de muestras.

Para la localización de los puntos de muestreo se tomó como referencia tres aljibes, esto debido a su aporte en volúmenes significativos de agua y su fácil acceso. Se tomó la primera muestra en la vereda Loma Larga, la segunda muestra fue tomada en la bocatoma El Tabor y por último en la bocatoma Talipa (Anexos fotográficos), para así llevar a laboratorio 9 muestras de agua, tres por cada punto, para que los resultados fueran más confiables.

Se realizó un muestreo simple en cada uno de los puntos que fueron establecidos anteriormente dentro de las fuentes de abastecimiento; las muestras se tomaron en la mitad del área de flujo con el objetivo de que cada una de ellas fuera representativa en relación al área de los cuerpos hídricos. Se recolectó un volumen de un litro de agua en cada una de las muestras teniendo en cuenta los requisitos necesarios para llevar a cabo los análisis de laboratorio; estas fueron almacenadas en un recipiente de vidrio previamente esterilizado con el objetivo de evitar la alteración de los parámetros microbiológicos.

Se define la cantidad y el tipo de análisis que se requiere en cada una de las muestras, el tipo de pretratamiento que se le ha realizado, fecha, hora y localización del muestreo, asegurando la integridad de la muestra desde su recolección hasta obtener los resultados finales. Adicionalmente algunos parámetros fueron medidos in-situ con los equipos, multiparametro, cinta métrica, colorímetro, GPS y Kits para la medir nitritos, nitratos, fosforo y pH, estos datos iban siendo llenados en un formato guía como se muestra en el Anexo 10.

Posteriormente estas muestras se depositaron en una nevera con bastante hielo con el fin de garantizar una temperatura adecuada para su preservación y transporte de acuerdo con lo establecido en el protocolo de muestreo del IDEAM. Se ubicó en un lugar con bastante sombra para conservar las características de las muestras teniendo en cuenta que en la mayoría de casos estos requisitos son suficientes para preservar la muestra durante el transporte al laboratorio y durante un período de tiempo relativamente corto antes del análisis.

Finalmente estas fueron transportadas a los laboratorios de la Universidad Santo Tomas, sede central en donde se desarrollaron los análisis fisicoquímicos de cada una de las muestras tomadas. Los análisis de los parámetros microbiológicos (*Escherichia Coli* y Coliformes Totales), se realizaron con el método de presencia o ausencia de estos mediante cultivos. Finalmente se realizó el análisis de los resultados obtenidos comparándolos con los permisibles por la norma.

5.3. MODELO GEOLOGICO

Este documento describe como están presentes y distribuidas las unidades geológicas en la zona, era necesario tener más información para completar el análisis del modelo hidrogeológico, por esto se acudió a fuentes de información secundaria que contuviera la cartografía base del municipio que se encontró en el IGAC y SGC, mediante sus plataformas digitales tienen a disposición de información gratuita para el usuario. Se descargó información como lo es la cartografía a una escala 1:25.000 en formato shape, de igual forma se compró los formatos digitales de la geología y tipos de suelos correspondiente a las planchas 226 y 227 a una escala 1:25.000 para visualizar mediante la plataforma ArcMap el tipo de suelos, recursos minerales, las unidades de estimación, tipificación del sistema de acuíferos, el tipo de roca, litología y por ultimo las fallas y pliegues, y así poder hacer su debida clasificación y todo el mapeo geológico incrementando el conocimiento de la morfología del depósito y representarlo lo más cercano a la realidad posible.

5.4. MODELO HIDRAULICO

La evaluación de las características hidráulicas de un acuífero es de gran importancia para la definición del modelo matemático, teniendo en cuenta las condiciones hidráulicas como la transmisividad y conductividad hidráulica, se busca interpretar la hidrogeología con la recopilación de información de puntos de agua subterránea. En este caso, inicialmente, se estableció realizar pruebas de bombeo, las cuales no se pudieron llevar a cabo debido a su alcance económico; se consideró como segunda opción una valoración por el método de slug test, el cual consiste en medir la lámina de agua que desciende de un pozo (aljibes) a un caudal y tiempo constante; sin embargo lo mencionado anteriormente no se pudo realizar ya que el diseño de los aljibes (espesor de las rejillas o filtros de extracción, profundidad y costos) no cumplen con estas condiciones para realizar estas pruebas. Es por estas razones que el modelo hidráulico no se pudo realizar dentro del modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Pulí.

6. DESARROLLO CENTRAL

6.1. MODELO HIDROLOGICO

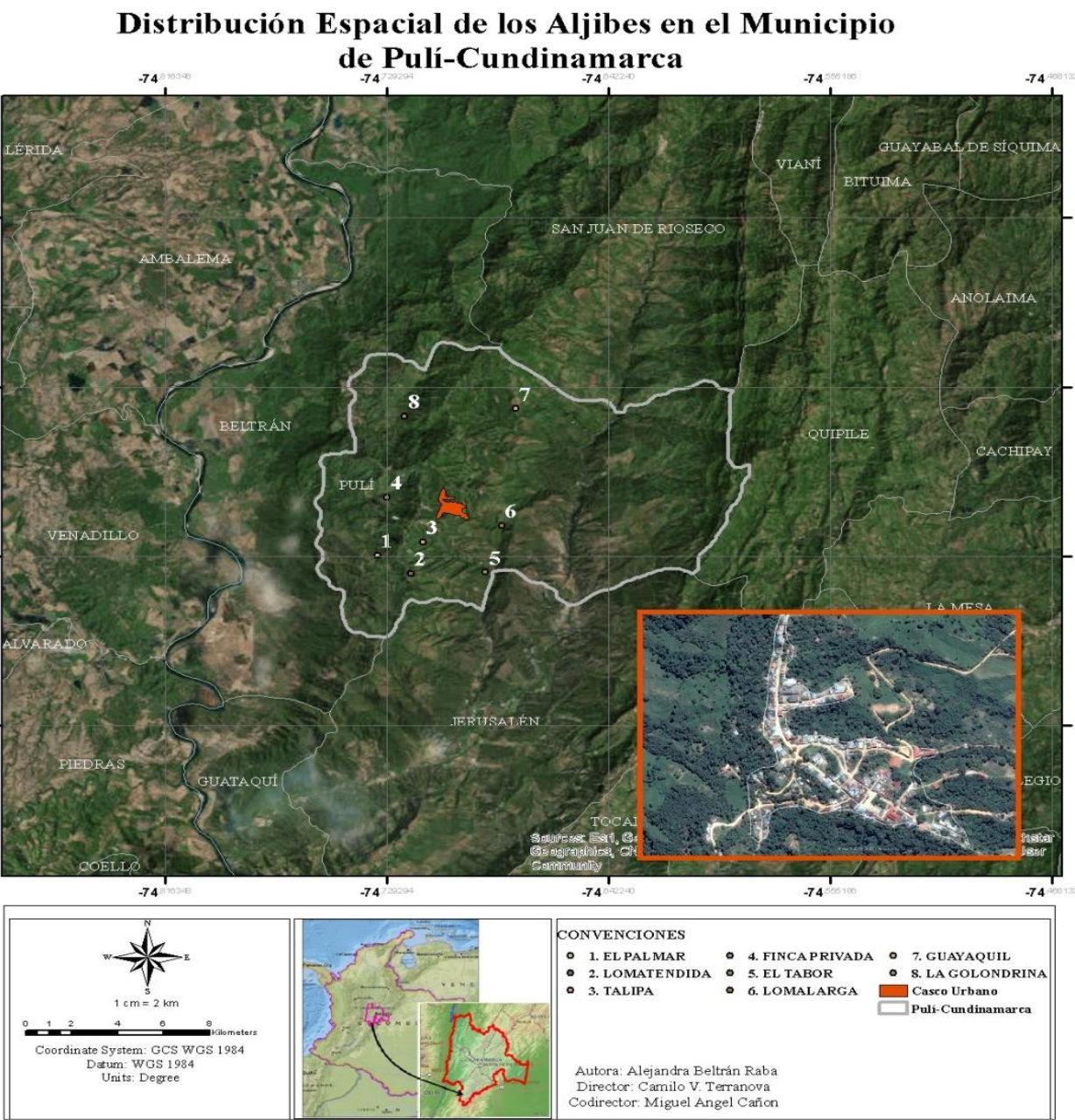
6.1.1. Inventario puntos de captación del agua

El municipio de Pulí cuenta con más de 20 puntos de captación del agua, denominados aljibes. Son un reservorio de agua que se encuentra instalado a nivel subterráneo, los cuales posibilitan el almacenamiento de agua potable con profundidades de no más de 5 metros y contruidos para captar el agua lluvia que se infiltra a través de los medios porosos de las rocas en el suelo, por entre sus partículas a través de los orificios que dejan las raíces de las plantas [35]. O mediante las grietas de las rocas y recorre por caminos subterráneos a veces considerables distancias hasta su ojo de agua, para luego captar el agua por poleas, surgencia natural o por bombas de agua para ser distribuidas ya sea para abastecimiento o actividades económicas que generen un valor agregado.

El modo de captación del agua en estos aljibes es mediante una bocatoma que conduce el agua a una rejilla donde retiene los objetos gruesos (troncos, hojas) para posteriormente ser llevada a tanques de almacenamiento. En algunos casos cuenta con desarenadores para disminuir la turbiedad y el color en el agua para ser así transportada por bombeo o gravedad a las veredas y al casco urbano.

El mapa a continuación muestra la distribución de 8 puntos de captación del agua, en el cual, el aljibe nombrado “Talipa” representa el mayor aporte de agua al casco urbano, este cuenta con un tanque de almacenamiento de 4m de largo, 2m de ancho y 1,20 m de profundidad, con una capacidad de más de 30.000 L de agua, uno de los más grandes e importantes en comparación a otros tanques de almacenamiento en el municipio. También se evidencia el casco urbano representado en color naranja en la parte inferior derecha del mapa, una imagen de la cabecera municipal, para ver así la proporción espacial en cuanto a distancia de la zona urbana a los aljibes.

Imagen 4 Mapa de la distribución de los aljibes y localización de la zona urbana.



Fuente: Elaboración propia.

Según los protocolos del IDEAM para toma y captura de información, la tabla 3 representa los datos más importantes de cada punto. La mayoría de estos son utilizados para la agricultura y la ganadería, muchas veredas compran el agua para consumo y donde el acceso a carreteras es muy difícil, el agua es directamente tomada de estas fuentes, sin un tratamiento previo realizado en una PTAP.

Tabla 3 Inventario puntos de captación del agua.

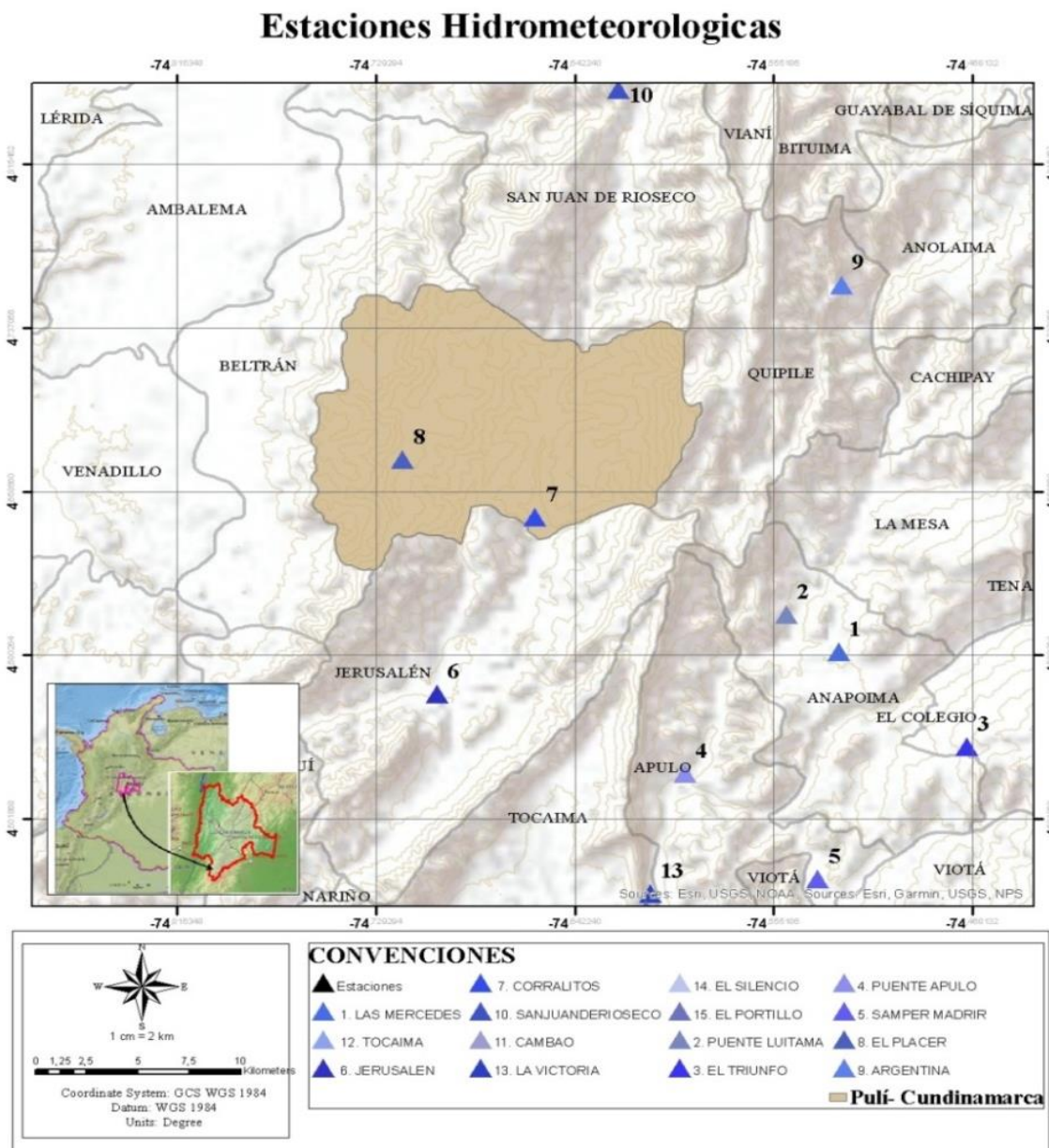
ID	NOMBRE	LONGITUD	LATI	ALT I	PROFUNDIDAD (Nacimiento)	ANCHO	TANQUE DE ALMACENAMIENTO		N. DE USUARIOS	TIEMPO ACTIVO	USOS			DISTRIBUCIÓN		OBSERVACIONES
							Profundidad	Y			Ganadero	Consumo	Agricultura	Gravedad	M. Bomba	
1	EL PALMAR	O 74° 43' 51"	N 04 ° 39' 49,1"	112 2 m	8,9 cm	45 cm	1.15m	1.20m	10-15	SIN REGISTRO	X	X	X	X		Abastece a las veredas Lomatendida, El Carmen, Locandá.
2	LOMATE NDIDA	O 74° 43' 48,0"	N 04 ° 44' 26,0"	102 7 m	42 cm	32 cm	95.3 m	1,13m/1.5 0m	15-28	SIN REGISTRO		X		X		Consumo humano, el agua es tomada del cerro el Tabor.
3	EL TABOR	O 74° 41' 11,9"	N 04 ° 45' 4,5"	102 2 m	23.2 cm	28,7 cm	2.10 m	1,10m/3,2 5m	28-35	SIN REGISTRO		X		X		Tomada del cerro El Tabor
4	TALIPA	O 74°43'38, 0"	N 4°37'43,6"	111 0 m	8 cm	6 cm	1.45m	3,83 m	400	17 años		X	X	X	X	Aprobó las pruebas para consumo humano y es de mejor calidad, se lleva directamente al casco urbano
5	La GOLONDRINA	O 74°43'57, 3"	N 4°39'53,4"	112 2 m	14,3 cm	26 cm	1.50m	3,10m/2,5 0m	12	15 años		X	X	X		Pertenece a la Vereda Ocaná
6	LOMALA RGA	O 74°41'38, 5"	N 4°44'42,8"	120 8m	39 cm	1.33 m	1.85m	1,08m/2,9 5m	32-48	más de 8	X	X	X	X		Abastece agua para la vereda el placer
7	GUAYAQUIL	O 74°41'10, 1"	N 4°44'44,9"	144 2 m	32 cm	28cm	1.30M	2.49 m	35	10 años		X	X	X		
8	Finca Privada	O 74°43'3,1 1"	N 4°40'0.95"	134 8 m	10 cm	1.58 m	3,20m		10	15 años	X		X	X	X	El uso de estos para los habitantes de la finca, para uso ganadero, y agricultura

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Recopilación estaciones hidrometeorológicas y llenado de datos.

Se logra mostrar en la Imagen 6 la ubicación de las estaciones tomadas de la CAR y del IDEAM, distribuidas no solo dentro del municipio sino que también en los municipios que limitan con este, para lograr ver un comportamiento más general de la zona de estudio, las estaciones tomadas fueron; 12 pluviométricas, 11 climatológicas y 12 limnimétricas para un total de 35 estaciones, las cuales fueron llenadas según el método ya mencionado.

Imagen 5 Mapa de Estaciones Hidrometeorológicas.



Fuente: Elaboración propia.

Las estaciones estan representadas en la siguiente tabla.

Tabla 4 Estaciones hidrometeorológicas.

ID	NOMBRE	LONG	LAT	ALT	MUNICIPIO	Departamento	Categoría
21230070	san juan de Rioseco	-74,623	4,851	1364	S. Rio Seco	Cundinamarca	Pluviométrica
21230120	La Belleza	-74,581	4,985	1200	Chaguani	Cundinamarca	Pluviométrica
23065060	Santa Teresa	-74,462	4,842	2200	Albán	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
21206180	Primavera de Matima	-74,443	4,806	1850	Anolaima	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
21205670	La Florida	-74,438	4,771	1915	Anolaima	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
21205940	Villa Inés	-74,384	4,835	2590	Facatativá	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
21206280	Acapulco	-74,333	4,654	2650	Bojaca	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
21202160	Hidroparaiso	-74,405	4,573	1600	el colegio	Cundinamarca	pluviométrica
21205660	las mercedes	-74,527	4,582	810	Anapoima	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
21235010	Jerusalén	-74,702	4,562	297	Jerusalén	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
21237040	Corralitos	-74,659	4,646	398	Pulí	Cundinamarca	Limnimetrica
21230060	Nariño	-74,826	4,399	289	Nariño	Cundinamarca	Pluviométrica
21220040	Piedras	-74,881	4,535	384	Piedras	Tolima	Pluviométrica
21240080	Alvarado	-74,951	4,568	439	Alvarado	Tolima	Pluviométrica
21250460	Venadillo	-74,918	4,664	430	Venadillo	Tolima	Pluviométrica
21250430	Campamento	-74,767	4,783	241	Ambalema	Tolima	Pluviométrica
21250600	Gamba	-74,767	4,817	320	Ambalema	Tolima	Pluviométrica
21237050	Cambao	-74,739	4,906	2449	s. rio seco	Tolima	Limnimetrica
21250610	Alsacia	-74,783	4,850	310	Ambalema	Tolima	Pluviométrica
21250350	El hda Triunfo	-74,133	4,867	400	Ambalema	Tolima	Pluviométrica
2123502	El Placer	-74,717	4,674	1345	Pulí	Cundinamarca	Limnimetrica
2120693	Viani	-74,573	4,872	1573	Viani	Cundinamarca	Limnimetrica
2120890	Tocaima	-74,649	4,452	364	Tocaima	Cundinamarca	Limnimetrica
2120711	Puente Lutaima	-74,549	4,600	579	Anapoima	Cundinamarca	Limnimetrica
2120933	Puente Ferrocarril	-74,373	4,759	2422	Zipacon	Cundinamarca	Limnimetrica
2120652	Paloquemao	-74,407	4,730	2181	Zipacon	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
2120640	La Victoria	-74,609	4,466	389	Tocaima	Cundinamarca	Cmtg. ordinaria
2120891	El Silencio	-74,673	4,431	350	Tocaima	Cundinamarca	Limnimetrica
2120882	El Portillo	-74,611	4,458	389	Tocaima	Cundinamarca	Limnimetrica
2120180	San Gregorio	-74,499	4,674	854	Cachipay	Cundinamarca	Limnimetrica
2120929	El Triunfo	-74,471	4,537	1093	Anapoima	Cundinamarca	Limnimetrica

2120881	Puente Apulo	-74,594	4,524	426	Apulo	Cundinamarca	Limnimetrica
2120179	argentina	-74,526	4,758	1150	Quipile	Cundinamarca	Pluviométrica
2120639	la mesa	-74,466	4,625	1194	La Mesa	Cundinamarca	Pluviométrica
2120641	Esc Samper Madrid	-74,536	4,473	534	Apulo	Cundinamarca	Pluviométrica

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3. Análisis espacial (Arcgis y Python).

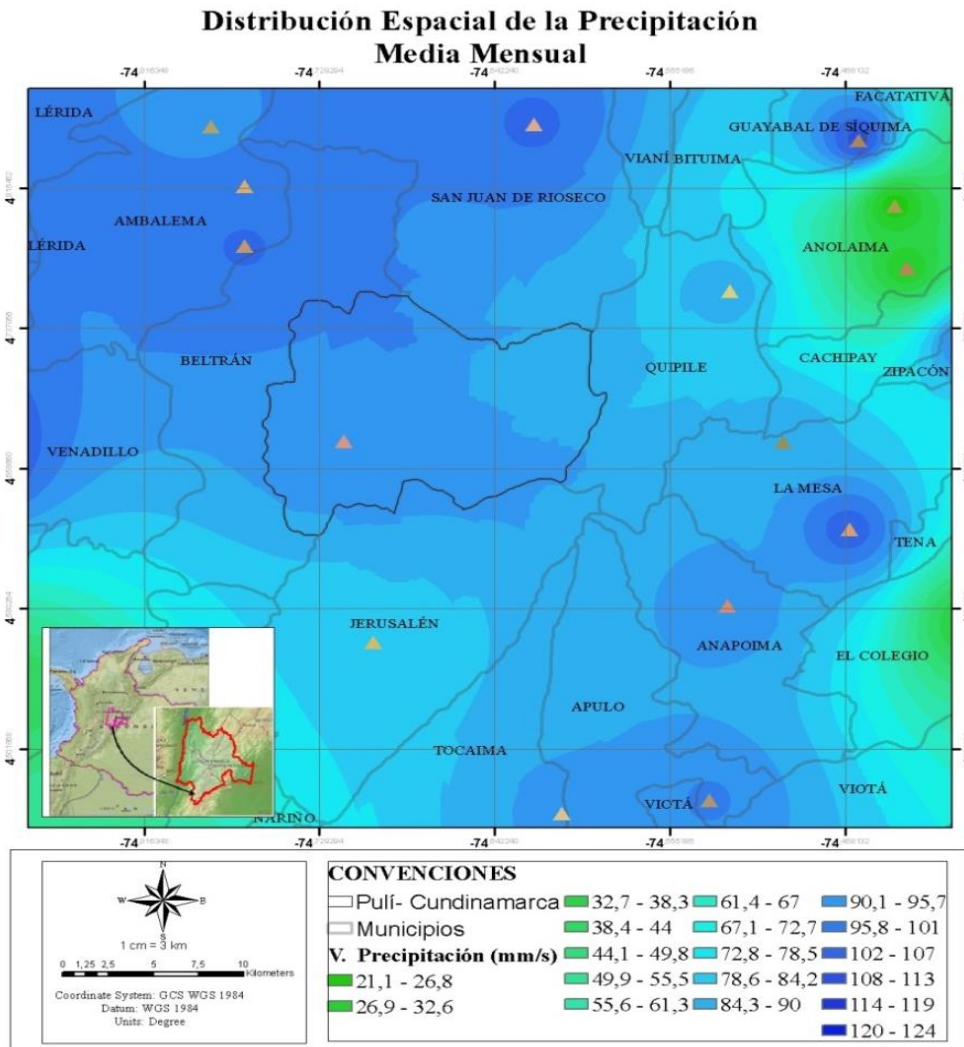
Como parte de las fases a la implementación de la hidrología como insumo para el modelo hidrogeológico conceptual, es simular como es el comportamiento del agua y su ciclo mediante mapas para el análisis a detalle de la disponibilidad de este recurso en el municipio teniendo en cuenta los principales componentes del balance hídrico. Estos análisis hidrológicos de la zona tienden esencialmente a estimar los volúmenes de agua que se infiltran; centrándose en una caracterización climática (análisis temporal y espacial de datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración) para obtener como resultado final el balance hídrico regional.

Los mapas a continuación mostrara las variables para el analisis temporal y espacial de la zona de interes.

➤ **Precipitación**

En la imagen 7 muestra la distribucion de la precipitaciontotal anual en el area correspondiente a la zona de estudio

Imagen 6 Mapa de la distribución de la precipitación media mensual.



Fuente: Elaboración propia.

El municipio de Pulí cuenta con una sola estación hidrometeorológica ubicada en el sur-occidente, con una mínima de 34,53 mm/s y una máxima 171,45 mm/s para un total anual de 1128,54 mm/s. Al tener una visión más general del comportamiento de la precipitación alrededor de la zona de estudio y dentro de la misma es bimodal, contemplados así, en los histogramas del anexo 11, presenta dos periodos de lluvias intensa, y dos periodos de sequía o baja precipitación. Para este régimen bimodal, se presenta un periodo de lluvias intensas entre los meses de abril y mayo, habiendo una segunda temporada de lluvia, en los meses de septiembre, octubre y diciembre. Los meses de enero, febrero, junio, julio y agosto, generalmente son meses de baja

precipitación.

En la imagen 7 representa los valores más altos de precipitación en mm/s por los colores más fuertes, siendo estos, los municipios pertenecientes al departamento del Tolima ubicados al occidente del mapa, con régimen de lluvia de 124 mm/s. Los municipios hacia el costado oriente representan los valores de precipitación más bajos desde 21,1 mm/s hasta un 48,7 mm/s. Teniendo en cuenta factores como la orografía, geografía, vientos, altitud, entre otros, puede llegar a influir en la cantidad de reserva del agua en las distintas zonas, es decir, que a pesar de que el municipio se encuentre en una zona donde relativamente cae un buen volumen de agua, estos factores pueden influir directamente en el almacenamiento del recurso hídrico.

➤ **Temperatura.**

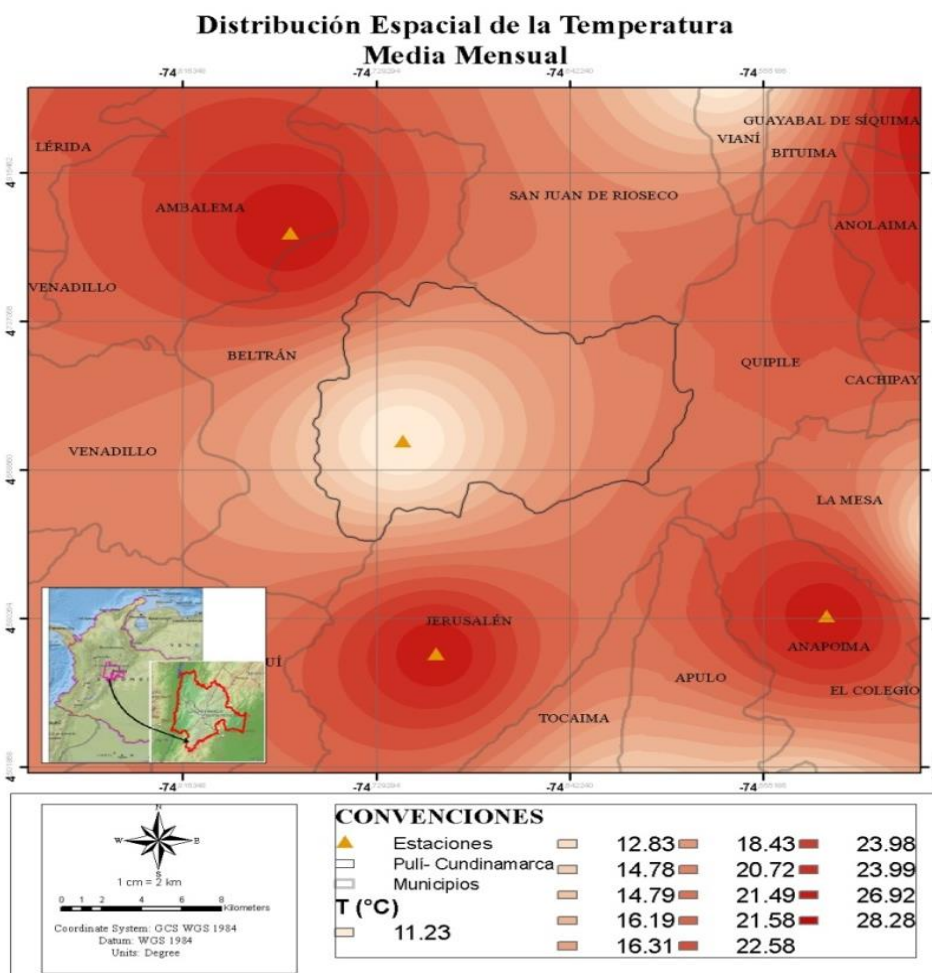
Los valores promedios de temperatura registrados, generalmente han presentado valores no inferiores a 11°C y no superiores a los 30°C durante los años de registro en la estación de Pulí. Dichos cambios en la temperatura media mensual generalmente no cambia abruptamente, por lo que se puede inferir que a lo largo del año, la temperatura media en el municipio tiende a ser bastante homogénea en general.

Tabla 5 Valores promedio de temperatura media mensual de todas las estaciones.

Estación (EL PLACER)	Temperatura (° C).											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PROMEDIO	20	19,9	19,6	19,5	19,2	19,3	19,4	19,7	19,9	19,5	19,5	19,7
MAXIMOS	28,8	29	28,4	28	27,5	28,1	29,2	29,6	28,7	27,3	27,1	27,6
MINIMOS	12,2	11,9	11,4	11,6	10,8	11,1	10,6	10,4	11,7	11,5	10,9	10,7

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 7 Mapa de distribución media mensual de Temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas más altas están presentes en los municipios que limitan hacia el Tolima, y va descendiendo gradualmente en los municipios que limitan hacia el departamento de Boyacá. Las temperaturas más altas las registra la estación La Florida ubicada en el municipio de Ambalema, Tolima y las temperaturas más bajas las registra la estación Villa Inés en el municipio de Facatativá, Cundinamarca.

➤ **Evaporación**

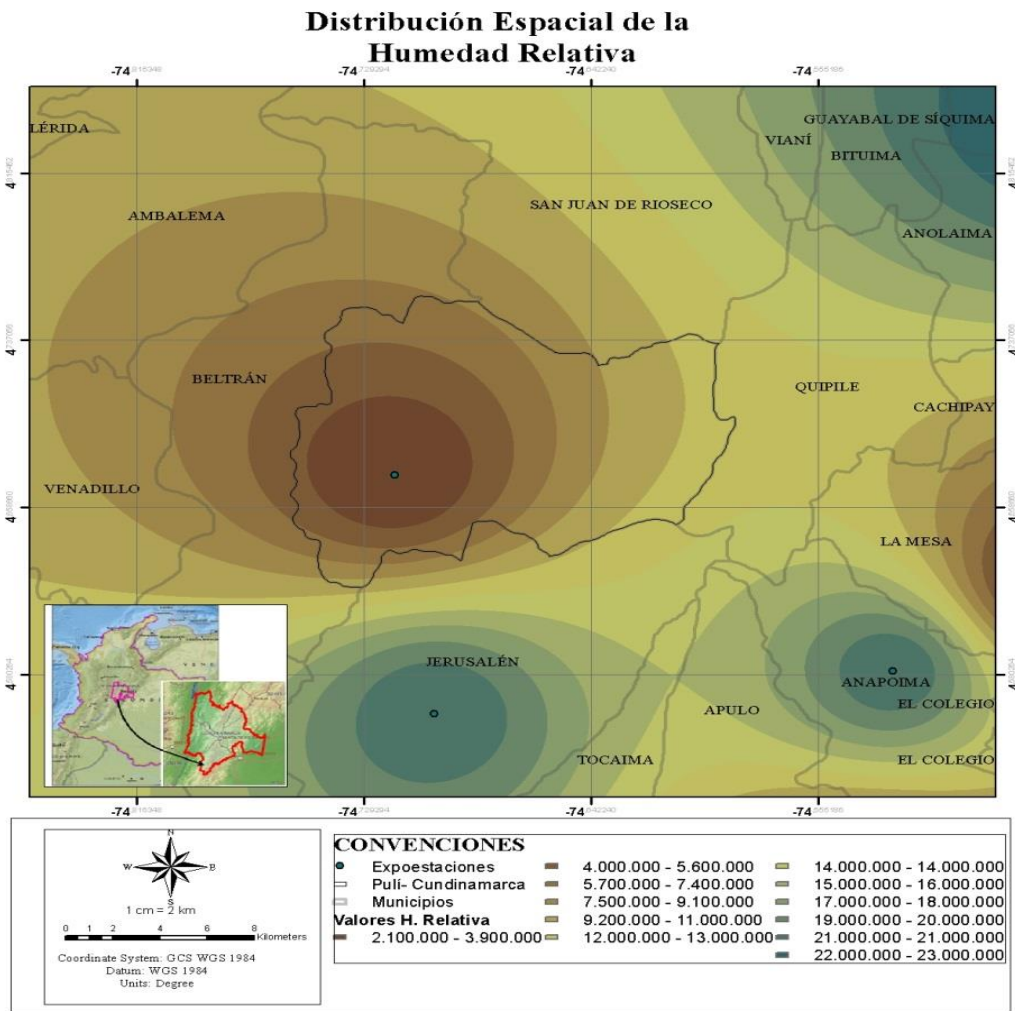
La evaporación puede verse por la desaparición gradual del líquido cuando se expone una elevada temperatura, forma parte del ciclo del agua, como parte importante de la renovación de este en la atmosfera [32]. La evaporación es una variable clave para el cálculo del balance de agua del suelo, para la detección de estrés hídrico como así

también para los modelos de rendimiento de cultivos, por lo anterior se muestra en el anexo 13, donde, al evaporarse el agua que cae en el municipio generara un déficit hídrico, este también va en relación a la temperatura, a una mayor temperatura habrá una mayor evaporación. Los meses en donde más hubo evaporación, fueron los meses donde se registró la precipitación más alta, ya que hay más volumen de agua que evaporarse. Los niveles de evaporación no cambian bruscamente ya que la temperatura permanece igual durante casi todo el año.

➤ **Humedad relativa**

Ciertos factores que hacen que la humedad relativa cambie en el municipio, es el aumento o disminución de la temperatura, precipitación, vegetación y radiación solar en la zona. La humedad es una variable meteorológica de los principales componentes de la atmósfera ya que esta muestra la cantidad que contiene el aire [38], esa cantidad no es constante sino que dependerá de los factores anteriormente mencionados.

Imagen 8 Mapa de distribución media mensual- Humedad Relativa.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Valores de humedad relativa.

Estación (EL PLACER)	Humedad Relativa (%).											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JIL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PROMEDIO	72,61	67,78	67,60	64,65	65,28	61,95	56,46	53,59	56,09	65,43	70,64	72,87

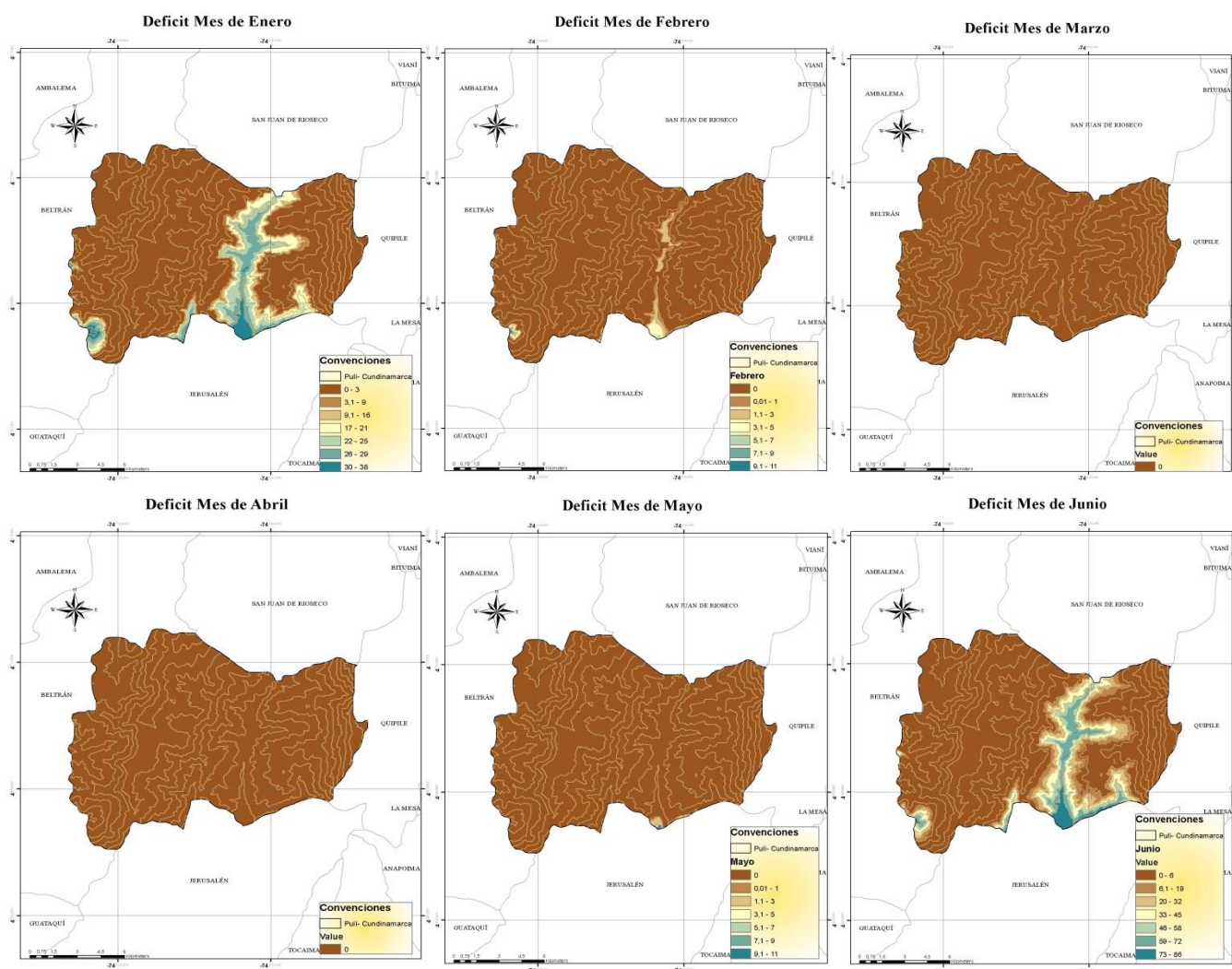
Fuente: Elaboración propia

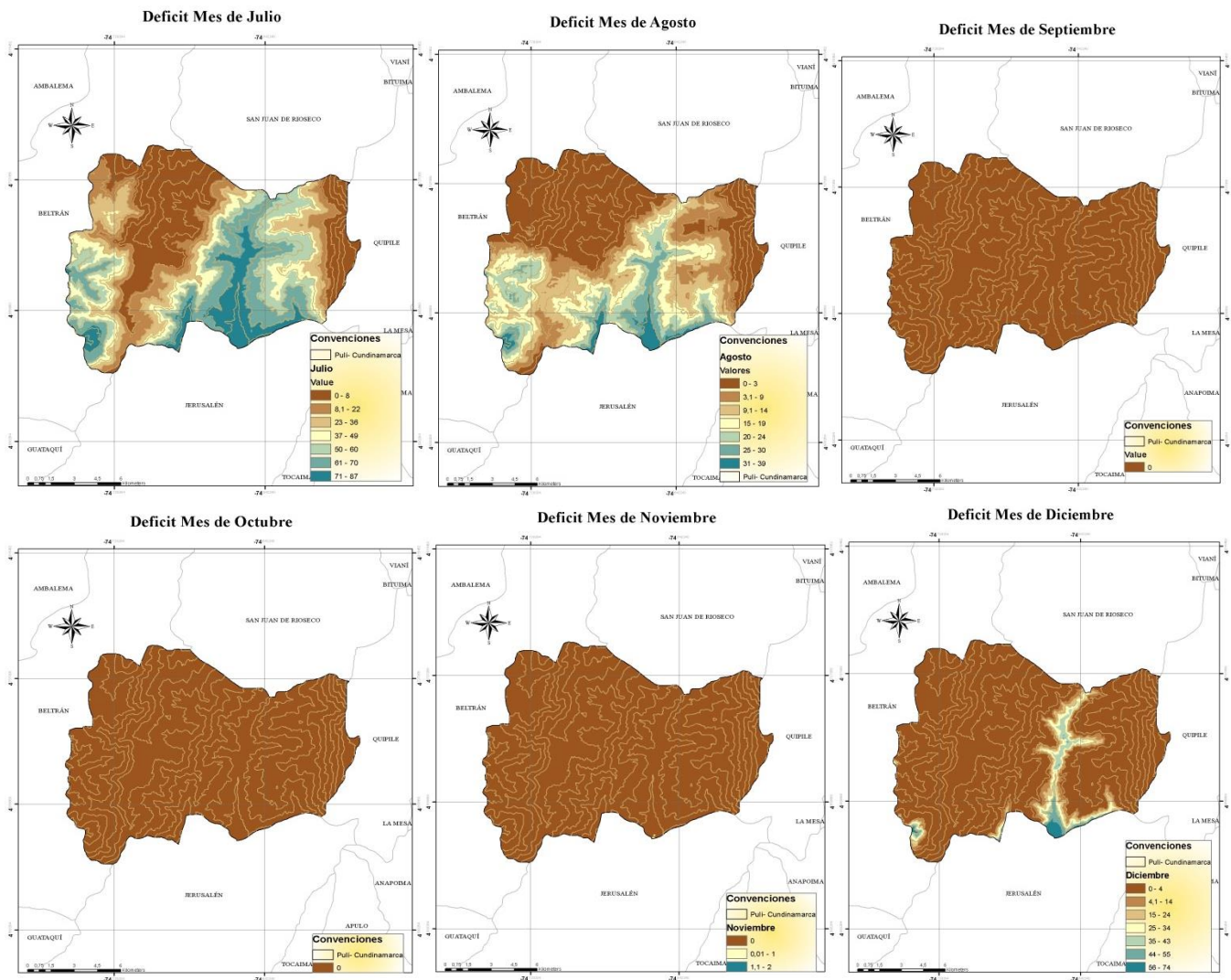
Con respecto a la humedad relativa, con periodicidad mensual en cada una de las estaciones, presenta valores bastante uniformes en un rango 65,9 y 72,61 %, indicando que la humedad relativa es constante en la zona de estudio.

➤ Déficit.

El balance nos arroja 12 mapas del déficit mensual según la ecuación de Thornthwaite. de estos mapas, cinco meses (Enero, Junio, Julio, Agosto y Diciembre) representan un cambio en la distribución espacial según los datos obtenidos. Se verá en la imagen 10 el comportamiento de la distribución del déficit, por lo tanto si se desea ver los valores a detalle se encuentran en el Anexo 13.

Imagen 9 Déficit mensual.





Fuente: Elaboración propia.

En los anteriores mapas son la representación de la distribución del agua en el suelo, estos meses también concuerdan con el periodo de sequía o de bajas precipitaciones, una de las razones por las que pueda representar un déficit en el almacenamiento y la reserva, esto siendo más notorio en el mes de julio.

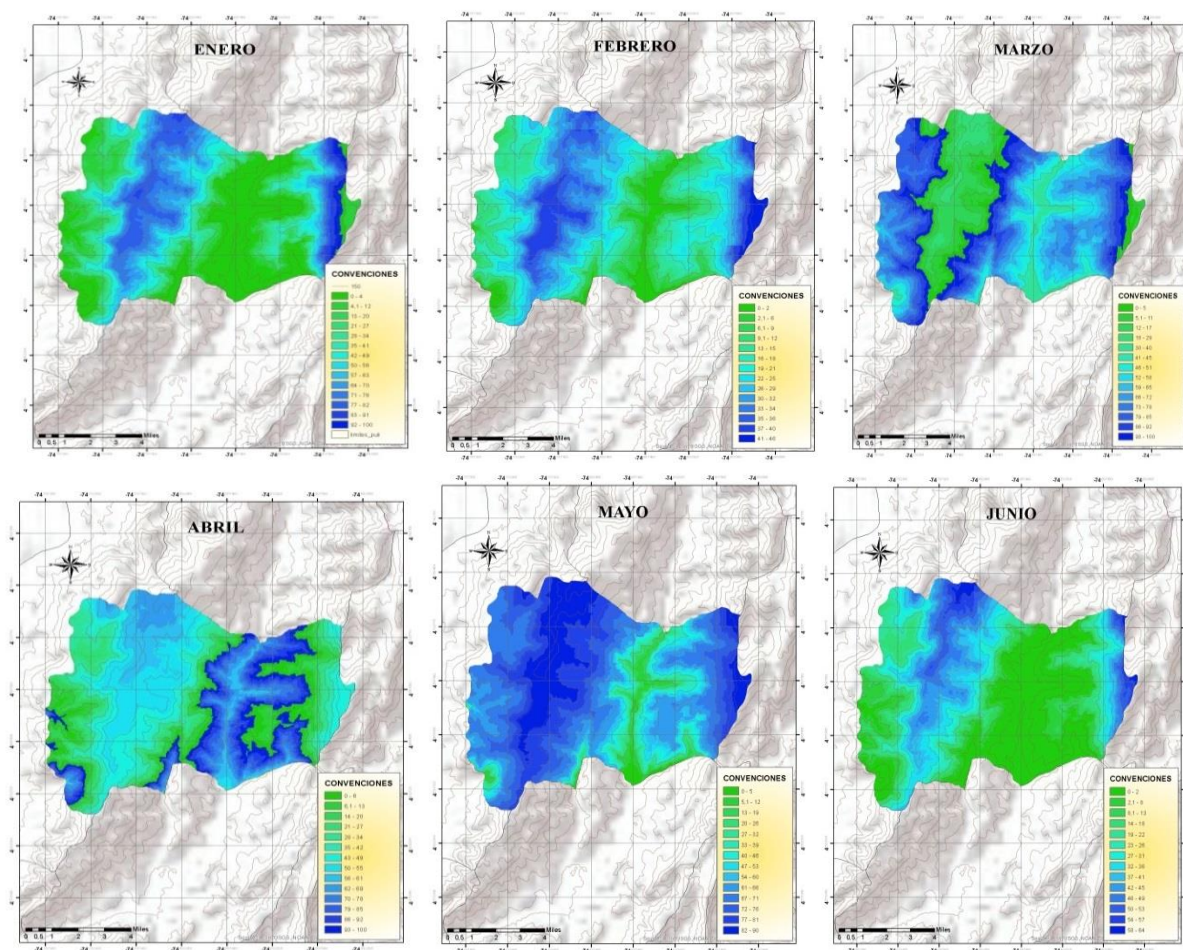
➤ Almacenamiento.

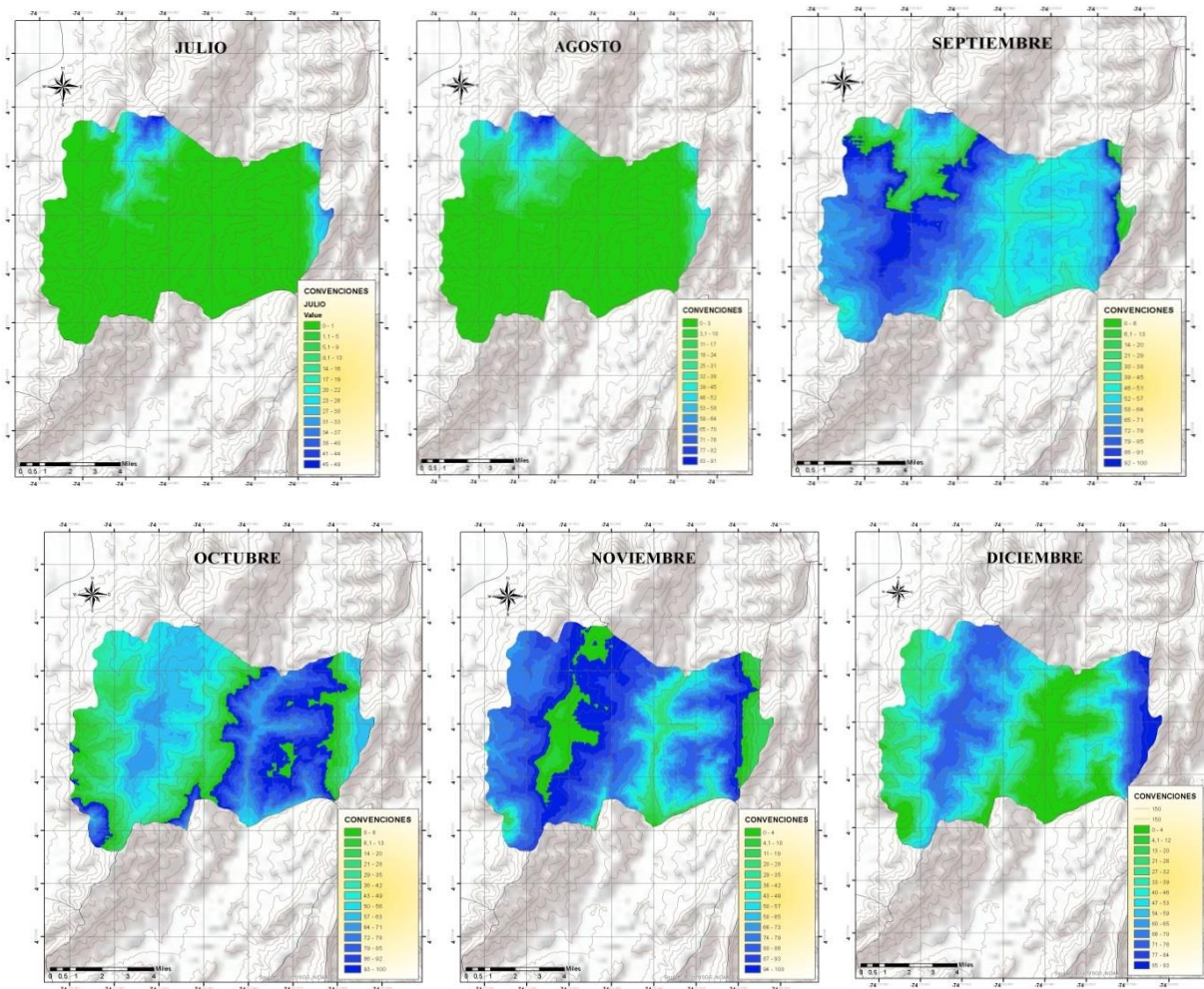
La realización de un balance requiere conocer y medir los flujos de entrada y salida del agua, así, como el almacenamiento o reserva. Para evaluar el término hay que identificar las zonas en donde se puede llegar almacenar agua, como son la superficie del terreno, la red de drenaje (cauces de los ríos), el suelo edáfico, la zona no saturada y los acuíferos. Como referencia se toma una reserva máxima de 100 mm este valor se toma según el método de Thornthwaite en su clasificación climática. El valor de la reserva no es preciso debido a que varía según el tipo de suelo, clase de rocas, horizontes,

vegetación, entre otros, desde un punto de vista edafológico, así que por esta razón se dice que el valor es de 100 mm según el método empleado en el proyecto (Método de Thornthwaite). Por consiguiente se mostraran doce mapas pertenecientes a cada mes del año donde se evidencia que el comportamiento es totalmente diferente mes a mes y la distribución en todo el Municipio. En donde los valores menores a 45 mm son representados por los colores verdes y los valores de 45 a 100 mm son representados por los colores azules.

Ya que las condiciones del suelo son diferentes

Imagen 10 Mapas mensuales de Almacenamiento del suelo.





Fuente: Elaboración propia

La precipitación es mayor a la ETP en la mayoría de los meses, por lo tanto, el agua sobrante pasara a engrosar la reserva del suelo. El suelo tiene una capacidad de retención de humedad en función de sus características físicas y cuando se alcance la capacidad de retención máxima del suelo, el agua añadida en exceso escurrirá superficialmente o en profundidad, esto es depende del suelo y la vegetación. En los meses donde hubo déficit la reserva es casi nula, en los meses que mayormente hubo una reserva o almacenamiento, fueron en los meses de marzo, abril, octubre y noviembre, que corresponde a los meses de altas precipitaciones en la zona.

6.1.4. Cálculo de la ETP por el método de Thornthwaite.

Se determina el balance hídrico para el área de estudio, con el fin de obtener el volumen promedio de agua disponible en la zona. Este cálculo, se realiza a partir de los datos de precipitación (como entrada al volumen de control), y la evapotranspiración potencial como salida de dicho volumen; a continuación se presenta el cálculo del balance.

➤ Cálculo de la ETP.

La ETP es la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas [38]. La distribución espacial de la evapotranspiración se encuentra en el anexo 12 y, en la tabla 6 registra el comportamiento de esta variable durante todo el año.

Tabla 7 Cálculo de la evapotranspiración.

Cálculo de la ETP mensual.														
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago.	Set	Total
Temperatura.	21,9	21,0	21,3	21,6	22,8	22,4	21,0	21,3	21,0	21,0	21,8	21,9	21,9	259,0
i	9,4	8,8	9,0	9,2	10,0	9,7	8,8	9,0	8,8	8,8	9,3	9,3	9,4	109,9
ETP sin corr	85,3	76,6	79,9	82,8	94,2	90,5	76,9	79,7	76,7	77,4	83,8	84,9	85,3	
nº días mes	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	28,3	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	
nº horas luz	12,1	12,0	11,9	11,9	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	
ETP corr.	86,0	79,1	79,2	84,9	96,6	85,2	80,2	81,0	81,2	80,0	88,8	90,0	86,0	1012,0
													a=2,6	

Fuente: Elaboración propia.

El balance por el método de Thornthwaite consiste en conocer un mes y un valor de almacenamiento, para estimar este valor se realiza un pre-cálculo con una capacidad de 100 mm/s (capacidad máxima) y de 0 mm/s (capacidad mínima) para así lograr estimar por cual mes se debe iniciar, con el fin de conocer si se presenta un déficit o un superávit. Se tiene en cuenta que los valores negativos en el balance representan que ese valor se le quitara al almacenamiento.

Si la precipitación es mayor que la ETP habrá un superávit de agua y por lo tanto, el agua que quede en exceso escurrirá a fuentes superficiales, vegetación, infiltración y evaporación, por lo tanto el agua que cae podrá satisfacer no solamente la demanda hídrica, sino que también el crecimiento de la vegetación en la zona. Por consiguiente y el balance resultante, presenta un déficit de agua en la mayoría de meses, exceptuando los meses de marzo, abril y mayo ya que en estos meses la precipitación supera la ETP, cumpliendo así, la ley de la conservación de la masa (las entradas son iguales a las salidas) debido a una variación entre la temperatura, la humedad y la evaporación.

Tabla 8 Índice de calor mensual.

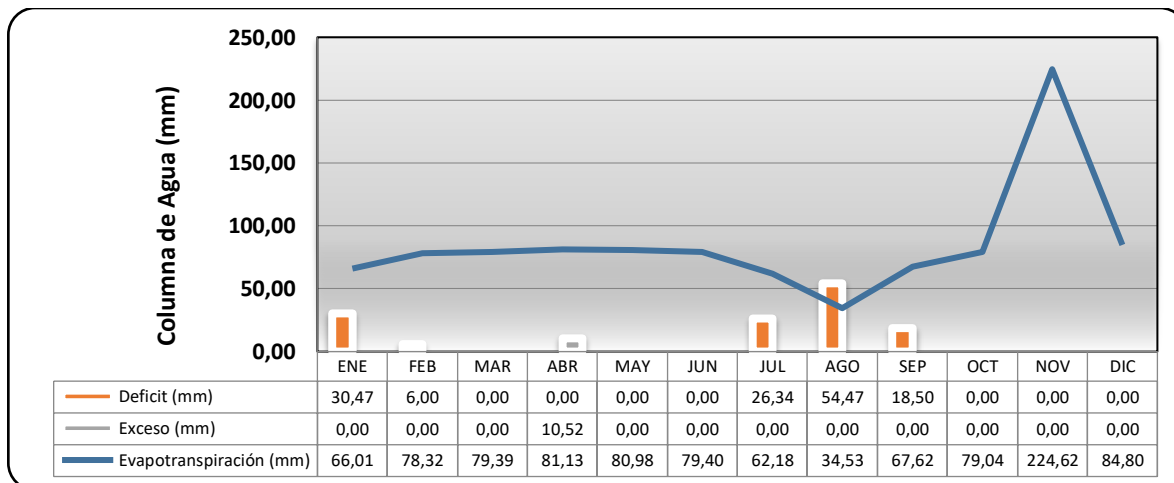
ITERACION POR ALTITUD													
Altitud (°)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	

0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	10,1	1,04
4	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	2,81	1,02
5	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02

Fuente: Elaboración propia.

El índice de calor mensual (i) se calcula a partir de las temperaturas medias diarias del aire según la ecuación 4, es una variable representativa del método de Thornthwaite ya que con esta se calcula las pérdidas del sistema (evaporación, evapotranspiración) y va directamente relacionado a la cantidad de horas diarias de luz y temperatura (°c), si hay una mayor cantidad de pérdidas en el sistema, el almacenamiento será igual a cero. Esta variable también depende de la altitud donde se encuentra el municipio, ya que es una relación de altura vs temperatura, en este caso la altitud del municipio es de 4° y la temperatura promedio es de 21.43 °C.

Gráfica 1 Déficit, exceso y ETP.



Fuente: Elaboración propia.

La grafica 1 indica que el mes con la mayor ETP es el mes de noviembre, un déficit en el mes de enero, julio, agosto y septiembre; el exceso en los meses de febrero y abril siendo estos valores no tan representativos o tan significativos en comparación a la ETP.

En la tabla 8 muestra los valores obtenidos en el balance hídrico por el método de Thornthwait.

Tabla 9 Balance Hídrico Thornthwaite.

BALANCE HÍDRICO - Thornthwaite

Mes	May	Jun	Jul	Ago.	Sep	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Año
Temperatura	21	21	21,7	21,9	21,9	21	21	21,6	22,8	22	21	21,3	
Índice de Calor Mensual	8,8	8,8	9,3	9,3	9,4	8,8	9	9,2	10	9,7	8,8	9	110
EVP mensual sin ajustar (mm)	76,7	77,4	83,8	84,9	85,3	76,6	80	82,8	94,2	91	77	79,7	
F. de crr por latitud	1,1	1	1,1	1	1	1	2,8	1	1	0,9	1	1	
PET	81	79,4	88,5	89	86,1	79	225	84,8	96,5	84	79	81,1	1154
P	126,4	57,3	38,8	34,5	67,6	171,5	147	83,6	52,2	78	118	153	1129
P-PET	45,5	-22	-50	-54	-18	92,4	-77	-1,2	-44	-6	38	72,3	-25
Delta RFU	45,5	-22	-23	0	0	92,4	-77	-1,2	-14	0	38	61,8	
RFU	45,5	23,4	0	0	0	92,4	15	13,8	0	0	38	100	
AET	81	79,4	62,2	34,5	67,6	79	225	84,8	66	78	79	81,1	1018
Déficit	0	0	26,3	54,5	18,5	0	0	0	30,5	6	0	0	136
Exceso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escurrim (mm)	0	0	0,1	0,1	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0,4
Escurrim (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Fuente: Elaboración propia.

Cuando el almacenamiento está en su capacidad máxima representa el hecho que el agua sobrante escurrirá, el exceso solo se muestra para el mes de abril donde hubo un mayor volumen de precipitación, en cuanto a los otros meses del año representa un mayor déficit en los meses de enero, febrero, agosto y diciembre.

Tabla 10 Resultado Balance Hídrico.

Resultados Balance Hídrico												
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	52,2	78,3	117,6	153,4	126,4	57,3	38,8	34,5	67,6	171,5	147,2	83,6
ETP (mm)	96,5	84,3	79,4	81,1	81	79,4	88,5	89	86,1	79	224,6	84,8
Prec-ETP (mm)	-44,3	-6	38,2	72,3	45,5	-22,1	-49,7	-54,5	-18,5	92,4	-77,4	-1,2
RFU (mm)	0	0	38,2	100	45,5	23,4	0	0	0	92,4	15	13,8
AET (mm)	66	78,3	79,4	81,1	81	79,4	62,2	34,5	67,6	79	224,6	84,8
Déficit (mm)	30,5	6	0	0	0	0	26,3	54,5	18,5	0	0	0
Exceso (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escurrimiento (mm)	0	0	0	0	0	0,2	0,1	0,1	0,4	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Las salidas (ETP) superan las entradas (precipitación), esto representa un déficit en la reserva, ya que la mayor parte del agua que ingresa al sistema representara perdidas, una parte de esta ira como escorrentía, otra parte se infiltrara y una gran parte se evaporara (EVT> Precipitación).

6.2. MODELO HIDROQUÍMICO.

6.2.1. Localización y toma de muestras.

Algunos parámetros medidos fueron in-situ y otros fueron medidos en el laboratorio de la Universidad Santo Tomas, conservando las muestras con cadena de frío durante las cinco horas de trayecto y fueron llevadas directamente a estos laboratorios. La imagen 12 representa los tres lugares donde se tomaron las muestras.

Imagen 12 Evidencia fotográfica de los aljibes donde se tomaron las muestras.



Fuete: Elaboración propia.

1. ALJIBE TALIPA.

2. ALJIBE LOMALARGA.

3. ALJIBE EL TABOR.

Fue necesario la toma de muestras en tres ocasiones correspondientes a los meses marzo, abril y junio, esto por si se generaba algún error humano, en las tres ocasiones los valores fueron similares, el agua en general cumple con los requisitos mínimos para ser distribuida, ya que es de buena calidad, no hay pozos sépticos cerca de estas fuentes, ni actividades industriales que cambien la composición del agua, en algunos casos el agua es bastante amarillenta debido a la presencia de vegetación y bajas profundidades generando arrastre de material sedimentable, por otra parte, su color al salir del tanque de almacenamiento no presentaba tanto color y es debido a que el agua no va con la suficiente presión y caudal, se alcanza a sedimentar los sólidos en el tanque. El agua está directamente en contacto con la vegetación, animales, entre otros, esta no cuenta con un proceso de cloración ni de ningún tipo de tratamiento previo.

6.2.2. Parámetros medidos

Esta parte es una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero, como parte del estudio de aguas subterráneas. Trata de ver la composición química del agua que ingresa al acuífero y sus reacciones con los minerales presentes en la roca a través de la cual circula y en contacto con la que ha estado almacenada, las sustancias contaminantes que afectan su calidad. Entre los cuales se muestran parámetros medidos en campo (Tabla 10, 11 Y 12) donde se tuvo en cuenta tres puntos de muestreo, por ende se muestra que el agua en la zona maneja unas caracterizas similares reflejados en varios valores medidos en campo, ya sea por su temperatura, alcalinidad, pH, dureza entre otros. También hay que mencionar si el agua presenta parámetros de riesgo que representen una alerta para la salud de las personas, estos son comparados con los límites mínimos permisibles contemplada en la resolución 2115 de 2007 ya menciona anteriormente en la metodología (Tabla 2).

Tabla 11 Parámetros fisicoquímicos aljibe Lomalarga.

PARAMETROS	Aljibe	Unidades	Método	Cumplimiento de la norma
	Lomalarga			Res 2115/07
	O 74°41'38,5/N 4°44'42,8			
pH	7,3	pH	Multiparametro	SI
Turbiedad	12,4	NTU	Turbidímetro	NO
Alcalinidad	93,35	mg/L	Titulación	SI
Dureza	110	mg/L	Titulación	SI
Cloruros	5,325	mg/L	Titulación	SI
Olor	Aceptable		In-situ	ACEPTABLE

Sabor	Aceptable		In-situ	ACEPTABLE
Nitrito	0,15	mg/L	Kit	SI
Nitrato	0	mg/L	Kit	SI
Amonio	0,2	mg/L	Kit	N/A
Fosfato	0,25	mg/L	Kit	SI
Temperatura	19,81	°C	Multiparametro	N/A
%OD	29,7	%	Multiparametro	SI
OD	2,33	mg/L	Multiparametro	SI
Conductividad	99	mS/cm	Multiparametro	SI
Salinidad	0,05	PSU	Multiparametro	SI
ORP	341,1	Mv	Multiparametro	SI
Escherichia coli	Ausencia		Cultivo	SI
E.coli	Ausencia		Cultivo	SI
Solidos Totales	0,082	g	Laboratorio	SI
Solidos suspendidos	2,362	g	Laboratorio	SI
Solidos disueltos	2,28	g	Laboratorio	SI

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Parámetros fisicoquímicos aljibe El Tabor.

PARAMETROS	Aljibe	Unidades	Método	Cumplimiento de la norma
	El tabor			Res 2115/07
	O 74°41'38,5/N 4°44'42,8			
pH	6,83	pH	Multiparametro	SI
Turbiedad	22,2	NTU	Turbidímetro	NO
Alcalinidad	58,8	mg/L	Titulación	SI
Dureza	140	mg/L	Titulación	SI
Cloruros	6,39	mg/L	Titulación	SI
Olor	Aceptable		In-situ	ACEPTABLE
Sabor	Aceptable		In-situ	ACEPTABLE
Nitrito	0,025	mg/L	Kit	SI
Nitrato	0	mg/L	Kit	SI
Amonio	0,2	mg/L	Kit	N/A
Fosfato	0,25	mg/L	Kit	SI
Temperatura	20,79	°C	Multiparametro	N/A
%OD	41,3	%	Multiparametro	SI
OD	3,18	mg/L	Multiparametro	SI
Conductividad	22	mS/cm	Multiparametro	SI

Salinidad	0,01	PSU	Multiparametro	SI
ORP	247,7	Mv	Multiparametro	SI
Escherichia coli	Ausencia		Cultivo	SI
E.coli	Ausencia		Cultivo	SI
Solidos Totales	0,268	g	Laboratorio	SI
Solidos suspendidos	2,514	g	Laboratorio	SI
Solidos disueltos	2,246	g	Laboratorio	SI

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Parámetros físicoquímicos aljibe Talipa.

PARAMETROS	Aljibe	Unidades	Método	Cumplimiento de la norma
	Talipa			
	O 74°43'38,0"/N 4°37'43,6"			Res 2115/07
pH	7,8	pH	Multiparametr o	SI
Turbiedad	2,01	NTU	Turbidímetro	SI
Alcalinidad	95,98	mg/L	Titulación	SI
Dureza	248	mg/L	Titulación	SI
Cloruros	5,325	mg/L	Titulación	SI
Olor	Aceptable		In-situ	ACEPTABLE
Sabor	Aceptable		In-situ	ACEPTABLE
Nitrito	0	mg/L	Kit	SI
Nitrato	0	mg/L	Kit	SI
Amonio	0	mg/L	Kit	N/A
Fosfato	0,25	mg/L	Kit	SI
Temperatura	21,3	°C	Multiparametr o	N/A
%OD	59,2	%	Multiparametr o	SI
OD	4,59	mg/L	Multiparametr o	SI
Conductividad	343	mS/cm	Multiparametr o	SI
Salinidad	0,16	PSU	Multiparametr o	SI
ORP	52,7	Mv	Multiparametr o	SI
Escherichia coli	Ausencia		Cultivo	SI
E.coli	Ausencia		Cultivo	SI
Solidos Totales	1,776	g	Laboratorio	SI
Solidos suspendidos	2,108	g	Laboratorio	SI

Sólidos disueltos	0,332	g	Laboratorio	SI
-------------------	-------	---	-------------	----

Fuente: Elaboración propia.

Para la medición de alcalinidad como su capacidad para neutralizar ácidos fundamentalmente su contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos aunque otras sales o bases también contribuyen a la alcalinidad [39]. Su valor puede variar significativamente con el pH, en este caso la alcalinidad tiene valores de alcalinidad media que va desde los 41,4 hasta los 98,6, si estos valores fueran inferiores, el agua sería susceptible a la contaminación, ya que no podría oponerse a las modificaciones que generan la disminución del pH, haciendo que el agua sea más ácida, en pocas palabras, la alcalinidad en el agua absorbe protones manteniendo el pH a un valor estable, por otra parte se ve que en la muestra tres los niveles de conductividad aumenta demasiado con relación a los otros dos puntos y esto se puede deber a las sales disueltas presentes en el agua se disuelven en iones con carga positiva o negativa, que conducen electricidad, puede deberse al tipo de minerales que hay en la zona.

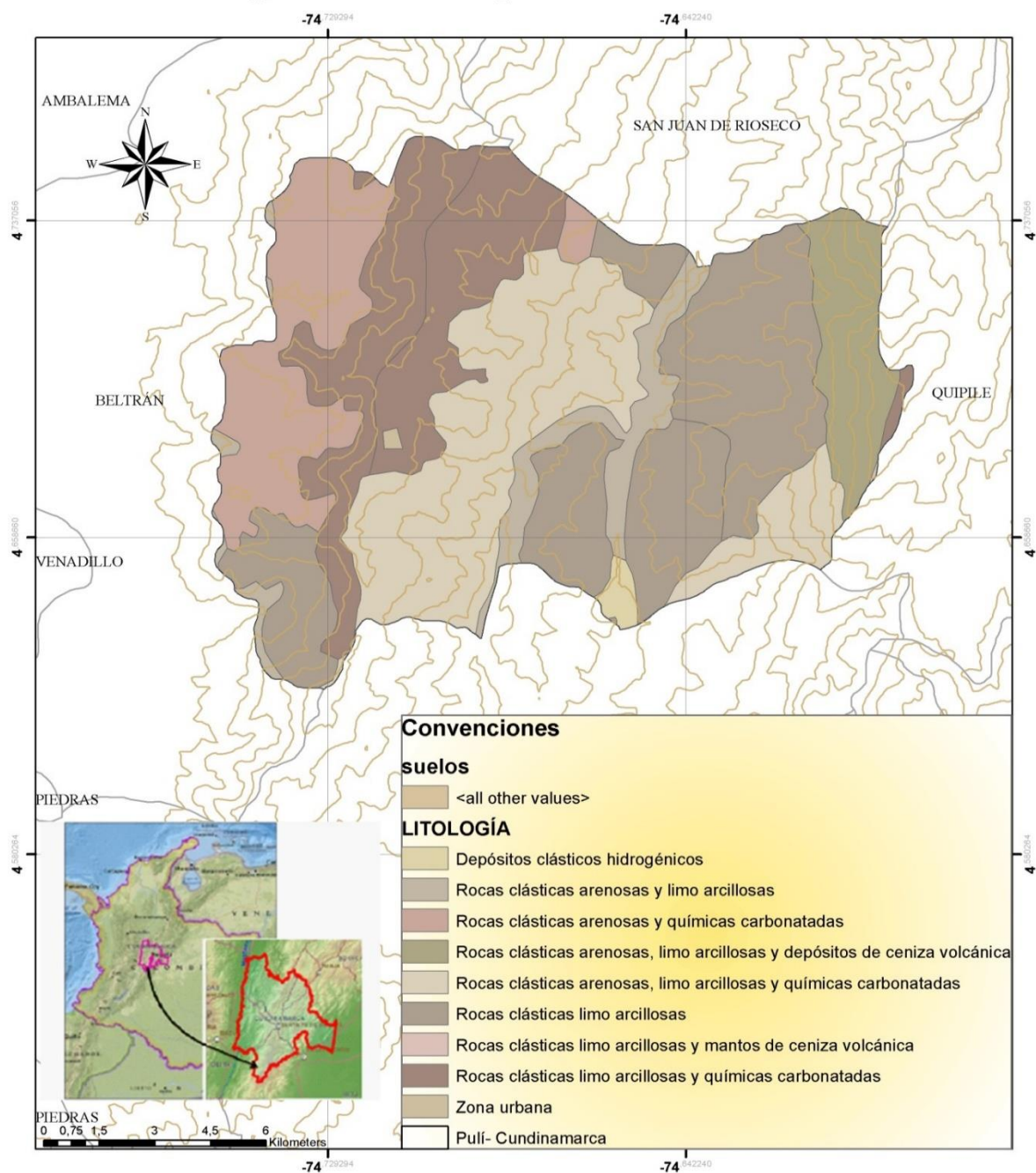
6.3. MODELO GEOLOGÍCO

El municipio de Pulí se ubica en la cuenca del Magdalena medio, caracterizado por suelos de montaña, laderas, cañones, valles y llanuras, siendo una zona de recarga de gran importancia, almacenando grandes volúmenes de agua en el subsuelo, demostrando así que brota desde el suelo, vertiendo sus aguas al río Magdalena, y a subcuencas como lo son, la principal subcuenta Rioseco que está conformada por las siguientes microcuencas, la quebrada La Picardía, la microcuenca de la quebrada Las Hondas, la microcuenca de la quebrada La Palomita y la microcuenca San Ignacio[9]. Para empezar un análisis característico de la zona con respecto a la geología, litología, caracterización del tipo de acuífero, entre otros, fue complicado debido a la poca información que hay de la zona, la ausencia de estudios con respecto al tema hidrogeológico hizo complejo este análisis, por esta razón, lo que se hizo con la información adquirida por el IGAC en formatos shape, fue ver que tipo de suelos regía en esta zona, para así dar su clasificación y dar conclusión con respecto a la riqueza en cuando al agua subterránea de la zona, se muestra en la Imagen 15 la distribución de la litología en el municipio que consta del factor geológico que explica la disposición de los materiales. Las estructuras derivadas de la tectónica y de la litología, los cuales forman el sistema de acuíferos.

La clasificación se hizo conforme a las rocas más representativas, se tomó como guía el libro ciencias de la tierra capítulo 4,7 y 8, según las características de las rocas se clasificaban en grupos de suelos.

Imagen 13 Litología municipio de Pulí-Cundinamarca.

Litología del Municipio de Pulí, Cundinamarca.



Fuente: Elaboración propia.

La zona se encuentra regida por las formaciones y depósitos geológicos de la siguiente forma:

➤ **Depósitos clásticos hidrogénicos**

La clasificación de estas rocas va relacionada a su tamaño de grano, grava, conglomerado, arena, arenisca, limo-arcilla, son rocas sedimentarias, son profundos, moderadamente bien drenados, de texturas moderadamente gruesas a finas y evolución baja, con algún grado de contaminación con ceniza volcánica y estructura blocosa subangular débilmente desarrollada; el horizonte A2 es negro, de textura franco arenosa y estructura en bloques subangulares fuertemente desarrollada; el Bw1 es pardo oscuro y pardo amarillento, de textura franco arenosa y estructura prismática moderadamente desarrollada; el 2Ab es variegado de pardo, gris y pardo amarillento claro, de textura franco arenosa y estructura en bloques subangulares, fuertemente desarrollada [9].

➤ **Rocas Clásticas arenosas, limo arcillosas y depósitos de ceniza volcánica**

Clásticas arenosas; son profundos, bien drenados y de grupo textural moderadamente fino. Presentan una morfología del tipo Ap-AB-Bw1-Bw2-C. El horizonte Ap tiene en promedio de 18 a 22 cm de espesor, color gris muy oscuro, textura franco arcillo arenosa y estructura en bloques subangulares de moderado desarrollo; inmediatamente debajo del anterior se encuentra un horizonte transicional (AB) de 25 a 30 cm, color pardo grisáceo muy oscuro y textura franco arcillo arenosa; posteriormente se encuentra un horizonte cámbico separado por color en: Bw1 (25 a 30 cm de espesor), color pardo grisáceo oscuro, textura franco arcillo arenosa y estructura en bloques subangulares, y Bw2 de color pardo muy oscuro, textura franco arcillo arenosa y 30 a 35

Rocas limo arcillosas no drenan bien, moderadamente profundos a muy superficiales, limitados unos por roca coherente y otros por fragmentos de roca. Existen áreas con afloramientos rocosos. Formadas por fragmentos procedentes de la erosión de rocas carbonatadas preexistentes. Genéticamente son similares a un sedimento terrígeno (siliciclástico), pero con los granos de naturaleza carbonatada [9].

➤ **Rocas Clásticas arenosas, limo arcillosas y químicas carbonadas**

Los suelos de esta unidad se distribuyen en un tipo de relieve denominado cuestras, caracterizado por tener su origen a partir de la degradación parcial de estratos sedimentarios suavemente plegados, con laderas estructurales de buzamiento inferior al 25%, presentes de manera muy puntual en la zona central de la subcuenca. Los suelos se han desarrollado a partir de depósitos de ceniza volcánica que recubren parcialmente rocas clásticas limoarcillosas; son en general profundos, bien drenados y de texturas finas a medias. La unidad está constituida en un 85% por los suelos Typic Hapludands, e inclusiones en un 15% de los suelos Andic Dystrudepts.

➤ **Rocas clásticas limo arcillosas y depósitos de ceniza volcánica**

Son bajas a moderadamente evolucionados a partir de depósitos de ceniza volcánica,

de texturas moderadamente finas a través de todo el perfil, muy profundos y bien drenados. Son suelos que en su morfología muestran perfiles de tipo Ap (0-60 cm de profundidad), Bw (60-105 cm), 2Ab (105-150 cm). El horizonte superficial (Ap) es negro, de textura franco arcillo limosa y estructura en bloques subangulares moderadamente desarrollada; el horizonte Bw es pardo grisáceo oscuro, de textura franco arcillo limosa y estructura columnar moderadamente desarrollada; el horizonte 2Ab es de color negro, textura arcillo limosa y estructura en bloques subangulares moderadamente desarrollada [9].

6.3.1. Clasificación del suelo

El cuadro a continuación mostrara los perfiles de la zona de estudio y su clasificación de acuerdo al tipo del suelo.

Tabla 14 Grupos de suelos.

PERFILES	GRUPO DE SUELOS
AC-83; CU-106	Andisoles: como suelos negros de origen volcánico que típicamente se encuentran en zonas montañosas; Los suelos andisoles permiten variedad de cultivos: caña de azúcar, tabaco, papa, té, vegetales, trigo y arroz, entre otros. Estos suelos son una fuente esencial de alimentos, además de ser sustento de valiosos ecosistemas en las cordilleras, bosques andinos y páramos, a los cuales proveen de nutrientes y les permiten regular su ciclo hídrico[38].
AC-28 ; AC-12	
AC-58; AC-59	

AC-76 ; AC-77	Entisol: son muy poco resistentes, se encuentran en diferentes climas, son generalmente arenosos presentando en sectores coberturas de gravas gruesas a medianas que quedan expuestas por la deflación de los materiales finos. Estos suelos son de baja productividad agrícola ganadera. por una baja evidencia de desarrollo pedogenético. La mayoría de estos suelos tienen un horizonte superficial claro, de poco espesor y pobre en materia orgánica[38].
CU-42 ; CU-19	Inceptisol: son aquellos suelos que están empezando a mostrar el desarrollo de los horizontes puesto que los suelos son bastante jóvenes todavía en evolución. Es por ello, que en este orden aparecerán suelos con uno o más horizontes de diagnóstico cuya génesis sea de rápida formación, con procesos de translocación de materiales o meteorización extrema. Incluye una amplia variedad de suelos. En algunas zonas los Inceptisoles son suelos con un mínimo desarrollo del perfil (aunque eso sí, más desarrollados que los Entisoles), mientras que en otras son suelos con horizontes de diagnóstico que no cumplen los requisitos exigidos para otros órdenes de suelos. Pueden presentar horizontes de diagnóstico y epipediones como los úmbricos, antrópicos, óchricos, hísticos, móllicos y plaggen. Pero sólo unos pocos tienen un epipedión móllico y los horizontes de diagnóstico más comunes son el horizonte cámbico y un fragipan, aunque también pueden aparecer horizontes cálcicos, petrocálcico o duripan[38].
CU-17 ; CU-9	Molisol: son los suelos de los ecosistemas de pastizales. Se caracterizan por un horizonte de espesor, superficie oscura. Este horizonte superficial fértil, conocido como un epipedón mólico, los resultados de la adición a largo plazo de materiales orgánicos derivados de raíces de las plantas[38].
AC-20; CU-47	

Fuente: Los Autores.

6.3.2. Geomorfología

El municipio se encuentra ubicado en una región quebrada, la cual esta al oriente de la región del Valle del Magdalena, esta a su vez esta limitada al oeste por la Cordillera Central, formada por la siguientes unidades geológicas.

- **Tlab** Formación Guaduas: Complejo de arcillas rojas y areniscas de grano grueso.
- **TLc** Formación Hoyón: Conglomerados de cantos gruesos.
- **Tls** Formación de San Juan de Rioseco: Conglomerado Basal con cantos de acuarzo, Lidita y Chert alternado con lutitas violetas y areniscas.
- **TSc** Formación La Cira: Lutitas rojas, Intercalaciones de areniscas
- **T²₃** Formación Gualanday Superior : Areniscas y arcillas en la cima de conglomerados hacia la base.
- **T4** Formación de Gualanday Superior: Areniscas y arcillas en la cima y conglomerados en la base
- **T5** Formación de la Cira: complejo de arcillas alternado con areniscas

6.3.2.1. Formación Guaduas

Este aflora en el extremo Nor Oriental del Municipio, en los sectores de Buenavista y los alrededores de la escuela de la vereda La Hoya , en los límites del municipio de Quipile en una extensión de 49,9 hectáreas , con una pendiente de 30%, la formación consta de arcillolitas laminadas o no lamidas, grises claras y abigarradas, con intercalaciones de cuarzo arenitas grises, de grano medio fino y algunas capas de carbón 12, restos de hojas y fragmentos pequeños de material vegetal, carbonizados, son comunes a lo largo de la secundaria.

El límite inferior de la unidad se ubica en el techo de la capa más alta de arenitas de cuarzo, el contacto superior se trazó en el techo de la capa más alta de lodolitas, la cual hay una secuencia de arenitas. El espesor estimado para la unidad, en cortes geológicos es de 700 metros.

6.3.2.2. Formación Hoyón

Conformado por conglomerados con guijos de cuarzo, liditas y fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, intercaladas con cuarzoarenitas y limoarenitas, de color amarillo oscuro a café oscuro, su espesor es de 368 metros. Sobresaliente en la vereda Montaña en el sector Parada, relacionado con una pendiente mayor del 70% con relieve de quebrado a muy quebrado.

Esta compuesta de igual forma por arcillolitas amarillentas con delgadas y esporádicas capas de conglomerados polimicticos y arenitas no consolidadas. El espesor de este segmento es de 227 m, se caracterizan por presentar cantos de cuarzo teniendo como base roca ígnea o metamórfica, con lutitas violetas y gravas de arcillas.

6.3.2.3. Formación de San Juan de Rioseco

Está representado por la sucesión de capas de areniscas, lutitas rojas con intercalaciones de conglomerados y gravas, que se encuentran entre la formación Hoyón en la base y la formación Santa Teresa en el techo. En esta zona aflora en la parte central del municipio, la parte inferior de la formación San Juan de Rioseco, aflora aproximadamente 150 m de secuencia estratigráfica correspondiente a la parte superior, Cambras donde consta en su parte inferior y media de areniscas cuarzosas, de grano muy grueso a conglomerado de grano muy grueso, unidos por un cemento silíceo principalmente y en menor proporción calcárea y algo limonítico, en una matriz compuesta por arcilla, serícita y moscovita.

Los conglomerados están formados de cuarzo y fragmentos de chert y esquitos. Interestratificadas con esta secuencia se presentan delegadas intercalaciones de arcillolitas arenosas, rojizas y verdosas, de 0,20 m a 1 metros de espesor.

Al Norte de la quebrada la Viuda, aflora una pequeña sucesión de areniscas y conglomerados que infrayace concordante a la formación La Cira, la cual ha sido considerada como la parte superior de San Juan de Rioseco.

6.3.2.4. Formación La Cira

Se encuentra por encima del conglomerado superior de la formación Gualanday, complejo de arcillas azulosas alteradas con areniscas que contiene varios horizontes gasterópodos y lamelibranquios en capas de margas y calizas impuras. La formación de La Cira en la región estudiada aflora en una extensión 8.588,2 hectáreas, en la parte occidental, de la cabecera Municipal con direcciones norte sur, siendo una zona libre de fallas geológicas. Se compone por una sucesión de capas arcillolitas grises y verdosas que meteorizan a color violeta, con intercalaciones de areniscas cuarzosas, de matriz arcillosa, de grano fino, y de pocos metros de espesor.

Hacia la parte superior de secuencia se presenta un manto de carbón de 0.80 m que fue explotado. El espesor de la formación de La Cira, estima en 500 m con base en los cortes geológicos, las areniscas en la parte superior de esta formación.

6.3.2.5. Formación Gualanday Medio

Litológicamente está constituida por una secuencia monótona de arcillolitas rojizas a violáceas, ocasionalmente grises, verdosas, blancas, en bancos hasta de 8 m, con intercalaciones de areniscas grises verdosas, cuarzosas, grano fino a medio, localmente grano grueso, con cemento ferruginoso poco compacto y friable, en bancos hasta de 1 metro de espesor.

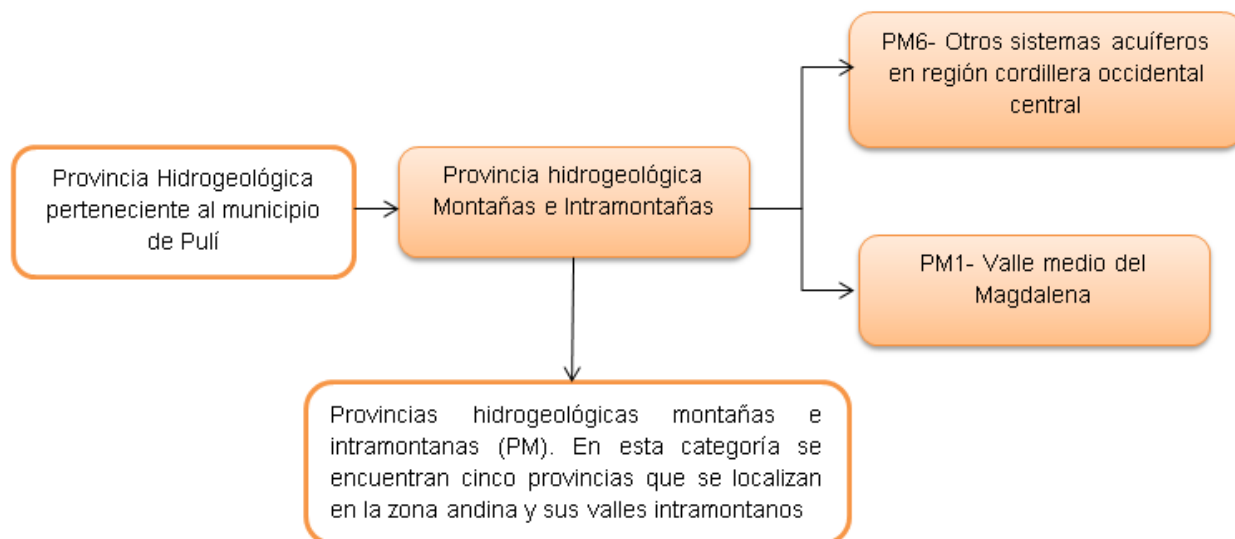
Por tratarse de una unidad predominante arcillosa, su estabilidad en general es baja a regular, lo cual se manifiesta por la presencia de abundantes depósitos de coluvios sin construir movimientos de gran magnitud. La erosión se hace manifiesta por carcavamiento.

En la parte inferior litológicamente está constituida por una alternancia de areniscas y conglomerados, las areniscas son grises verdosas, ocasionalmente grano fino, friables, poco compactas y porosas en bancos de 0.5 a 0.4 cm de diámetro, de cuarzo y rocas de diferente composición, dentro de una matriz arenosa, poco compacta, en bancos hasta de 3m de espesor.

6.3.1. Provincia hidrogeológica y Sistema de acuífero

La división de provincias hidrogeológicas son clasificadas en el estudio realizado por el IDEAM y este depende de su ubicación geográfica. La zona de estudio se encuentra en el Magdalena medio el cual está representado por la siguiente provincia.

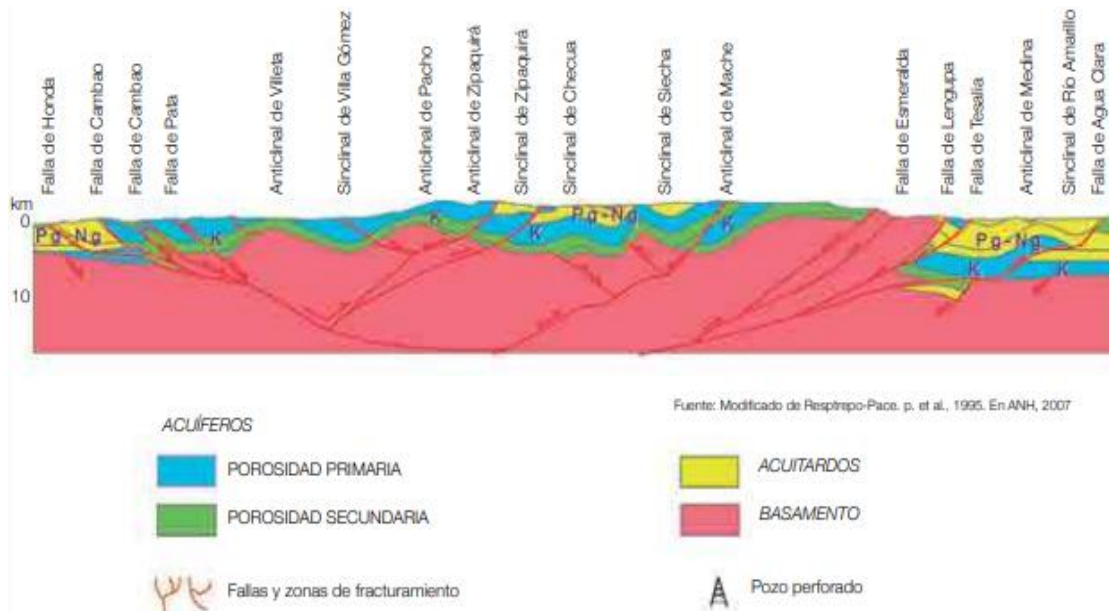
Imagen 14 Provincia hidrogeológica (clasificación del IDEAM).



Fuente: [43].

Estas provincias se localizan en la región Andina y corresponden a secuencias sedimentarias clásticas y carbonatadas de la cordillera Oriental, ambientes sedimentarios de flujos de origen volcánico y fluvial restringidos de la cordillera Central y secuencias siliciclásticas del Paleógeno- Neógeno y Cuaternario de los valles del río Magdalena y Cauca [43]. Se reconocen cuatro Provincias Hidrogeológicas Montañas e Intramontañas: Cordillera Oriental, Valle Superior del Magdalena, Valle Medio del Magdalena y Cauca-Patía. Las cordilleras Central y Occidental constituyen acuífugas por su naturaleza ígneo metamórfica que no permiten la recarga directa intersticial pero que por porosidades secundaria permite paso de agua de precipitación del ciclo hidrológico actual a través de fracturas [43].

Imagen 15 Corte hidrogeológico básico.



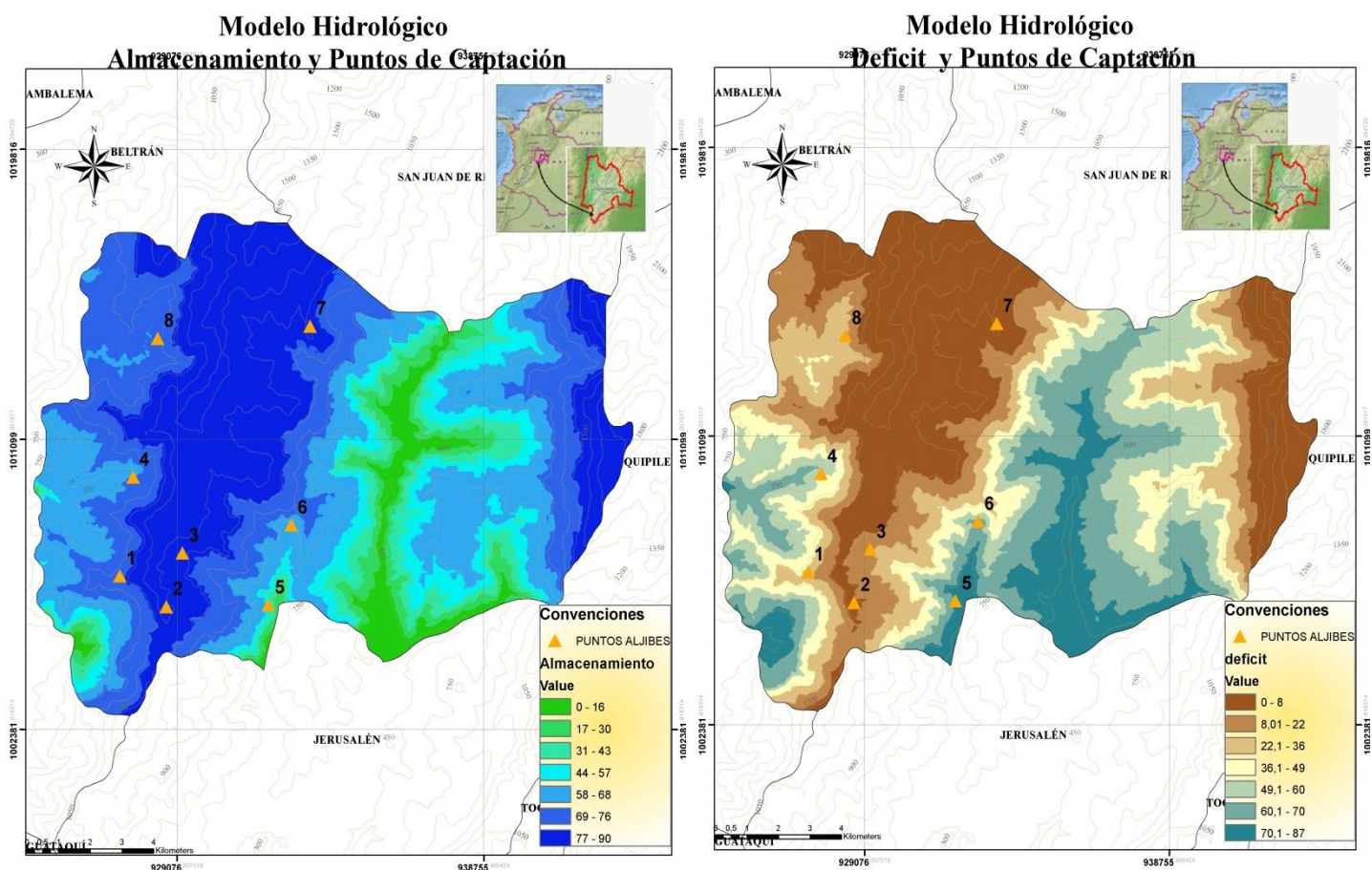
Fuente: [43].

Este sistema andino, en general, se caracteriza por corresponder con la mayor extensión de bloques levantados, fallados y con un control estructural notorio del drenaje, integra macizos antiguos de origen tectónico, hoy planas, conocidas como altiplanos y formar grandes disecciones en la parte alta de las cordilleras como resultado de la ramificación de las cuencas hidrográficas[40]. Esta provincia forma parte del Área Hidrográfica Magdalena-Cauca y abarca zonas con disponibilidad de agua deficitaria en las cuencas de los ríos Catatumbo y la parte baja y media del río Chicamocha[40]. Contribuye a la cuenca del Magdalena con sus afluentes Blanco, Villeta, Bogotá, Negro, Opón, Carare, Sogamoso y Suárez, entre otros.

7. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS; HIDROLOGICO, HIDRODINAMICO Y GEOLOGICO.

El modelo hidrogeológico conceptual integra los sub-modelos del esquema realizado (Imagen 3), para así unificar variables y del por qué se relacionan entre ellas, logrando generar mapas temáticos que cumplan con las gestión del recurso hídrico y el aporte al conocimiento del agua subterránea en la zona de estudio.

Imagen 16 Distribución del Balance Hídrico y los puntos de Captación del Municipio de Pulí, Cundinamarca.



Fuente: Elaboración propia.

En la imagen 16 se aprecia dos variables del balance hídrico (Almacenamiento y Déficit) los cuales concuerdan con la ubicación de los aljibes (zonas de recarga), es decir, según los resultados del modelo hidrológico, el almacenamiento (color azul rey oscuro, imagen

de la izquierda) representa el depósito de las zonas de recarga del acuífero, en donde posiblemente estará la mayor infiltración que proviene de la precipitación; los colores más verdes representan las zonas en donde el almacenamiento del suelo es igual a cero, qué, si se compara con la imagen de la derecha concuerda con el déficit vs almacenamiento. Si la reserva o almacenamiento es igual a cero el déficit será mayor ya que el agua que cae deberá distribuirse en todo el ciclo hidrológico (evaporación, escorrentía, infiltración) y las pérdidas en el almacenamiento serán mucho mayores.

Donde no hay déficit en el mapa del lado derecho hay una reserva o almacenamiento en el mapa del lado izquierdo. Donde se encuentra la reserva de agua en el mapa, representa el afloramiento de agua por estos aljibes.

La ubicación de los aljibes también nos arroja información, tal y como es; los aljibes de mayor importancia para el municipio son; 1. Lomalarga, 2.El tabor y 3. Talipa, los cuales están más próximos al área urbana según la imagen 5. Estos aljibes son los que más cobertura de usuarios tiene el municipio; Talipa cubre a 400 usuarios, Lomalarga de 32 a 48 usuarios y el Tabor de 28 a 35 usuarios, puede estar también relacionado a su ubicación y en la zona donde se encuentra estos aljibes, hay un gran potencial de extracción del agua subterránea diseñando pozos artesianos que ayudaran a completar en modelo, dando un estudio más completo del municipio.

- Los mapas a continuación representan al modelo hidroquímico y geológico , ya que muchos de los parámetros medidos en campo dicen o determinan el depósito de roca que lo contenía, por lo anterior, se toma como guía tres variables (alcalinidad, conductividad y dureza) , estas en su mayoría simbolizan rocas carbonatadas, areniscas, arcillas y arenas [45]. El agua y los valores obtenidos nos da la idea, que en mayoría de puntos de captación se encuentra esta clase de rocas, traduciéndose también como la capacidad de algunos materiales geológicos de almacenar y transmitir agua dependiendo de su porosidad, entre más poroso sea el suelo, habrá mayor cantidad de reserva de agua subterránea. Según el estudio realizado por el IDEAM y la clasificación de la porosidad en el tipo de roca es el siguiente:

Tabla 14 Valores de porosidad de rocas y sedimento.

Valores de porosidad (Freeze and Cherry, 1979)	
Materiales	n (%)
Depósitos no consolidados	
Gravas	25-40
Arenas	25-50
Limos	35-50
Arcillas	40-70
Rocas	
Basalto fracturado	5-50
Calizas Kársticas	5-50
Areniscas	5-30
Caliza dolomita	0-20
Pizarra	0-10
Rocas cristalinas fracturadas	0-10
Rocas cristalinas compactas	0-5

Fuente [45].

Según las imagen 13 y la litología, los suelos que cubren las zonas o lugares en donde se encuentran los aljibes son Rocas clásticas, rocas arenosas, grava y arena, arcillas y arenas, que en porcentaje representaría un nivel de porosidad de un mínimo de 5% a un 50%.

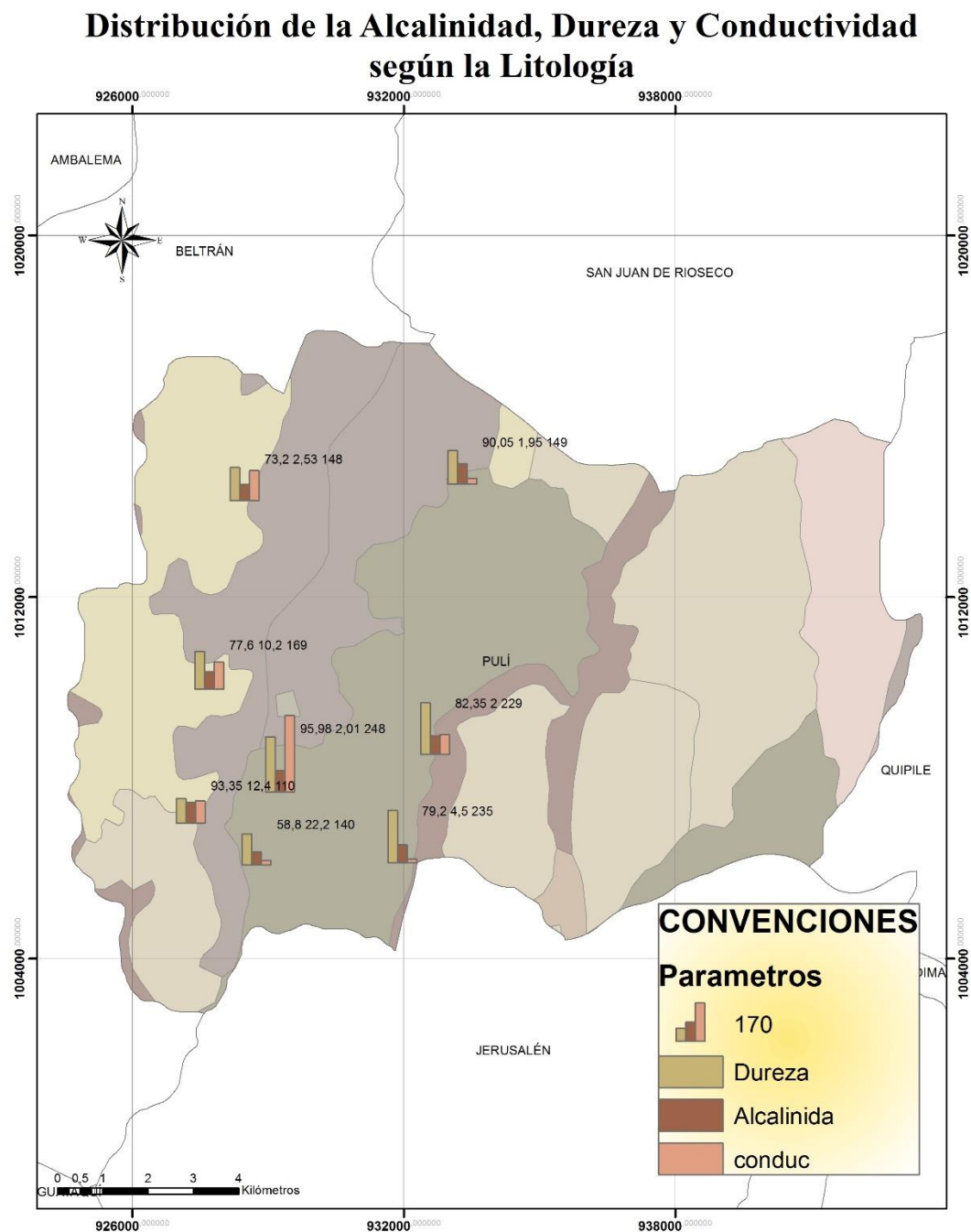
El tipo de suelo también determina la posibilidad de un acuífero, en este caso; acuífero de regular a bueno y muy excelente, esto a futuro se podría validar con las pruebas geotécnicas de la zona de estudio.

Tabla 15Valores de Transítividad de rocas y sedimentos.

Clasificación de terrenos por su transmisividad (m³/día)					
(Adaptado de Custodio y Llamas, 1983)					
T	1		10	10²	
Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales			Arena fina.	Arena limpia.	
	Arcilla compacta.	Limo arenoso.	Arena limosa.	Grava y arena.	Grava limpia
	Pizarra.	Limo.	Caliza poco	Arena fina.	Dolomías, calizas
	Granito.	Arcilla limosa.	Fracturada.	Caliza	Muy fracturadas.
			Basaltos.	Fracturada.	

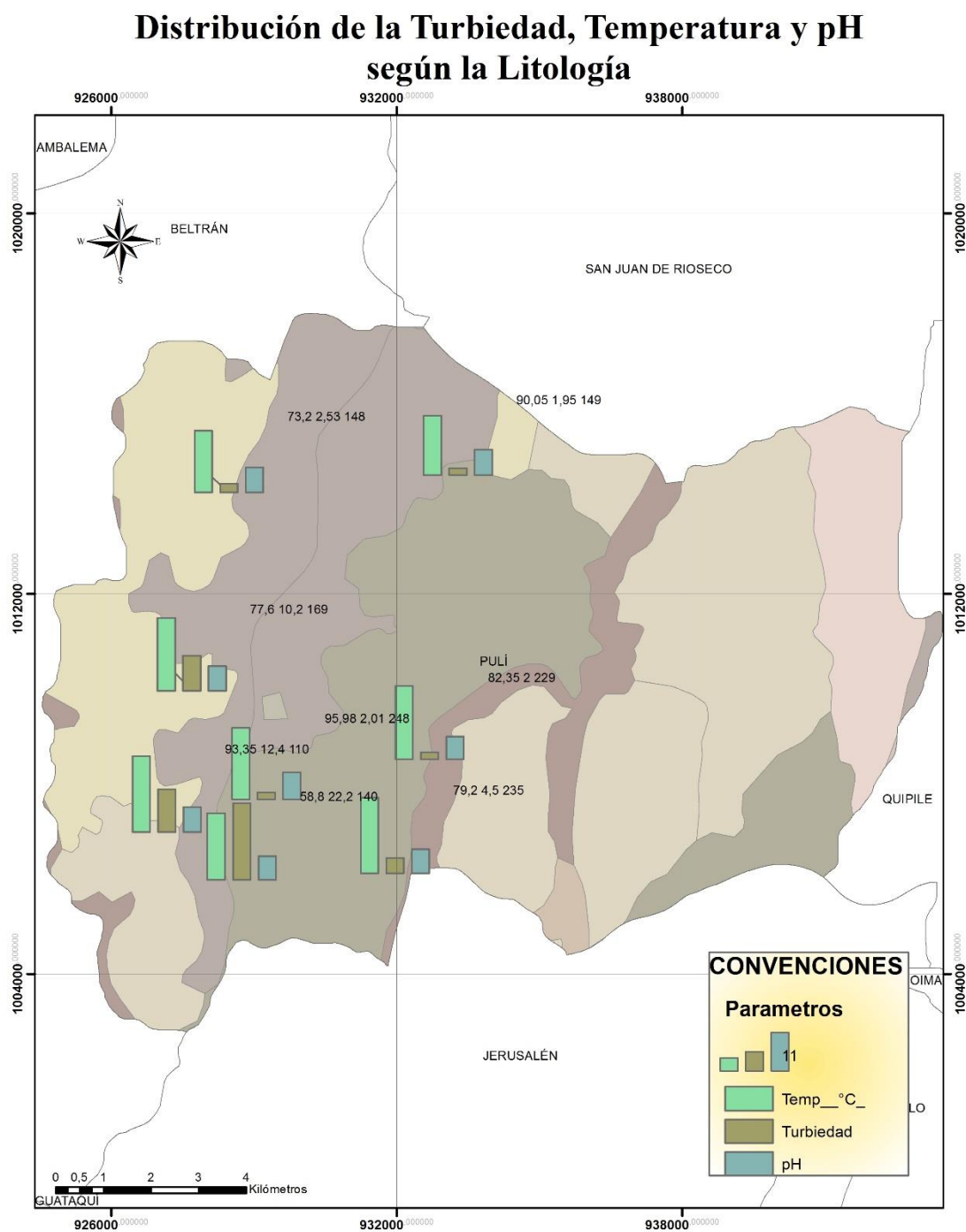
Fuente [45].

Imagen 17 Distribución de la alcalinidad, dureza y conductividad según los resultados de la evaluación de la calidad del agua en los aljibes y su interacción con el tipo de roca.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 18 Distribución de la turbiedad, temperatura y pH, según los resultados de la evaluación de la calidad del agua en los aljibes y su interacción con el tipo de roca.



Fuente: Elaboración Propia.

Las concentraciones en los parámetros medidos en campo según la resolución 2115/07 cumplen. El estudio de los aljibes da un aporte al municipio para conocer el estado actual de sus fuentes de abastecimiento, sin embargo es necesario el monitoreo de estas fuentes, garantizando la calidad ambiental, la salud humana, el estudio de la roca que lo contiene y su comportamiento de flujo a nivel subterráneo.

8. CONCLUSIONES

El modelo hidrogeológico permitió conocer su estructura y sus variables más representativas, siendo una herramienta de gran utilidad para la gestión del recurso y ayuda a la comprensión del estado actual del agua en el municipio. La construcción del modelo base reflejó la carencia en cuanto al estudio del agua subterránea en esta zona, no hay suficiente investigación relacionada, complicando el desarrollo de un modelo conceptual completo, por lo tanto, el trabajo realizado en este proyecto ayudara a la toma de decisiones en cuanto al manejo de la problemática del recurso hídrico por parte de entidades municipales y gubernamentales. El modelo tiene lo necesario para dar alternativas que atribuyan al conocimiento del acuífero y sus componentes.

Se logró establecer algunas de las variables que componen la hidrogeología del acuífero unitario, en algunos casos se dificultó el desarrollo de estas debido a costos y problemas técnicos como lo fueron las pruebas de bombeo, que dan a conocer las características del acuífero y su relación directa con el agua superficial, subterránea y sus componentes minerales.

Se identificó los puntos de captación y se evaluó la calidad del agua en base al modelo hidrogeológico conceptual del IDEAM [8]. Se hizo un inventario de puntos de agua con usos, coordenadas, mapas de localización, evaluación de la calidad del agua, entre otros, de los cuales, esta información no se encontraba en el municipio, dando un aporte al Plan de Desarrollo del municipio para evaluar el saneamiento básico como herramienta de control y gestión sobre el recurso hídrico, fortaleciendo el panorama en términos de modelos hidrogeológicos conceptuales que se hayan desarrollado en el territorio, para de esta manera utilizarlo como base para otros proyectos relacionados con el tema.

Se analizó y desarrollo la cartográfica temática base (mapas de almacenamiento, reserva, excesos, temperatura, precipitación, litología y tipos de suelo), como apoyo a la gestión hidrogeológica, mostrando las zonas de recarga y descarga para así poder ser explotado mediante la construcción y operación de pozos de extracción y garantizar la prestación de servicio de abastecimiento continuo a la población.

Este proyecto permitió entender que seguir estudiando el acuífero hace una alternativa al problema presentado por la carencia de una fuente fija o alterna para el abastecimiento permanente del municipio y no presentar desabastecimiento.

9. RECOMENDACIONES

Cada modelo representa un área de estudio en específico; el geológico, hidrológico, hidrodinámico e hidráulico y estos a su vez componen al modelo hidrogeológico conceptual, el cual busca conocer el comportamiento del agua subterránea en una zona de estudio, por lo tanto, las recomendaciones que se dan a continuación son aquellos faltantes que durante el desarrollo del proyecto pudieron aportar al estudio y hacer de este, una solución asertiva de la problemática a la escases del recurso y sus posibles afectaciones a futuro.

Para próximos estudios relacionados a este se sugiere realizar la comprensión de la dinámica de las aguas subterráneas mediante los estudios hidroquímicos, los cuales implican medición de todos los parámetros físico-químicos e isotópicos, que por cuestión de costos y accesibilidad no se pudieron llevar a cabo. Realizar replicas en los muestreos con el fin de obtener mayor cantidad de datos y así establecer una correlación estadística entre las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua y así evitar riesgos a la salud en la población del municipio, realizar estos muestreos en diferentes épocas del año para así establecer los posibles factores que tienen influencia sobre la calidad del agua; por ejemplo llevar a cabo muestreos de calidad teniendo en cuenta los periodos de sequía, periodos de crecimiento por altas precipitaciones o alteraciones por actividades cercanos a estos y así establecer la composición del agua y la relación directa que este tiene con la roca (mineralización).

Para definir la composición de los suelos y del sistema acuífero con mayor detalle, se recomienda realizar la prueba geoelectrica para la prospección del agua en la zona, dando relevancia a los puntos de extracción. Son necesarias estas pruebas ya que ubica reservorios de agua subterránea con características apropiadas para una posterior explotación y aprovechamiento.

Profundizar en estudios geológicos para así asegurar la factibilidad de la construcción de pozos para la extracción del agua subterránea. Debido a la escasa información del municipio, hay variables del modelo que se tienen que sacar de ceros, por esto, la necesidad de mejorar y completar el modelo para futuras investigaciones.

Por último es necesario implementar de alguna forma las pruebas de bombeo, ya que estas corresponden a la hidráulica del agua subterránea, es necesario conocer las variables como (Transmisividad, coeficiente de almacenamiento y conductividad eléctrica), para que el modelo sea más completo y aporte todo lo relacionado al estudio del agua subterránea.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ONU, «Desarrollo Sostenible,» 22 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.un.org/development/desa/es/news/sustainable/water-action-decade.html>.
- [2] UNDP, «Objetivos De Desarrollo Sostenible,» Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 2012. [En línea]. Available: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>.
- [3] IDEAM, «Zonificación y codificación de cuencas hidrográficas,» Colombia, 2010.
- [4] USDA, «Technical guide to managing ground water resources,» United States Department of Agriculture, Estados Unidos, 2007.
- [5] M. V. Vélez Otálvaro y L. M. Vásquez Ariza, «Métodos para determinar la recarga en acuíferos,» Universidad Nacional , Medellín, 2010.
- [6] A. Tuinhof, S. Foster y K. Kemper, «Gestión sustentable del agua subterránea; Requerimientos del monitoreo del agua subterránea,» Banco Mundial; Grupo base del (WG.MATE)., Washington D.C., EEUU., 2002-2006.
- [7] D. Cordoba, «Metodología para el desarrollo de un modelo hidrogeológico mediante herramientas de información geográfica,» Centro de Investigación y Desarrollo en recurso Hídricos (CIDERH); Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA), Chile; España, 2007.
- [8] H. . H. Diaz, A. Arias Bernal, H. Mazo , M. V. Acosta , R. Arciniegas, W. Salguero Diaz, H. A. Cardozo , J. A. Charry, R. Prieto Jaimes, C. Florez Gonzales , H. F. Cedeño, W. J. Cardenas , M. V. Ojeda y W. Bernal Muñoz, «Esquema de Ordenamiento Territorial,» Pulí, 2000.
- [9] PSMP, «Plan de Desarrollo Municipio de Puí,» Administración Municipal, Pulí, 2016-2019.
- [10] R. Meffe y H. M.V Martínez, «Metodología para el desarrollo de un modelo hidrogeológico mediante herramientas de Información Geográfica,» Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos-CIDERH, vol. I.
- [11] IDEAM, «Modelos Hidrogeológicos Conceptuales,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>. [Último acceso: Octubre 2017].

- [12] R. Barrios y A. Correa, «ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CABECERA MUNICIPAL DE TURBACO BOLIVAR,» 2016. [En línea].
- [13] Universidad de Concepción, «Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.cfm.cl/pregrado/geofisica>. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [14] IDEAM, «Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH).,» 2014. [En línea]. Available: http://capacitacion.sirh.ideam.gov.co/homeSIRH/HOME/agua_subterranea-n3.html. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [15] M. Díaz, «Aspectos Metodológicos de la Modelación Geológica-Petrofísica Integral de Yacimientos,» Campeche., 2011.
- [16] N. O. Vargas Martínez, «Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia,» IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia, 2005.
- [17] P. Martinez Alfaro, P. Martinez Santos y S. Castaño Castaño, Fundamentos de hidrogeología., Madrid; Barcelona; Mexico: Mundi prensa, 2006.
- [18] M. V. Vélez Otálvaro y L. M. Vásquez Ariza, «Métodos para determinar recarga en acuíferos,» Universidad Nacional, Medellín, 2010.
- [19] UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA;UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – UNIVERSIDAD NACIONAL, «RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ,» Medellín.
- [20] R. Banda Noruega, R. Soledad Barranquero, M. Varni y A. Ruiz, «Aporte de la hidroquímica al modelo conceptual del sistema hídrico subterráneo. Tandil, Argentina,» Geoacta- ciudad Autonoma de Buenos Aires, vol. 37, nº 2, p. 15, 2012.
- [21] Cerón García , Pulido Bosch y Padilla Benítez, «Caracterización hidroquímica y análisis de los estados de equilibrio termodinamico en aguas termominerales de Alhama de Murcia-España,» Estudios GEOL, España, 1993.
- [22] Ministerio de la Protección Social; Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua;Decreto Número 1575, 2007.
- [23] Ministerio de la Protección Social; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Resolución 2115., 2007.
- [24] Programa para el uso eficiente y ahorro del agua; Ley 373, 1997.
- [25] Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección; Decreto 2811, 1974.
- [26] Republica de Colombia Ministerio de Agricultura; Decreto 1541., 1978.
- [27] "Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones". Decreto 155, 2004.

- [28] *Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones; Decreto 1640., 2012.*
- [29] *Resolución 815 Departamento Administrativo de Medio Ambiente., 1997.*
- [30] *"Por la cual se establecen los formatos de solicitud de trámites administrativos ambientales y los formatos que apoyan el proceso de contratación", 2003.*
- [31] HIMAT, «Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos,» Instituto Colombiano, Meteorología y Adecuación de Tierras., Bogotá, 1990.
- [32] M. Manzano Arellano, «Cálculo del balance hídrico en el suelo mediante el método de Thornthwaite,» Bogotá, 2008.
- [33] M. Luts, *Learning Python, Printed in the United States of America.: O'REOLLY, 2009.*
- [34] IDEAM, «Protocolo para el monitoreo y degüello del agua.,» Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia, 2007.
- [35] A. Gutiérrez Ayuso, «Contribución al conocimiento de los aljibes Hispanomusulmanes extremeños; Tipología de un ejemplo de arquitectura del agua,» NORBA, vol. 1, p. 27, 2000.
- [36] SENA; MINAMBIENTE, «Manual Técnico para el manejo integral de cuencas hidrográficas,» Servicio Nacional de aprendizaje, Bogotá D.C, 1997.
- [37] IDEAM, «ATLAS (IDEAM),» 1981-2010. [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- [38] J. J. Martínez, M. Araúzo y M. Valladolid, «Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del Oja-Tirón. Procesos de contaminación,» Limnetica , vol. 2, p. 26, 2007.
- [39] RAMSAR, «El manejo de las aguas subterráneas.,» 2010.
- [40] Organización de Estados Iberoamericanos, «Organización de Estados Iberoamericanos,» [En línea]. Available: <http://www.oei.es/historico/salactsi/osorio2.htm>. [Último acceso: Noviembre. 2017].
- [41] IDEAM; MINAMBIENTE, «Estudio Nacional del Agua,» 2014. [En línea]. Available: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf. [Último acceso: 03 03 2019].
- [42] SciELO, «Definición of groundwater recharge and discharge zones through surface indicators: Centre- South of the Mesa Central, Mexico,» 17 Marzo 2012. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-

46112013000200003. [Último acceso: Marzo 2019].

[43] UNESCO, «La UNESCO y los Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 2017. [En línea]. Available: <https://es.unesco.org/>. [Último acceso: 16 Marzo 2019].

[44] EOT, « Esquema de Ordenamiento Territorial, » 2000.

[45] M. IDEAM y S. D. d. ambiente, Aguas Subterráneas en Colombia una Visión General, Bogotá D.C: Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, junio de 2013, Bogotá D. C., Colombia.

[46] M. Montaner y E. Sánchez, «Aproximación, por el Metodo de Thornthwaite, al calculo de infiltración de lluvia util.,» Departamento de Geografía Universidad de Murcia, España , 1998.

[47] M. E. Zabala, P. Weinzettel y M. Varni, «Utilización de ensayos de pulso para la estimación de la conductividad hidráulica en la cuenca del arroyo del azul, provincia de buenos aires, argentina,» de *VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Asunción, 2006.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA	FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL	
	ENTREGA DEL PROYECTO	Pág. 82 de 83

