

**Estudio del Recurso Hídrico Subterráneo en la Zona Sur Occidental del Municipio de los
Santos, Santander**

Andrés Santiago Arguello Diaz

Nicolás Becerra Figueredo

Lizeth Yanide Herrera Torres

Fernando Prada Avellaneda

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

Director:

Juan Diego Colegial Gutiérrez

PhD. En Ingeniería Geológica

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Geología**

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por habernos acompañado y guiado a lo largo de nuestra carrera, a nuestros padres y familiares por brindarnos un apoyo incondicional, por habernos dado la posibilidad de tener una excelente educación. A nuestros compañeros: Álvaro Osma, Ángel González y Sebastián Tarazona por su apoyo brindado en los campos realizados. Al señor Idinael Espinosa por su apoyo brindado en el municipio de Los Santos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo General	21
1.2 Objetivos Específicos	21
2. Metodología	23
2.1 Metodología mapa geológico	25
2.2 Metodología columna estratigráfica 1:200	26
2.3 Metodología para el análisis de cuencas	27
2.4 Metodología mapa de predisposición geológica para percolación de agua	28
2.4.1 Información primaria	28
2.4.2 Mapas derivados	29
2.4.3 Procesos SIG	29
2.4.4 Mapa de factores	29
2.4.5 Reclasificación de clases	29
2.4.6 Álgebra de mapas	29
3. Marco Referencial	31
3.1 Geomorfología	31
3.2 Geología Regional y Estratigrafía	34
3.2.1 Formación Los Santos	35
3.2.2 Formación Rosablanca	36
3.2.3 Formación Paja	37

3.2.4 Formación Tablazo.....	38
3.3 Marco Tectónico Regional.....	40
3.4 Geología Estructural.....	42
3.4.1 Sistemas de Fallas Presentes en el Municipio de Los Santos.	42
3.5 Cuenca de drenaje e Hidrología.....	44
3.5.1 Caracterización morfométrica.....	46
3.5.2 Análisis de Cuenca.....	47
3.5.2.1 <i>Parámetros de forma</i> (Unidades en Km ²).....	49
3.5.2.2 <i>Parámetros de drenaje</i>	51
3.5.2.3 <i>Parámetros de relieve</i>	53
3.5.2.4 <i>Curvas hipsométricas</i>	54
3.6 Análisis de precipitación.....	59
3.7 Áreas de recarga.....	64
4. Resultados.....	65
4.1 Columna estratigráfica 1:200.....	65
4.2 Factor Geología.....	68
4.3 Factor Pendiente.....	70
4.4 Densidad de drenaje.....	71
4.5 Densidad de lineamientos.....	72
4.6 Mapa de la predisposición geológica para percolación de agua.....	73
5. Conclusiones.....	75
6. Recomendaciones.....	77
Referencias Bibliográficas.....	78

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Rangos y valores asignados a los diferentes mapas de factores del mapa de predisposición para percolación de agua.....	30
Tabla 2. Clasificación de parámetros de forma.....	49
Tabla 3. Relación compacidad Vs. Forma.....	50
Tabla 4. Clasificación de parámetros de drenaje.....	51
Tabla 5. Clasificación de los tipos de cauces.	52
Tabla 6. Clasificación de parámetros de relieve.	53
Tabla 7. Clasificación de tipos de relieve.....	54

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Mapa de verdas de Los Santos.....	19
<i>Figura 2.</i> Metodología utilizada en el estudio.....	23
<i>Figura 3.</i> Mapa de estaciones y control geológico en el área de estudio.	25
<i>Figura 4.</i> Metodología utilizada para el mapa geológico.	26
<i>Figura 5.</i> Metodología utilizada para el análisis de microcuencas y obtención de parámetros morfométricos.	27
<i>Figura 6.</i> Metodología del mapa de predisposición geológica para la percolación de agua	28
<i>Figura 7.</i> Mapa de pendientes del Sur Occidente del municipio de Los Santos.	33
<i>Figura 8.</i> Columna estratigráfica a escala 1:200 de la formación Rosablanca.	37
<i>Figura 9.</i> Mapa Geológico del sur occidente de Los Santos, Escala 1: 10000.....	39
<i>Figura 10.</i> Corte geológico en dirección SW-NE	39
<i>Figura 11.</i> Esquema tectónico del departamento de Santander.....	41
<i>Figura 12.</i> Mapa de fallas del sur occidente del municipio de Los Santos	44
<i>Figura 13.</i> Mapa de drenajes del sur occidente de Los Santos.....	45
<i>Figura 14.</i> Mapa de orden de drenajes.	46
<i>Figura 15.</i> Mapa de microcuencas del sur occidente de Los Santos.....	47
<i>Figura 16.</i> Curva hipsométrica de la microcuenca 1.....	55
<i>Figura 17.</i> Curva hipsométrica de la microcuenca 2.....	55
<i>Figura 18.</i> Curva hipsométrica de la microcuenca 3.....	56
<i>Figura 19.</i> Curva hipsométrica de la microcuenca 4.....	56
<i>Figura 20.</i> Curva hipsométrica de la microcuenca 5.....	57

<i>Figura 21.</i> Curvas hipsométricas de la microcuenca 6.....	57
<i>Figura 22.</i> Mapa hipsométrico del Sur occidente de Los Santos.....	58
<i>Figura 23.</i> Valores anuales de precipitación en el municipio de Los Santos.....	59
<i>Figura 24.</i> Gráfica anual de precipitación 2016.....	60
<i>Figura 25.</i> Gráfica anual de precipitación 2015.....	60
<i>Figura 26.</i> Gráfica anual de precipitación 2014.....	61
<i>Figura 27.</i> Gráfica anual de precipitación 2013.....	61
<i>Figura 28.</i> Gráfica anual de precipitación 2012.....	62
<i>Figura 29.</i> Gráfica anual de precipitación 2011.....	62
<i>Figura 30.</i> Columna estratigráfica de la Formación Rosablanca a escala 1:200.....	67
<i>Figura 31.</i> Mapa factor geología.....	69
<i>Figura 32.</i> Mapa Factor Pendiente.....	70
<i>Figura 33.</i> Mapa Factor Densidad de drenajes.....	71
<i>Figura 34.</i> Mapa Factor Densidad de Lineamientos.....	73
<i>Figura 35.</i> Mapa de la predisposición geológica para percolación de agua.....	74

Resumen

Título: Estudio del Recurso Hídrico Subterráneo en la Zona Sur Occidental del Municipio de Los Santos, Santander*

Autores: Andrés Santiago Arguello Díaz, Nicolás Becerra Figueredo, Lizeth Yanide Herrera Torres, Fernando Prada Avellaneda**

Palabras Clave: Hidrogeología, Hidrología, Déficit, Agua, Percolación, Rocas Sedimentarias, Los Santos, Santander, Colombia.

Descripción:

El propósito de este estudio es generar información útil para dar posibles soluciones al problema de déficit de agua que se presenta en la zona. Este está enfocado en el análisis del recurso hídrico y a obtención de las zonas más favorables para la acumulación de aguas subterráneas en el subsuelo. El estudio se realizó al sur occidente del municipio de Los Santos en el departamento de Santander, el cual se extendió a lo largo de 50 km² aproximadamente. A partir de estudios de geomorfología, estratigrafía, geología estructural e hidrología, se generó una columna estratigráfica a escala 1:200, donde se describe la estratigrafía de la Formación Rosablanca en la vereda Regadero Bajo. También se elaboró un mapa geológico a escala 1:10000, donde se representan rocas sedimentarias de las formaciones del Cretácico Inferior y se muestra un estudio de microcuencas, donde se hallaron parámetros de forma, drenaje y relieve. Finalmente, se muestra un mapa de predisposición para la percolación de agua generado mediante un sistema de información geográfico.

Con base en los estudios realizados se puede concluir que la zona de estudio en general manifiesta poca de predisposición para percolación de agua, ya que es una zona semiárida y además es una zona de poca precipitación. Sin embargo, la Formación Rosablanca aflorante en la zona presenta gran extensión y, además, también evidencia porosidad secundaria debido al intenso diaclasamiento y carstificación. Por lo cual, en este estudio se sugiere como una formación con posible predisposición para la percolación de agua.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, PhD. En Ingeniería Geológica.

Abstract

Title: Study of the Groundwater Resource in South Western Zone of Los Santos, Santander *

Authors: Andrés Santiago Arguello Díaz, Nicolás Becerra Figueredo, Lizeth Yanide Herrera Torres, Fernando Prada Avellaneda**

Keywords: Hydrogeology, Pluviometric deficit, Percolation, Sedimentary rocks, Los Santos, Santander, Colombia.

Description:

The main goal of this study is to build useful data for finding possible solutions to water shortage in the study zone. This is focused in water resources analysis and the delimitation of the most favourable zones to groundwater accumulation. The study was realized in southwestern of the town named Los Santos-Santander, which was extended for more than 50km². With base in geomorphologic, stratigraphic, geologic, structural and hydrologic studies it was elaborated a stratigraphic column scale 1:200, that was described the stratigraphy of the Rosablanca Formation in the Vereda Regadero Bajo. A geologic map scale 1:10.000 was generated as well, which was showed sedimentary rocks of formations from Early Cretaceous and a microbasins study, that were found shape, drainage and relief parameters. Finally, this study show a potential percolation water map, which was built using a geographical information system.

The findings revealed that the zone study has a poor hydrogeological potential due to the region is localized in a semiarid zone and this is a poor precipitation area as well. However, Rosablanca formation show a wide extension in the study zone and this present good secondary porosity due to high fractured and karstificated rock. For that reason, this study suggests the Rosablanca formation how a section with potential percolation water.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, PhD. En Ingeniería Geológica.

Introducción

En la región de mesas y cuevas de la Cordillera Oriental, en la parte central del departamento de Santander, se encuentra La Mesa de Los Santos conformada por las formaciones estratigráficas Tablazo, Paja, Rosablanca, y Los Santos, lo que hace que su situación hidrogeológica varíe según la distribución de estas formaciones tanto en la superficie como en el subsuelo.

La zona de estudio está ubicada hacia el suroccidente del municipio de Los Santos (figura 1), cubriendo un área aproximada de 50 km² y abarcando las veredas Garbazal, Téz, Paso de Chico, Laguna, La Loma, Diamante, El Pozo y los sectores de Regadero Alto y Bajo, su superficie es de relieve de colinas bajas con inclinación de 5° a 20° hacia el SW, está limitada por escarpes abruptos correspondientes a los cañones de los ríos Chicamocha, Suarez y Sogamoso. En esta es persistente el problema de escasez de agua, además, no hay conocimiento respecto a potenciales fuentes de agua en la zona, lo cual corresponde a una posibilidad de introducir conocimiento útil sobre la predisposición para percolación de agua en regiones con carencia de agua, sin embargo, esta situación se agrava en zonas donde el clima y su configuración geológica no propician la provisión del recurso, siendo de vital importancia para las comunidades conocer los potenciales acuíferos y tratarlos para el adecuado manejo del recurso hídrico.

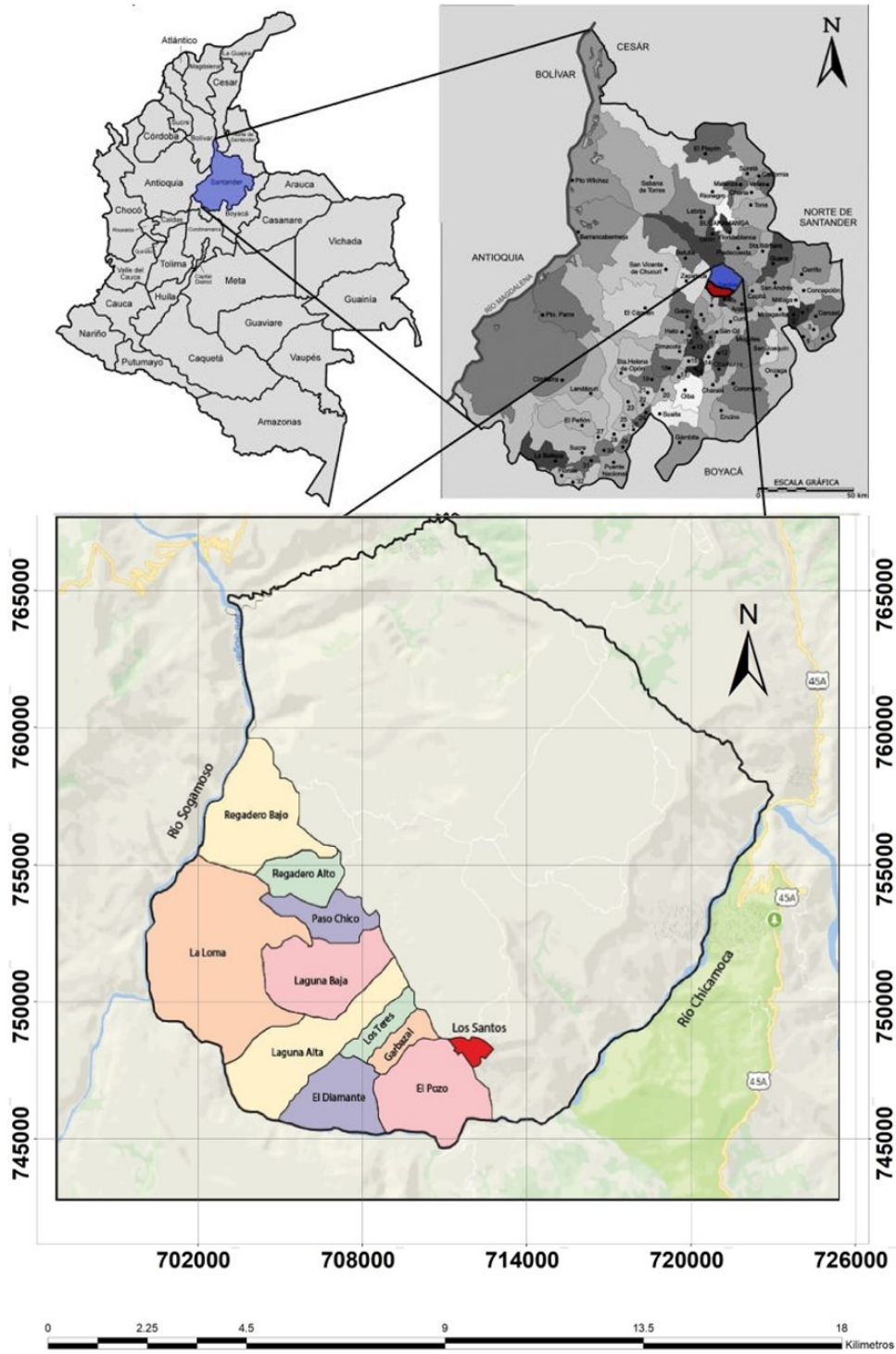


Figura 1. Mapa de veredas de Los Santos en la zona de estudio. Modificado de la ANH.

En la zona previamente localizada se realizó un estudio que permitió entender la dinámica que rige la distribución del agua sobre la superficie del terreno y su influencia en la distribución de aguas subterráneas basados en el análisis de información que permitió entender la geomorfología, estratigrafía, la geología estructural, y la hidrogeología del área de estudio.

Inicialmente se recopiló la mayor cantidad de información posible, analizando y revisando los antecedentes, para posteriormente llevar a cabo una visita a campo con el fin de reconocer y delimitar la zona de estudio. Antes de llevar a cabo otras visitas a campo, para obtención y validación de datos se recopilaron los insumos necesarios para el desarrollo del estudio, para finalmente discutir los datos definitivos y presentar los resultados de la manera más clara posible.

Finalmente se presenta en el documento, con el fin de aportar en la construcción de alternativas frente las necesidades del recurso hídrico de la población ubicada en la zona sur occidental del municipio de Los Santos, un mapa de la predisposición geológica para percolación de agua, a partir de los datos obtenidos en campo y de mapas de diferentes atributos generados en ArcGis.

La conformación estructural de las formaciones geológicas con profuso desarrollo de fracturamiento hacen pensar que pueden almacenar agua; hacia la parte oriental del área existe un importante control estructural determinado por fallas normales e inversas, principalmente las Fallas Los Santos, Los Teres, Mojarras, Petrerros-Espinal, siendo la Falla Los Teres y la Falla Petrerros-Espinal la más influyentes en el lugar a estudiar.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Mejorar el conocimiento del recurso hídrico subterráneo en la zona sur occidental del municipio de Los Santos, Santander con base en la cartografía geológica, hidrogeología, estratigrafía y geología estructural.

1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar una cartografía geológica y geomorfológica a escala 1:10000 para entender la distribución espacial de las formaciones y del recurso que se encuentran en la zona de estudio. Esto incluye la litología y las estructuras geológicas.
- Definir posibles acuíferos o elementos que por su configuración geológica sean aptas para el almacenamiento de agua, mediante la realización de columnas estratigráficas a escala 1:200 para comprender de manera más detallada las formaciones de la zona de estudio.
- Realizar un estudio hidrológico general de las microcuencas existentes en el área de estudio, analizando y calculando los parámetros fundamentales de cada microcuenca tales como: área, longitud, perímetro, ancho y desnivel altitudinal; también los parámetros que definan la forma de las mismas entre los cuales se encuentran: Índice de Compacidad o de Gravelius, Factor de forma adimensional de Horton; al igual que parámetros referentes al relieve de la microcuenca: histograma de frecuencias altimétricas, altura media de la cuenca (H), pendiente media de la cuenca, pendiente media del cauce principal, perfil altimétrico del cauce principal. Los parámetros mencionados anteriormente junto con una caracterización de la red de canales (jerarquización y densidad) nos permitirán estudiar el funcionamiento de las microcuencas.

- Obtener un mapa de la predisposición geológica para percolación de agua generado en un software SIG (ArcGIS).

2. Metodología

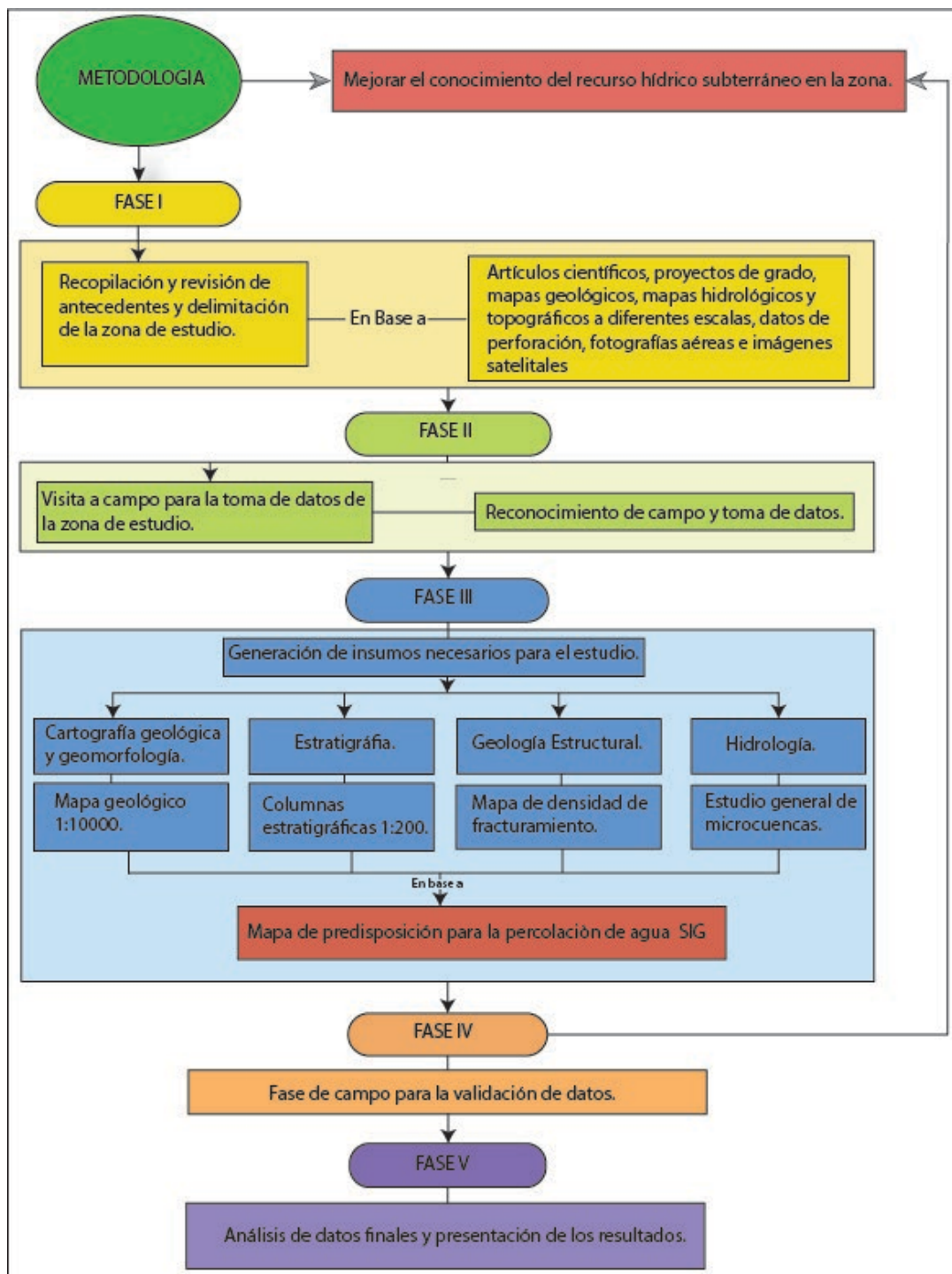


Figura 2. Metodología utilizada en el estudio. Fuente: Autores.

El presente documento se realizó en 5 fases (figura 2), en la fase 1 se recopiló toda la información de antecedentes de la zona con base en artículos científicos, proyectos de grado, fotografías aéreas, entre otras, con esta información se realizó el mapa topográfico a escala 1:10000 usando el software ArcGis a partir del modelo digital de elevaciones (DEM) tomado del satélite ALOS PALSAR (ASF DAAC 2010), el sistema de georeferencia asumido fue el WGS 1984 UTM Zona 18 N, referencia espacial correspondiente a la zona de estudio y se encuentra dentro de Projected Coordinate Systems, UTM, WGS 1984, Northern Hemisphere, Zone 18 N. procesadas en el software con la herramienta curvas de nivel a cada 50 m.

En la fase 2, fase de campo, se realizaron 4 campañas, estas están organizadas en una libreta de campo anexa al documento donde se pueden observar todas las estaciones que se hicieron para la realización e interpretación de los datos con su respectiva descripción.

En la fase de campo inicial se delimitó la zona de estudio y se identificaron las diferentes formaciones geológicas aflorantes, para esto se utilizó el mapa topográfico generado anteriormente y utilizando un GPS (Navegador) marca GARMIN (Etrex 10) se tomaron las respectivas coordenadas en datum UTM. Una vez delimitada la zona y reconociendo las veredas, se realizaron las demás campañas de campo para la toma de datos estructurales, ubicar posibles contactos geológicos y recolección de muestras.

En la fase 3 una vez organizada la información de campo se utilizó la fotointerpretación como herramienta para la identificación de lineamientos regionales, estructuras de gran tamaño, así como una visión general del terreno y análisis preliminar de la zona de estudio; en esta fase se generaron los mapas necesarios para la realización del mapa de predisposición geológica para infiltración de agua; el mapa geológico a escala 1:10000, la columna estratigráfica a escala 1:200,

el mapa de densidad de fracturamiento y el mapa de microcuencas, para ello se descargaron imágenes satelitales libres de Google Earth y Bing Maps, con el software SAS.Planet.

2.1 Metodología mapa geológico

Para la realización del mapa geológico inicialmente se ubicaron las coordenadas geográficas tomadas en campo en el servidor de Google Earth, dichas imágenes son proporcionadas por satélite Lansat/Copernicus U.S. Geological Survey y se generó un archivo KML, mostrado en la figura 3.

Estos puntos fueron importados a ArcGis usando la herramienta *Conversion Tools*, en la lista de herramientas ArcToolbox.

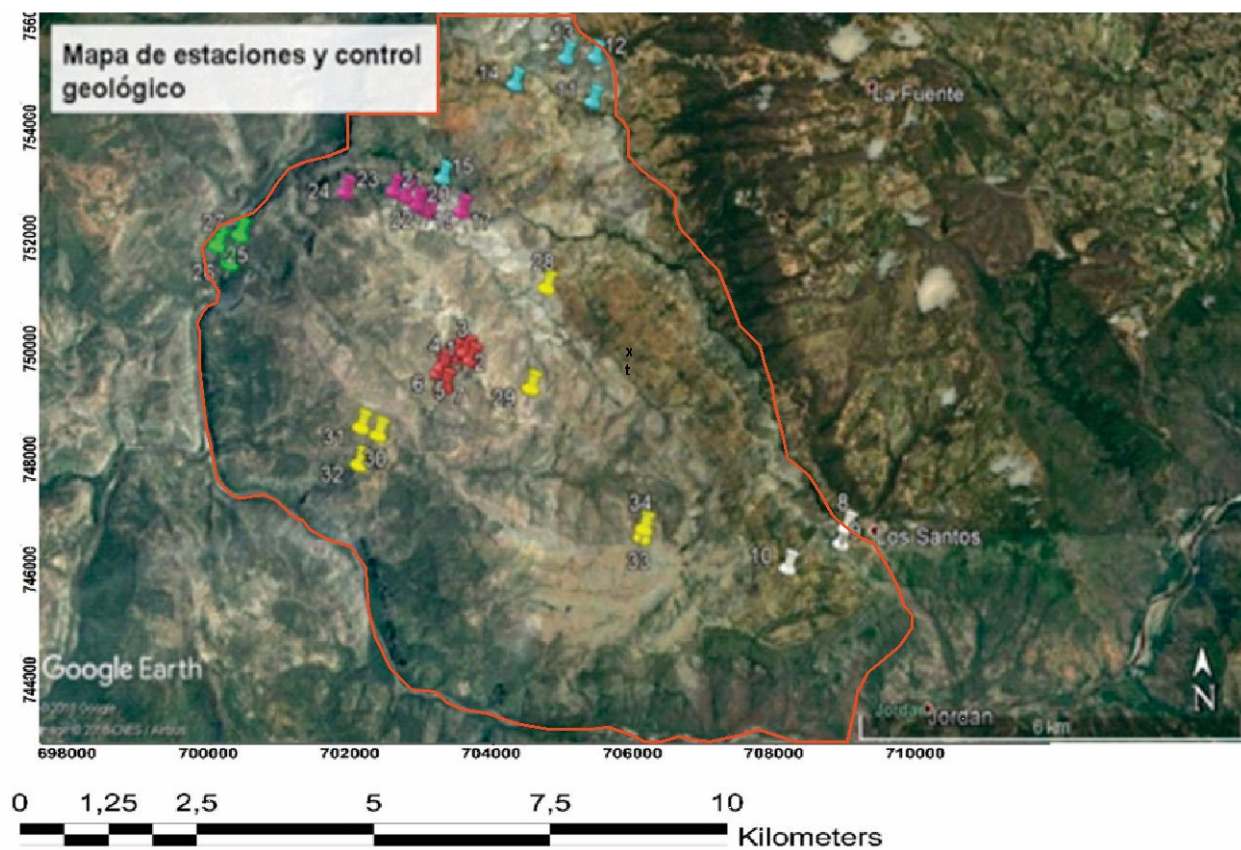


Figura 3. Mapa de estaciones y control geológico en el área de estudio. Fuente: Google Earth.

Finalmente se obtuvo un mapa geológico que delimita la distribución geográfica de cada formación, al cual se superpone el mapa de drenajes y fallas digitalizados previamente, además utilizando las herramientas del software ArcGis se agregó leyenda, grilla, convenciones y símbolos.

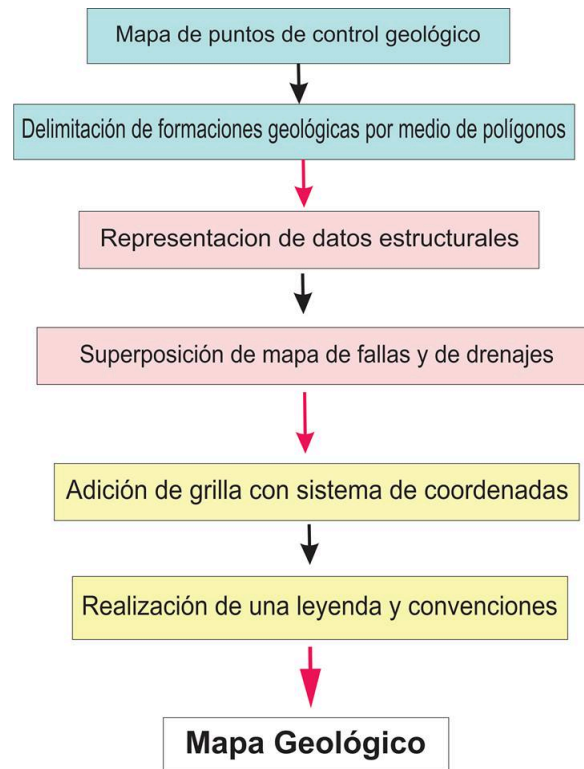


Figura 4. Metodología utilizada para el mapa geológico. Fuente: Autores.

2.2 Metodología levantamiento columna estratigráfica 1:200

Para este trabajo se levantó una columna estratigráfica a escala 1:200 de la Formación Rosablanca con aproximadamente 58 metros de espesor, en el sector de la vereda La Loma en proximidad a la vereda Regadero Bajo, con coordenadas X: 702463, Y: 751864 a 1040 m.s.n.m. La columna se realizó en una sola sesión, en el tope de la formación, a través de una quebrada hasta llegar al borde del cañón, se escogió este lugar pues las capas aflorantes muestran una buena exposición y son casi horizontales. Para medir espesores se utilizó el Bastón de Jacob de 1.5

metros, pues las capas se encuentran expuestas y se empleó el método descrito por Miall (2000). Para la representación de la columna, se utilizó el software de uso libre SedLog (Zervas et al, 2009), pues este software cuenta con lo esencial para realizar una columna.

2.3 Metodología para el análisis de cuencas

La metodología seguida para la realización del mapa de microcuencas y el análisis realizado, está representada en el siguiente diagrama de la figura 5:

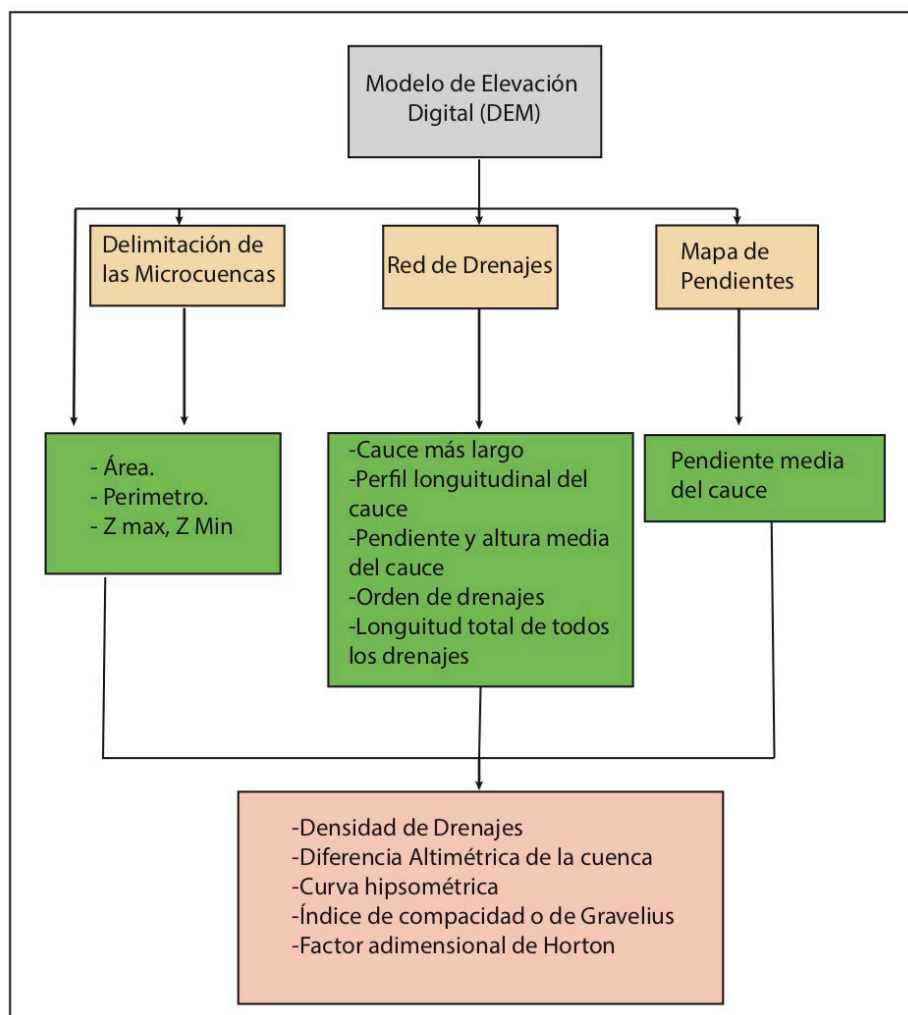


Figura 5. Metodología utilizada para el análisis de microcuencas y obtención de parámetros morfométricos. Modificado de Gaspari (2013).

2.4 Metodología mapa de predisposición geológica para percolación de agua

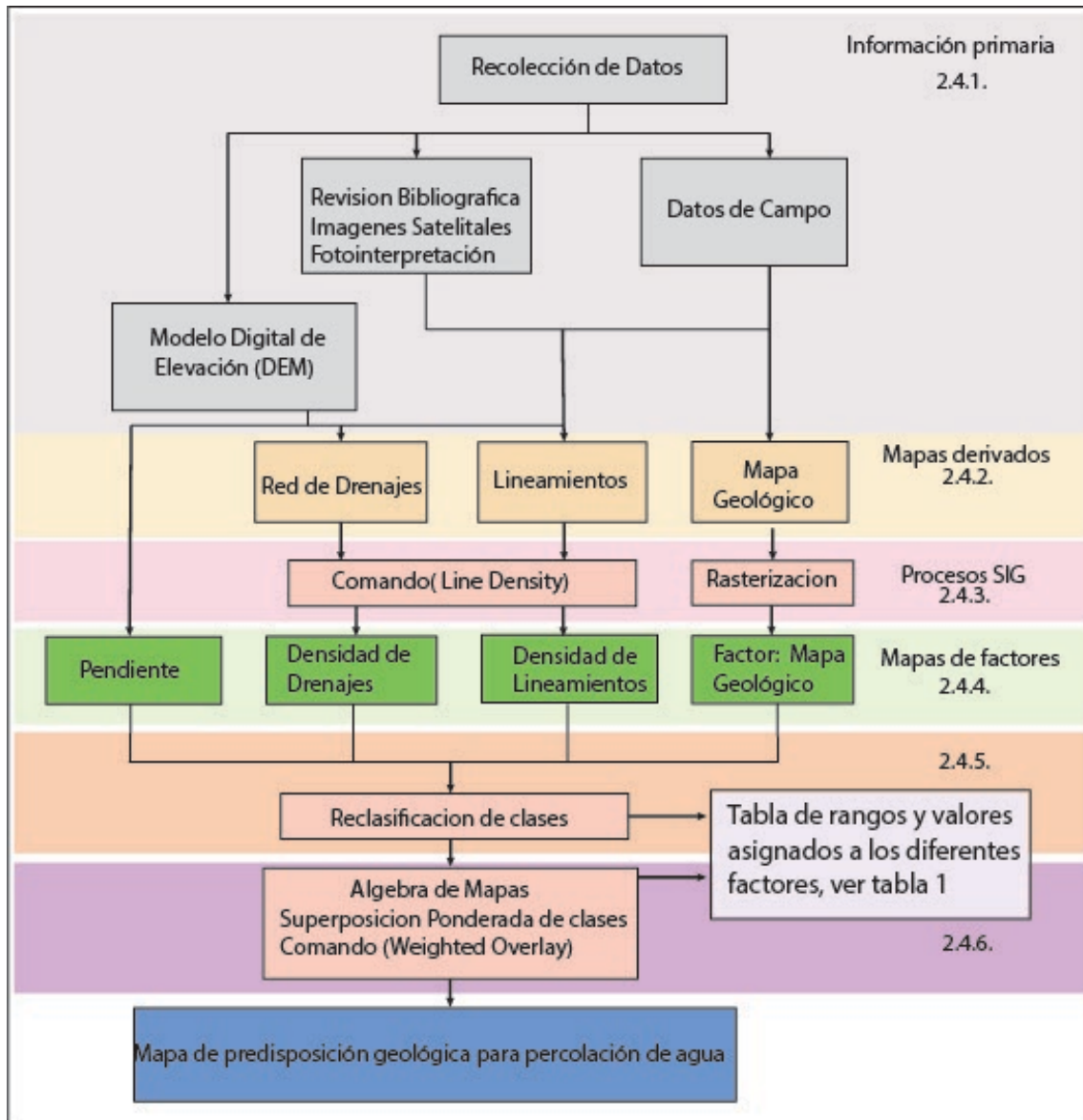


Figura 6. Metodología del mapa de predisposición geológica para la percolación de agua.

Modificado de Jamal et al., (2017).

2.4.1 Información primaria. Para elaborar el mapa de predisposición geológica para percolación de agua se hizo una recolección primaria de datos, la cual consistió de una recopilación

bibliográfica, descarga de imágenes satelitales, datos recolectados de campo y un modelo digital de elevación (DEM).

2.4.2 Mapas derivados. Los datos obtenidos en el numeral anterior fueron usados para realizar los mapas derivados de red de drenajes, lineamientos y mapa geológico, a través de un software SIG (ArcGIS).

2.4.3 Procesos SIG. Posteriormente a estos mapas se les aplicó un proceso SIG, mediante una serie de comandos para la obtención de los mapas de factores.

2.4.4 Mapa de factores. Los factores que se utilizaron fueron densidad de drenajes, densidad de lineamientos, geología y pendientes, se usaron para realizar la suma ponderada y así obtener el mapa de predisposición para la percolación de agua.

2.4.5 Reclasificación de clases. A continuación, se hizo una reclasificación a cada mapa de factor de acuerdo con sus atributos y aptitud para la percolación de agua (rango) de 1 a 5 en 5 clases, de muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto, como se muestra en la tabla 1.

2.4.6 Álgebra de mapas. Posteriormente se utilizó álgebra de mapas mediante la superposición ponderada de capas generadas en ArcGIS con el comando (Weighted overlay), este se utilizó para realizar una suma algebraica ponderada en el que se le dio valores (peso) a los mapas de factores reclasificados (geología 30%, densidad de lineamientos 35%, densidad de drenajes 20% y pendiente 15%) para un total de 100 % de acuerdo a su influencia, y valores aritméticos (Escala de Valores) entre 1-9 en incremento de 1 (donde el menos adecuado es 1 y el

más adecuado es 9) a cada clase; como resultado a este proceso se obtuvo el mapa de predisposición geológica para percolación de agua, que se presenta y explica en el enunciado 4.6.

PGIA (*Mapa de predisposición geológica para percolación de agua*):

$$\text{PGIA} = [(30) \text{ Factor Geología} + (35) \text{ Factor densidad de lineamientos} + (20) \text{ Factor densidad de drenajes} + (15) \text{ Factor Pendiente}].$$

Tabla 1.

Rangos y valores asignados a los diferentes mapas de factores del mapa de predisposición para percolación de agua. Modificado de Oikonomidis et al., (2015).

Mapa	Peso (%)	Rango	Clase	Rango Promedio	Escala de Valores
Geológico (Formación)	30	Rosablanca	Alto	24	7
		Los Santos	Moderado	18	5
		Paja, Tablazo	Muy Bajo	6	2
Densidad de Lineamientos (km²)	35	4,2 - 4,8	Muy Alto	35	9
		3,6 - 4,2	Alto	28	7
		3 - 3,6	Moderado	21	5
		1,5 - 3	Bajo	14	4
		0 - 1,5	Muy Bajo	7	2
Densidad de Drenajes (km²)	20	3,5 - 5	Muy Alto	20	9
		1,6- 2,4	Alto	16	7
		0,8 - 1,6	Moderado	12	5
		2,4 - 3,5	Bajo	8	4
		0 - 0,8	Muy Bajo	4	2
Pendientes (%)	15	0 - 7	Muy Alto	15	9
		7,0 -18	Alto	12,5	8
		18 - 30	Moderado	10	6
		30 - 45	Bajo	7,5	5
		45 - 100	Muy Bajo	5	

3. Marco Referencial.

3.1 Geomorfología

El relieve de La Mesa de los Santos, en donde se encuentra el área de estudio, puede definirse como un relieve tabular, Flórez (2003), explica la morfogénesis de geformas residuales como cerros, mesas y serranías, que se generaron como consecuencia del levantamiento de formaciones sedimentarias, no plegadas, que se encontraban en depresiones interandinas, y que actualmente están afectadas por procesos de disección. IDEAM (2000), incluyó a los relieves tabulares dentro de un geosistema denominado sedimentos epicontinentales característicos de depresiones tectónicas, y describe el clima como en aparente equilibrio bajo evapotranspiración y precipitaciones anuales, en donde los bosques ecuatoriales han desaparecido quedando pastizales que en su forma de recuperación pueden ser sustituidos por matorrales, agregando que las formas de ocupación facilitan el escurrimiento superficial y establece que la coloración rojiza debido a la meteorización evidencia un proceso de degradación que tienden a condiciones irreversibles.

Las características biofísicas condicionan la habitabilidad de una zona por grupos humanos, argumento explicado por Tricart y otros. (1968), este autor considera que el déficit hídrico está ligado a los procesos de degradación y a la susceptibilidad de los materiales a ser erodados.

La zona suroccidental de La Mesa de Los Santos se puede considerar un espacio en proceso de desertificación, cuya definición dada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (FAO-UNEP) (1984), los explica como: “un espacio que habiendo tenido una oferta ambiental que sostenía un funcionamiento ecosistémico, como lo son: el agua, los suelos, la flora, la fauna, y una ocupación por grupos humanos, se degradaron por la misma acción del hombre hasta parecerse a un desierto,

por degradación”, y es también una zona donde actualmente se realiza una importante minería a menor escala, como lo es la extracción de Yeso, de estratos tabulares, principalmente en la Formación Geológica Rosablanca.

En área de trabajo del presente estudio se pueden hallar evidencias de degradación, que fueron encontradas a lo largo de las visitas a campo y que se observan en las fotos incluidas en la libreta de campo como anexo de este documento.

Se encuentra en el piso térmico cálido que según el IDEAM 1996 se encuentra en zonas cercanas al río Suarez y Chicamocha con altitudes que van de 100 a 1000 m y temperaturas superiores a 24°C. La precipitación anual promedia en esta zona es de 957.9 mm distribuidos en dos periodos secos y dos de mayor precipitación. Los periodos de mayor precipitación se presentan de marzo a mayo y de octubre a noviembre, el más lluvioso es octubre con 125.5 mm.

“Los Santos se caracteriza por presentar una geomorfología de tipo plataforma, consiste en un gran fragmento de una plataforma primitiva única, excavada por los ríos actuales principalmente Suarez, Chicamocha y Sogamoso” (Julivert, 1958). La geomorfología actual de la zona se generó debido a un conjunto de fenómenos naturales de tipo tectónico, litológico, de estructuras geológicas y condiciones climáticas que son las encargadas de los procesos erosivos.

En términos generales la región de Los Santos se encuentra ubicada en una plataforma, un relieve plano ha ondulado, que son el resultado de procesos erosivos controlados por su litología de tipo blando.

En la vereda El Pozo, sitio de interés, presenta una geomorfología de laderas con una inclinación aproximada de 8° a 12°, el suelo presente en la zona es un suelo residual proveniente de lodolitas grises a amarillas muy fisiles, suelos saprolitos, fértiles; la quebrada La Cañada es la encargada de transportar, en épocas de lluvia, el agua a la vereda El Pozo, con un flujo de agua en

sentido Este- Oeste. En la vereda El Pozo las pendientes varían de fuertes a muy fuertes lo que ocasiona que se reduzca la cantidad de agua lluvia que podría infiltrarse en el suelo. En la vereda Regadero Alto, la geomorfología es más abrupta hacia el drenaje principal donde se realizó la columna estratigráfica, se pueden observar pequeños escalones de roca caliza sobre el drenaje que culmina como escorrentías hacia el río Sogamoso, la vegetación presente en la vereda son rastrojos bajos a medios.

En La vereda El Pozo las pendientes varían de fuertes a muy fuertes lo que ocasiona que se reduzca la cantidad de agua lluvia que podría infiltrarse.

En el estudio, el análisis geomorfológico se basó en el mapa de pendientes que se muestra en la figura 7.

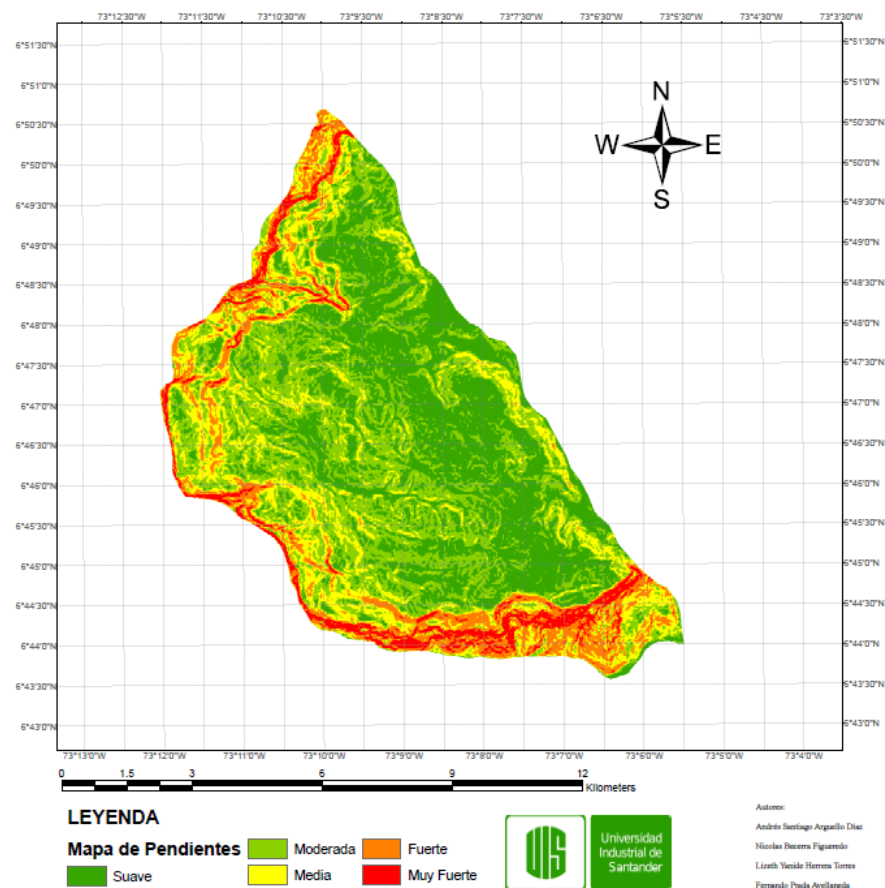


Figura 7. Mapa de pendientes del Sur Occidente del municipio de Los Santos. Fuente: Autores.

En la figura 7 se muestra el mapa de pendientes, se establecieron 5 rangos de inclinación, predominando en la mayoría de la zona relieves suaves a moderados y hacia sus límites con los ríos Sogamoso y Chicamocha se observan escarpes con inclinaciones que van de fuertes a muy fuertes.

En las áreas con mayor predisposición para percolación de agua se puede observar una gran variedad de inclinaciones. Hacia la vereda Regadero Alto las pendientes se muestran inicialmente como moderadas lo cual favorece que el agua lluvia permanezca más tiempo en su superficie, a medida que nos acercamos al escarpe esta inclinación va aumentando llegando a alcanzar pendientes muy fuertes que facilitan las escorrentías. Donde se ubica la vereda El Pozo las pendientes varían de fuertes a muy fuertes lo que ocasiona que se reduzca la cantidad de agua lluvia que podría infiltrarse en el suelo.

El análisis geomorfológico se basó en el mapa de pendientes que se mostró en la figura 7, con él se obtuvo un mapa de drenajes y cuencas fundamentales para este análisis y que junto con los parámetros de forma, relieve y drenaje se logró hacer una estimación de como influye la forma de la cuenca en el recorrido y captación de aguas lluvia.

3.2 Geología Regional y Estratigrafía

El municipio de Los Santos y sus veredas aledañas son un gran bloque sedimentario, descrita por Gómez (1969), como una planicie monoclinal con una inclinación regional suave hacia el suroeste.

Regionalmente el municipio de Los Santos pertenece a la parte norte del supraterrano de la Cordillera Oriental, según Etayo y otros (1983), dicho terreno está limitado por la Falla de Mulatos al occidente y la Falla de Bucaramanga al oriente, estas rocas pueden presentar pliegues orientados

principalmente suroccidente-nororiente, como sinclinales amplios y anticlinales estrechos y fallado.

La estratigrafía está conformada por formaciones sedimentarias del Jurásico y el Cretácico: Formación Los Santos, Formación Rosa blanca, Formación Paja y Formación Tablazo que están depositadas sobre un basamento que Julivert (1964), menciona como materiales ígneos y metamórficos del Paleozoico.

3.2.1 Formación Los Santos. Inicialmente se conocía como la Formación Tambor, nombre asignado por Morales et al (1958), para designar a un conglomerado aflorante en el cañón del río Lebrija. Posteriormente Cediel (1968), propone el término Los Santos y asigna como localidad tipo a los afloramientos que se encuentran en la vereda El Pozo, y describe dicha formación más detalladamente incluyendo su característica sucesión arenosa. Etayo y Rodríguez (1985) asignan una edad de Berriasiano para esta formación.

En el estudio realizado la formación Los Santos se encuentra ubicada en los bordes del cañón, hacia el sur limitado por el río Chicamocha al sur de la vereda El Pozo y hacia el oeste con el río Sogamoso en la vereda Regadero Bajo, donde la pendiente es mucho mayor, litológicamente se encuentra el miembro superior de la Formación Los Santos, representado en 9 m de arenisca de grano medio- grueso (cuarzo arenita) con laminación cruzada, granosoportada, color blanco verdosa, poco contenido de mica. La roca está muy fracturada, se encuentra intercalada con lodos. Laminación cruzada.

3.2.2 Formación Rosablanca. La formación Rosablanca ha sido cartografiada abarcando la región de mesas y cuevas por Julivert (1958), mientras que su estratigrafía detallada la realizó Zamarreño de Julivert (1963).

Hacia el sur occidente de La Mesa de Los Santos, zona del presente estudio, se realizó una columna estratigráfica detallada hacia la vereda de Regadero Alto donde se encontraron los siguientes niveles de techo a base:

40 m de calizas fosilíferas seguido de 10 m de un banco grueso de areniscas hacia la base y 9m de un banco de areniscas más finas hacia el techo, seguidamente se encuentra un nivel de 5 m de calizas margosas con nódulos y 4 m de calizas masivas que están intercalados con 49 m de shales y calizas marrones indicando un ambiente de depositación a poca profundidad, en la parte más basal de la formación se encuentra un nivel de 60 m de calizas seguido de dolomías grises y pequeñas capas de yeso.

Rosablanca presenta niveles enteramente calcáreos y otros arcillosos que pueden no siempre coincidir con las divisiones litoestratigráficas. Existe un importante registro fósil, en calizas grises oscuras masivas se observan bivalvos que en las calizas grises azulosas pueden estar aplastados.

Geomorfológicamente se expresa en pendientes empinadas y abruptas hacia los escarpes de las vertientes mencionadas anteriormente, también se aprecian hacia las zonas lejanas a los escarpes pendientes suaves y onduladas, geoformas de exokarst como dolinas de erosión kárstica, lapiaz y cuevas o cavernas.

En las veredas La Loma, Laguna Alta y El Diamante se presentan calizas macizas y compactas con poca densidad de diaclasamiento y con diaclasas cerradas o rellenas de carbonatos; mientras que en la vereda Regadero Alto areniscas con carbonatos y huellas fósiles contienen

diaclasas abiertas con dirección NS y alta porosidad secundaria debido a disolución de carbonatos y fósiles.

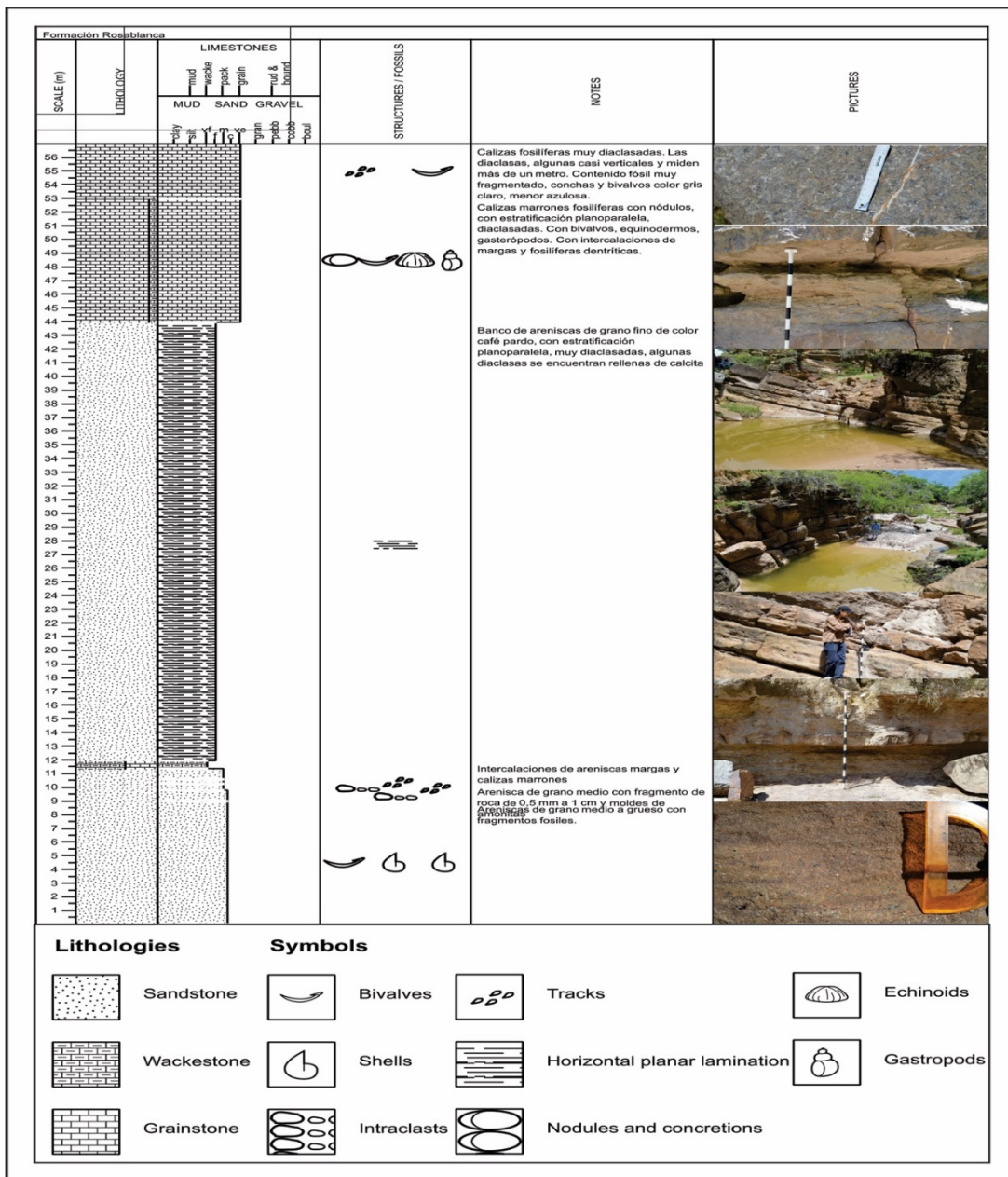


Figura 8. Columna estratigráfica a escala 1:200 de la formación Rosablanca. Fuente: Autores.

3.2.3 Formación Paja. Julivert (1958), describe una sucesión de shales negros, fosilíferos, ligeramente calcáreos y micáceos e identifica en el segmento inferior concreciones calcáreas,

septarias y venas de calcita. En Julivert (1964), se define como constituida por 300 metros de lutitas con yeso y nódulos calcáreos y algunas capas delgadas de 10 a 20 centímetros de caliza muy fina.

Se encuentra ubicada en la parte media de la zona de estudio principalmente en las veredas Laguna Alta y Baja, La Loma y parte de la vereda El Diamante y Paso Chico. Infrayace a la Formación Tablazo y suprayace la Formación Paja, esta está constituida hacia el tope principalmente de shale gris oscuro y presencia de algunas venas de calcita, seguido de un bloque de 80 m de shales grises a amarillentos con presencia de micas, los fósiles que se encuentran en la parte superior suelen ser bivalvos, ammonites, moldes de ammonites, en la zona más basal se encuentran intercalaciones de shales grises a grises amarillentos con alteraciones de areniscas grises cuarzosas.

3.2.4 Formación Tablazo. La formación Tablazo aflora en las partes más altas de la zona de estudio en las veredas Laguna Alta, Laguna Baja y La Loma, litológicamente consiste en calizas grises a negras, fosilíferas y arcillolitas negras con algunos niveles grises azulados calcáreos y también fosilíferas en capas de espesor medio a grueso que se intercalan con areniscas de grano fino a medio con coloración gris poco calcáreas de capas delgadas.

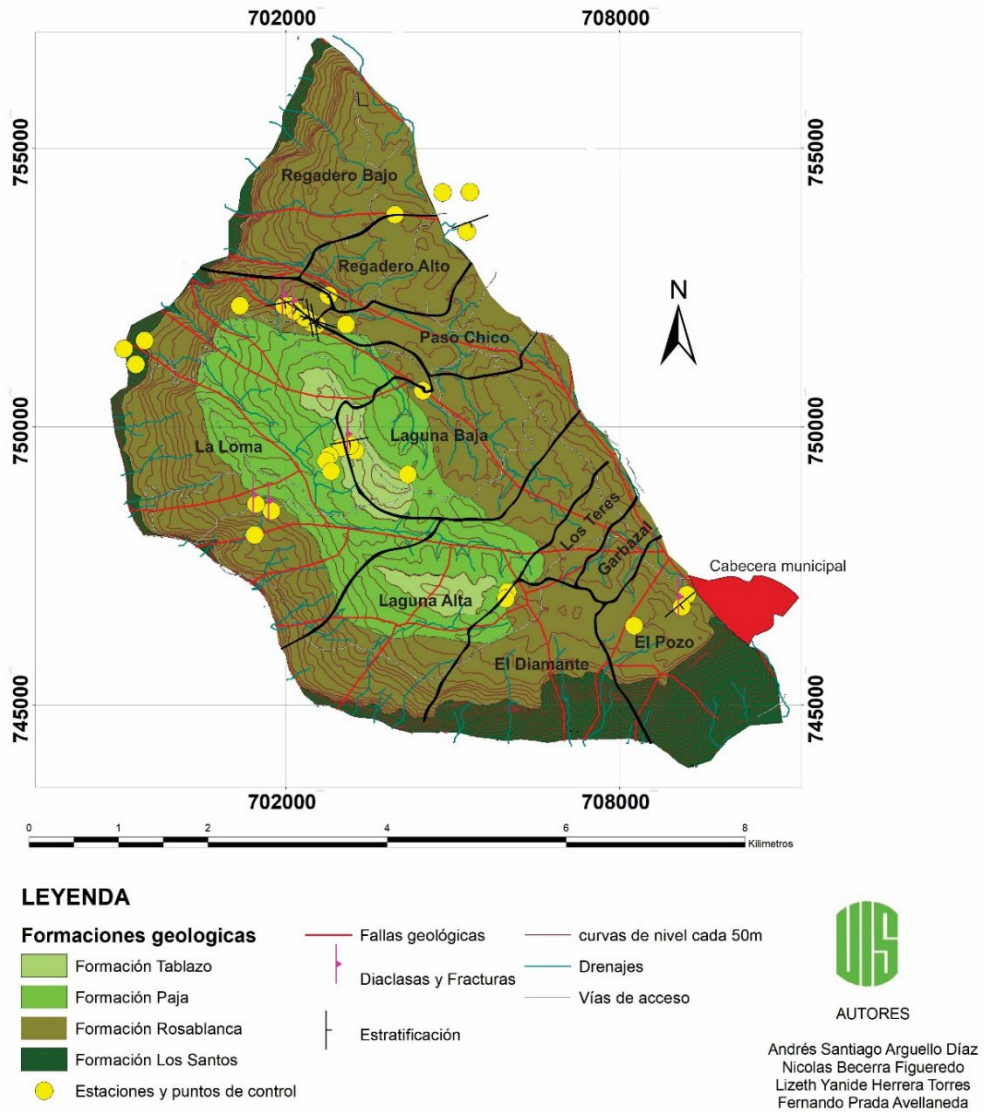


Figura 9. Mapa Geológico del sur occidente de Los Santos, Escala 1: 10000. Fuente: Autores.

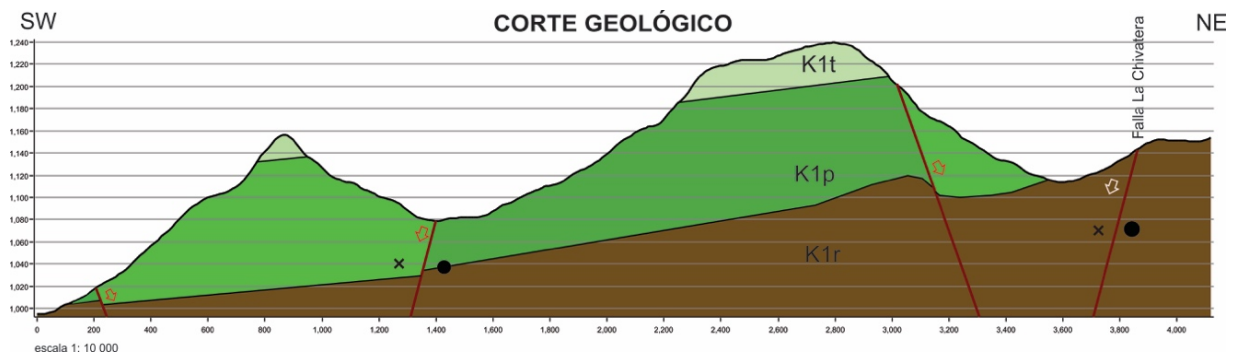


Figura 10. Corte geológico en dirección SW-NE. Fuente: Autores.

3.3 Marco Tectónico Regional

La región está influenciada por la tectónica de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos la cual hace parte de la Orogenia de los Andes del Norte, y está controlada por la compleja interacción entre las placas Nazca, Suramérica y Caribe, la Microplaca de Coiba y los bloques Chocó y Andino, la transferencia de estos esfuerzos al continente ocasiona la reactivación diferencial de los sistemas de fallas paralelos a los Andes, expresando en términos generales un dominio transpresivo (Morales, Forero, Rojas, & Alvarado, 2010).

Clavijo, y otros (1993), ha subdividido el territorio de Santander para su caracterización tectónica en tres provincias tectónicas: la del Macizo de Santander, que está conformada por los bloques de Floresta, Cucutilla, Pamplona y de Ocaña; la del Valle Medio del Magdalena, y la de la Cordillera Oriental, en donde se encuentra la zona de estudio.

Este bloque está caracterizado por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior, ígneas del Triásico - Jurásico y metamórficas del Paleozoico; está restringida a dos bloques, el principal localizado en la región central estructural y el menor ubicado en la región oriental. El bloque principal o central está limitado al oriente por las fallas Riachuelo y Bucaramanga-Santa Marta, y al occidente por la Falla La Salina, mientras el bloque oriental está limitado al oriente por la Falla de Servitá y al occidente por las fallas Bucaramanga-Santa Marta y de Baraya (Clavijo & Royero, 2001).

La zona de estudio se encuentra en un bloque fallado en forma de cuña entre las fallas de Bucaramanga y Suárez, el cual se encuentra hundido e inclinado 12° hacia el oeste, está limitada por las fallas del Suárez al W, Bucaramanga al E y La Mesa de Los Santos al N.

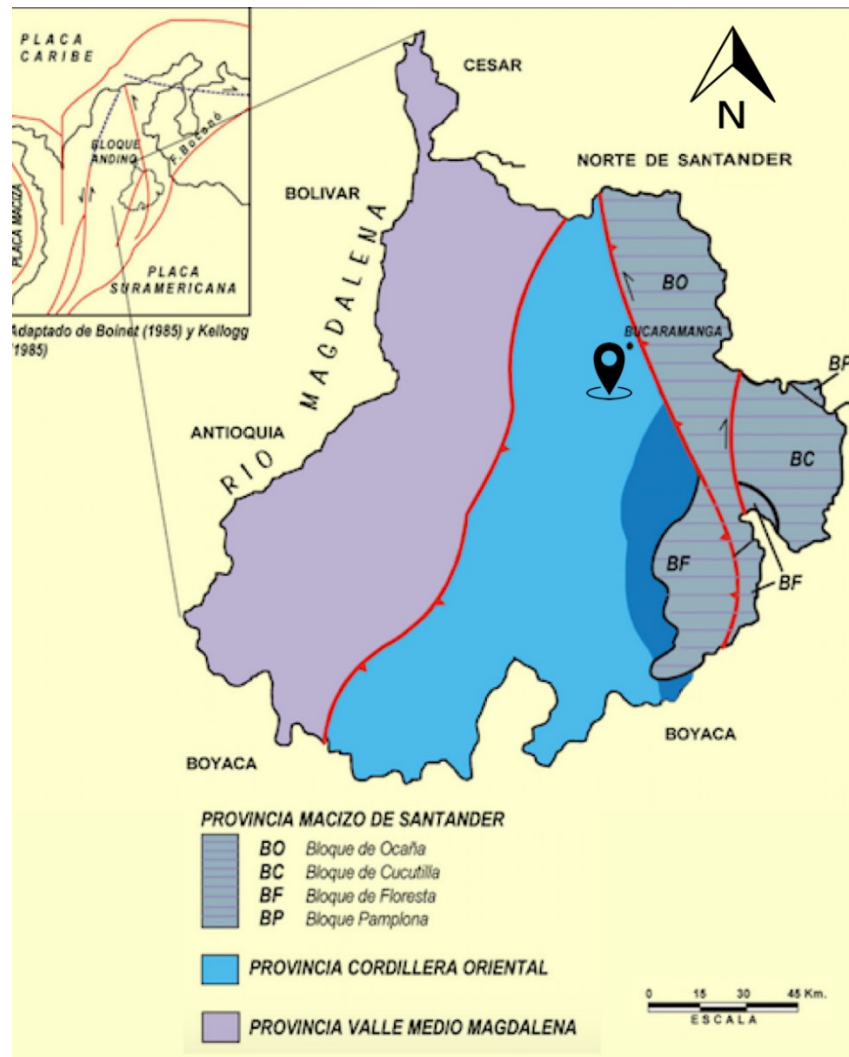


Figura 11. Esquema tectónico del departamento de Santander. Fuente: Royero et al., (2001).

La zona de La Mesa de Los Santos se encuentra dividida en dos bloques estructurales el bloque este y el oeste, esto debido a la influencia que ejerce la Falla de Los Santos con dirección NW-SE. La zona de estudio se encuentra en el bloque oeste de Los Santos, éste por influencia tectónica expone solamente rocas sedimentarias del Cretácico Inferior, debido a que se encuentran con inclinación al oeste; la zona de estudio presenta fallas con tres orientaciones principales: con dirección NW en su mayoría paralelas, mostrando un alto grado de penetrabilidad; fallas paralelas entre sí con dirección NE y fallas menores con dirección EW. (Pinto, et al., 2007).

Las fallas de Bucaramanga y la del Suárez, son las dos estructuras más importantes bajo las cuales está influenciada el área de estudio, la Falla Bucaramanga presenta un desplazamiento de rumbo sinistral con dirección aproximada de N20W y la Falla del Suárez es una falla inversa de ángulo alto, con una componente vertical importante, además, se trata de una falla de rumbo con desplazamiento sinistral, estas fallas indican un ambiente tectónico de transpresión oblicua y han ocasionado procesos de deformación de la secuencia sedimentaria del Jurásico - Cretácico.

3.4 Geología Estructural

3.4.1 Sistemas de Fallas Presentes en el Municipio de Los Santos:

Falla Los Santos. La Falla Los Santos recibe este nombre por su paso cercano al municipio Los Santos. Ésta estructura representa el límite norte de la zona de estudio, es la falla más importante y una de las más profundas; tiene una extensión aproximada de 24 km; es una estructura inversa de ángulo alto con componente sinistral, atraviesa la zona de estudio en forma rectilínea con dirección noroeste - sureste desde el río Sogamoso en la vereda El Espinal Bajo, atravesando las veredas El Espinal Alto, Laguna Alta, Los Teres, Garbazal y El Pozo hasta el municipio de Jordán, controlando el cauce de la quebrada Los Santos y enfrentando las areniscas de la Formación Los Santos en el bloque este con los niveles calcáreos y arenosos de la Formación Rosablanca en el bloque oeste.

Falla La Pilonera. La Falla La Pilonera se ubica al noroeste del municipio de Los Santos, en la vereda Regadero Bajo, su extensión es de aproximadamente 4 km, mostrando un trazo sinuoso que termina hasta encontrarse con la Falla Los Santos. Esta estructura presenta un componente de rumbo dextral normal con vergencia al sur; corta litologías de las formaciones Jordán, Los Santos y Rosablanca.

Falla La Chivatera. La Falla La Chivatera recibe este nombre por controlar el cauce de la quebrada La Chivatera, se encuentra en la parte Este de la zona de estudio en las veredas La Loma y Laguna Baja, es una falla de rumbo dextral normal con vergencia al SW. Su trazo controla parcialmente también la quebrada Zanjón El Brinco.

Falla Zanjón La Vega. La Falla Zanjón la Vega es una estructura de 8 km de longitud con dirección EW con vergencia al norte, ubicada al suroeste de Los Santos en las veredas La Loma y Laguna Baja; Presenta un trazo recto controlando parte del cauce de la quebrada Zanjón La Vega de donde toma su nombre, mostrando una sinuosidad hacia el escarpe. Ésta falla actúa como una falla con componente principal de rumbo dextral e inversa.

Falla Zanjón de Pardo. La Falla Zanjón de Pardo localizada al SW de la zona de estudio, en las veredas Laguna Alta, Los Teres y El Diamante; de 5 km se observa desde el río Chicamocha hasta encontrarse con la Falla Los Santos; es una falla inversa, su trazo es sinuoso y se observa discontinuo, es interrumpido por dos fallas locales a las cuales las desplaza con movimiento sinistral hacia el norte.

Falla Los Teres. La Falla Los Teres es una falla de rumbo sinistral, presenta una extensión de 6 km, desde la vereda La Loma hacia la vereda El Diamante. Esta falla rompe la pendiente estructural de rocas del Cretácico y el Jurásico y atraviesa las minas de yeso.

Sinclinal Regadero Alto. Ubicado en la vereda Regadero Alto del municipio de Los Santos, es un pliegue abierto, el trazo de su eje tiene dirección NE - SW, se presenta en forma de “V” alargada y cabecea hacia el sur (Pinto, et al., 2007).

Sinclinal El Gramal. Localizado hacia el centro de la secuencia sedimentaria. Es una estructura abierta, asimétrica cuyo eje presenta un rumbo N23W. El núcleo de la estructura del

sinclinal está constituido por la Formación Tablazo, truncado al sur de la estructura por la Falla La Loma.

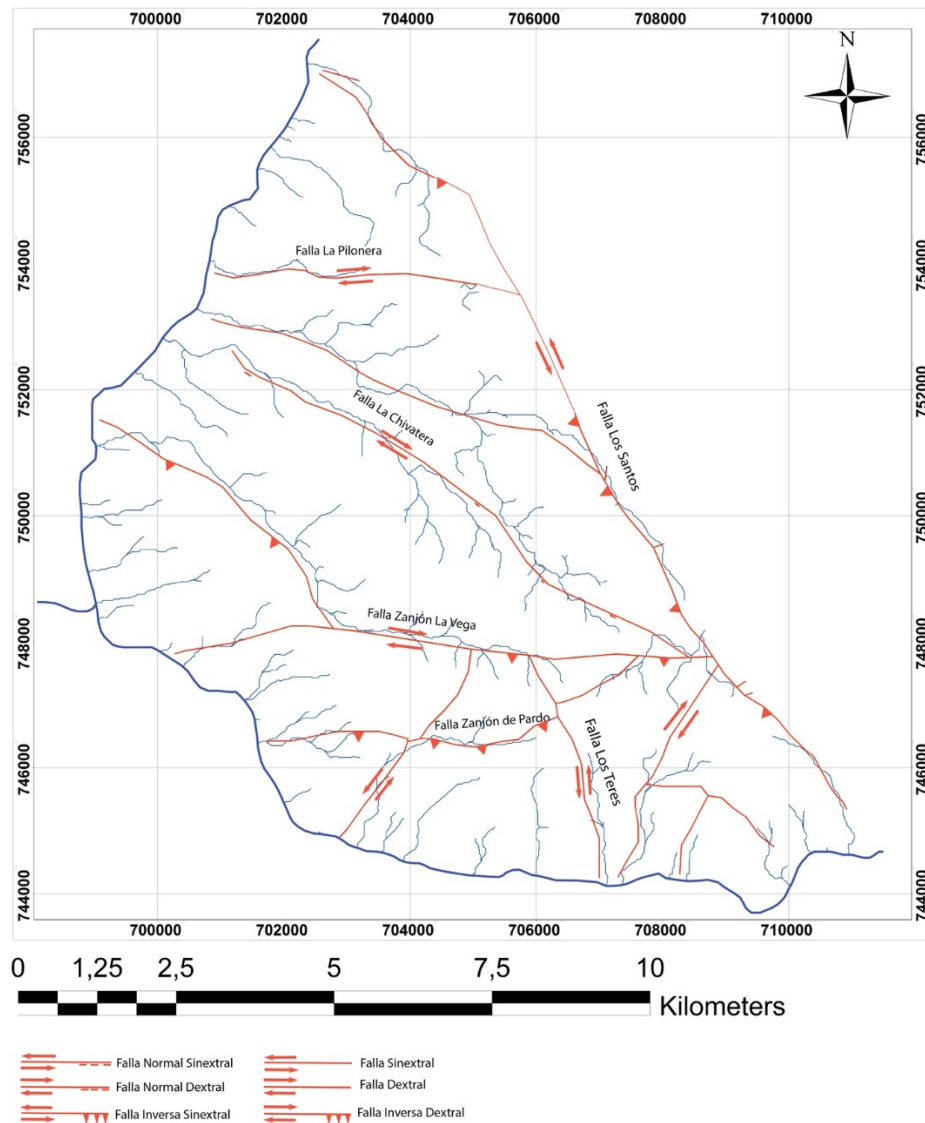


Figura 12. Mapa de fallas del sur occidente del municipio de Los Santos. Basado en Díaz et al., (2009).

3.5 Cuenca de drenaje e Hidrología

La Mesa de Los Santos presenta un déficit en la cobertura vegetal especialmente hacia el sur donde en época de verano la mayoría de las quebradas permanecen secas y en época de invierno solo se observa drenajes formados a partir de escorrentías superficiales que remueven el material,

transportándolo hacia los principales ríos que conforman la red hidrográfica de la zona, el río Chicamocha y Sogamoso, los cuales pertenecen a la gran cuenca del río Magdalena.

La fuente de recarga de agua sobre el municipio de Los Santos es la producida por la precipitación fluvial, percolación y flujo superficial (Gómez, 1970). Durante estos periodos de lluvia, el agua se infiltra en el suelo por medio de diaclasas o fracturas en la roca y aunque presenta buen fracturamiento hacia los escarpes y parte del sur del municipio, el flujo de agua a través de las rocas es lento debido a la baja densidad de fracturas abiertas (Ingeominas, 2010).

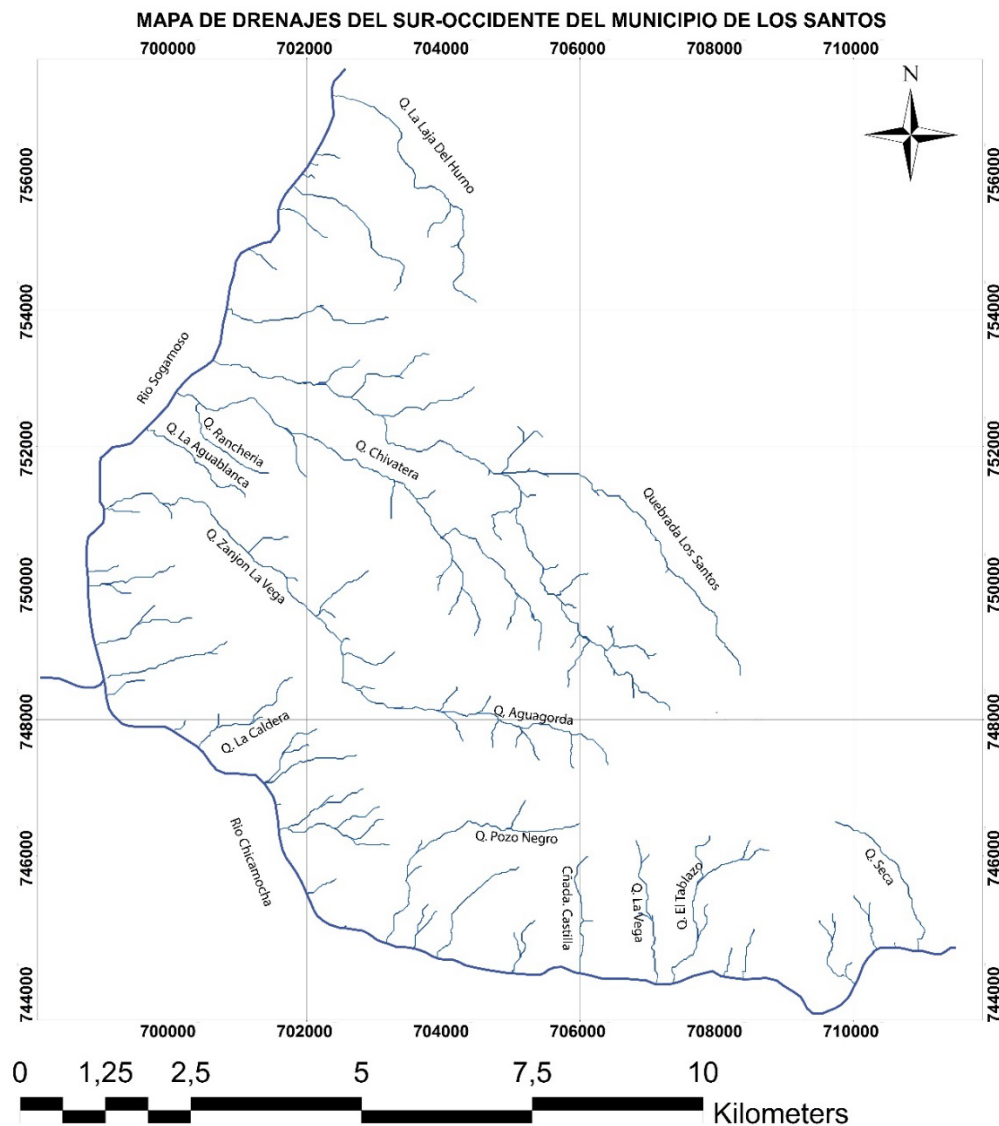


Figura 13. Mapa de drenajes del sur occidente de Los Santos. Basado en Díaz et al., (2009).

3.5.1 Caracterización morfométrica. (Horton, 1932). Para hacer una caracterización morfológica se deben tener en cuenta principalmente factores como la topografía presente en la cuenca de drenaje y la forma y extensión del sistema de corrientes o red de drenaje que componen la cuenca hidrográfica (Horton, 1932).

En la zona NW, W, SW y S se observa una topografía escarpada con pendientes muy inclinadas, casi verticales en donde los drenajes desembocan hacia los ríos principales Sogamoso y Chicamocha. La topografía de la parte media de la zona corresponde a una peniplanicie con algunos anticlinales poco pronunciados, el lugar de mayor madurez de drenaje se ubica atravesando todo el medio de la zona en sentido NW- SE y corresponde a la quebrada Los Santos.

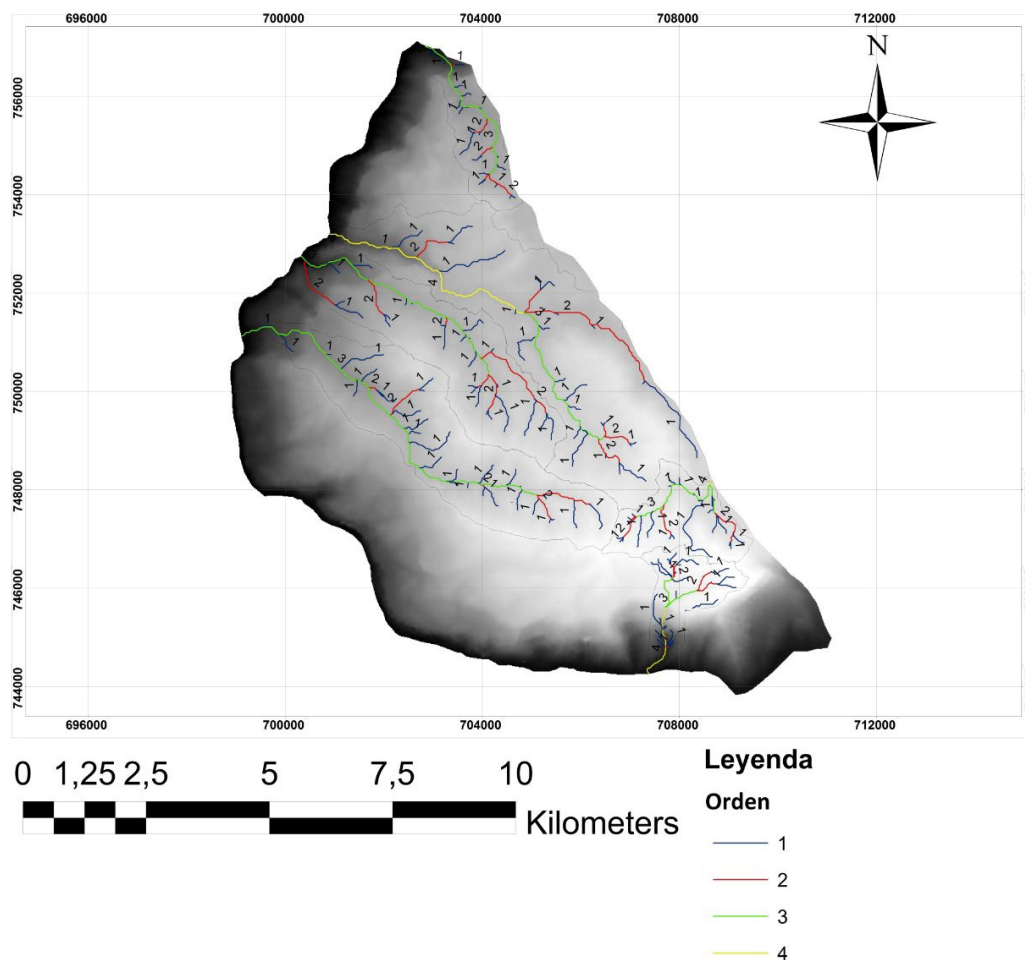


Figura 14. Mapa de orden de drenajes. Fuente: Autores.

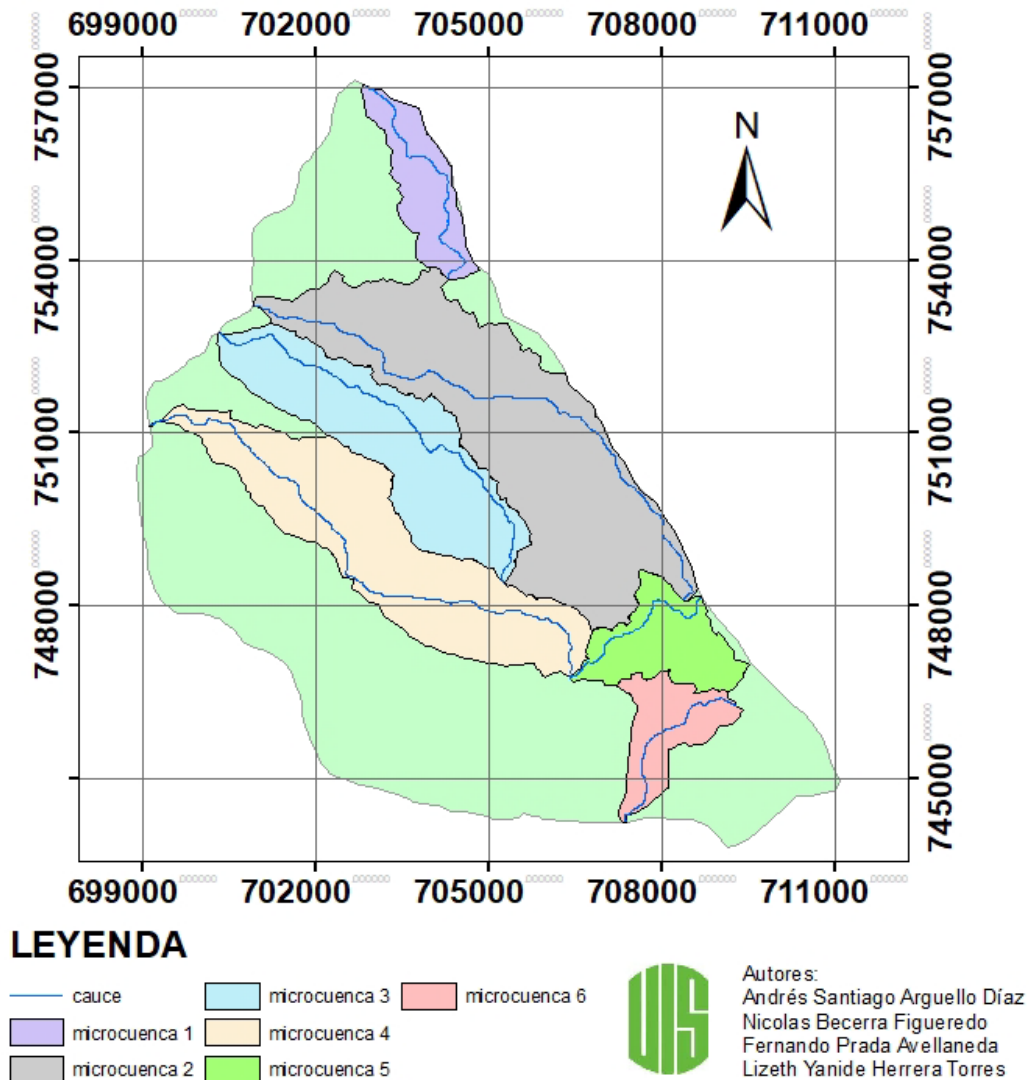


Figura 15. Mapa de microcuencas del sur occidente de Los Santos. Fuente: Autores.

3.5.2 Análisis de Cuenca. El área se subdivide en 6 microcuencas principales, con cada una de ellas se hizo un estudio detallado utilizando 3 parámetros fundamentales: forma de la cuenca, tipo de relieve y referente a la red hídrica. Cada uno de estos parámetros morfométricos desempeña un papel fundamental en el estudio y comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico.

Estos parámetros se analizaron con ayuda del uso de ArcGIS y cálculos realizados por medio de software Excel y previas ecuaciones.

Según los parámetros de forma que se muestran en la tabla 2, la microcuenca 2 tiene un área de 16 Km² y un perímetro de 25,909 km, le corresponde un factor de forma de 1,81 y un factor de compacidad de 0,13 lo cual indica que es una cuenca alargada con tendencia a concentrar escurrimiento de lluvias intensas, formando fácilmente grandes crecidas. Según los parámetros de drenaje representados en la tabla 4 esta cuenca tiene una densidad de drenaje de 1,62 km/km², es la más baja de todas las cuencas, pero aun así es indicador de una red de drenaje muy eficiente, la longitud del cauce principal es de 4,89 km, tiene un índice de sinuosidad de 0.67 el cual según la tabla 5 predice que el tipo de cauce es rectilíneo y que su morfología corresponde a un solo cauce con pozos y rápidos, el tiempo de concentración es de 0.67 hr. La tabla 6 indica que, según los parámetros de relieve, la microcuenca 2 tiene una altitud media de 1317 msnm y una pendiente media de 14,47, lo cual según la tabla 7 de Clasificación de tipos de relieve según López de Cadenas de Llano de 1998 el relieve en esta microcuenca es accidentado.

Otra área de mayor predisposición se localiza en la microcuenca 5, en donde se ubica la vereda El pozo; haciendo un análisis de los parámetros obtenidos se observa que esta microcuenca tiene un área de 3,366 Km² y un perímetro de 10,005 km, su factor de forma es de 1,54 y un factor de compacidad de 0,27, valores muy similares a los de la microcuenca 2 que representan una cuenca alargada con tendencia a concentrar escurrimiento de aguas lluvias intensas. Según los parámetros de drenajes mostrados en la tabla 4, la microcuenca 5 presenta una densidad de drenaje de 3,51 km/km², una de las más altas que indica una red de drenaje muy madura y eficiente, la longitud del cauce principal es de 90 m, tiene un índice de sinuosidad de 0.03, muy similar al de la microcuenca 2 e indica según la tabla 5 que el tipo de cauce es rectilíneo y que su morfología

corresponde a un solo cauce con pozos y rápidos, el tiempo de concentración es de 0.03 hrs. Con respecto a los parámetros de relieve, se puede decir que esta microcuenca tiene una altitud media de 1421 msnm, con una pendiente media de 25,56, la más alta de todas las microcuencas lo cual indica es que su relieve es muy fuerte.

En la figura 15. Las zonas con mejores características para favorecer la percolación de agua se encuentran localizadas en la microcuenca 2 y la microcuenca 5

3.5.2.1 Parámetros de forma (Unidades en Km²). “El coeficiente de compacidad de gravelious (Kc) es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de una cuenca y de esta manera representar esta característica” (Gaspari et al. 2012).

Tabla 2.

Clasificación de parámetros de forma.

	Área (Km ²)	Perímetro (P) (Km)	Longitud axial (La) (Km)	Ancho promedio (B) (Km)	Factor forma (Kf)	Coeficiente de compacidad (Kc)
Microcuenca 1	2,87	9,03	3,71	0,77	1,50	0,12
Microcuenca 2	16	25,91	4,89	3,32	1,81	0,13
Microcuenca 3	8,47	16,49	5,19	1,63	1,59	0,12
Microcuenca 4	10,89	20,68	8,11	1,34	1,77	0,09
Microcuenca 5	3,37	10,00	0,09	34,78	1,54	0,27
Microcuenca 6	2,57	9,06	1,60	1,60	1,59	0,19

Fuente: Modificado de Gaspari (2013).

Fórmulas:

Coeficiente de compacidad:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{A^2} =$$

Dónde: Kc: Índice de compacidad.

P: Perímetro.

A: Área de la cuenca.

Tabla 3.

Relación compacidad Vs. Forma

Valores del coeficiente de compacidad	Formas típicas
1 - 1.25	Redonda
1.25 - 1.5	Ovalada
1.5 - 1.75	Oblonga
> 1.75	Alargada

Fuente: Gaspari (2013).

Coeficiente de forma:

$$K_f = \frac{A}{Lc^2} =$$

Dónde: A: Área de la cuenca

Lc: Longitud del cauce principal

Ancho medio:

$$B = \frac{A}{L_a} =$$

Dónde: **B:** Ancho medio**A:** Área de la cuenca**L_a:** Longitud del canal principal

3.5.2.2 Parámetros de drenaje. Teniendo en cuenta el método establecido por Horton y otros parámetros como la densidad de drenaje dada en Km/Km² la cual “consiste en relacionar la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca con respecto al área de la misma” (Cruz et al, 2015). El índice de sinuosidad es el cociente entre la longitud del drenaje y la distancia en línea recta entre la desembocadura del drenaje y la parte más lejana de la microcuenca, su análisis se dio por medio de la tabla (clasificación de los tipos de cauces). “El tiempo de concentración es el tiempo que tarde el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca” (Gaspari et al., 2012). La longitud del caudal principal y la longitud en línea recta del cauce se dan en Kilómetros y se calcularon por medio del uso de ArcGIS. “La pendiente media del cauce se da en porcentaje y se halla a partir del cálculo del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud del mismo” (Gaspari et al., 2013).

Tabla 4.

Clasificación de parámetros de drenaje

	Densidad de drenaje (Dd) (Km/Km ²)	Índice de sinuosidad	Tiempo de concentración (hr)	Longitud del cauce principal (L) (Km)	Longitud en línea recta del cauce (Km)	Pendiente media del cauce (%)	Longitud (m)
Microcuenca1	3,19	0.98	0.47	3,71	3.77	16,91	4967
Microcuenca2	1,62	0.67	0.66	4,89	7.25	8,63	11195
Microcuenca3	2,22	0.83	0.65	5,19	6.25	11,68	8369
Microcuenca4	2,08	0.97	0.95	8,11	8.33	10,19	10639
Microcuenca5	3,51	0.03	0.03	0,09	2.58	4,62	3549
Microcuenca6	4,79	0.74	0.24	1,7	2.28	27,79	3688

Fuente: Modificado de Gaspari (2013).

Formulas:

Tiempo de concentración:

$$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{J^4} \right)^{0.76} =$$

Dónde: **Tc:** Tiempo de concentración.**L:** Longitud del cauce.**J:** Pendiente media del cauce en %

Tabla 5.

Clasificación de los tipos de cauces.

Tipo de cauce	Morfología	Sinuosidad	Tipo de carga	Anchura/ profundidad	Tipo de acción erosiva	Tipo de sedimentación
Rectilíneo	un solo cauce con Pozos y rápidos	< 1,05	En suspensión, mixta o carga de fondo	<40	Ensanchamiento e incisión del cauce menor	Barras oblicuas y longitudinales
Ligeramente sinuoso	Un solo cauce, pozos y rápidos	> 1,05 <1,50	Mixta	<40	Ensanchamiento, creciente del cauce e incisión	Barras oblicuas.
Meandriforme	Un solo cauce (a veces con barra, puntual interior)	> 1,50	En suspensión o carga mixta	<40	Incisión del cauce, ensanchamiento del meandro	Formación de barra puntual
Trenzado o "braided"	Dos o más cauces con barras y perímetro inestable	>1,30	Carga de fondo	>40	Ensanchamiento del cauce	Acumulación en el cauce y formación de barras centrales y diagonales
Anastomosado	Dos o más cauces con grandes islas estables	>2.0	Carga en suspensión	<10	Lento ensanchamiento del meandro	Lenta acreción del margen

Fuente: López de Cadenas de Llano 1998.

3.5.2.3 Parámetros de relieve. Para este análisis se tuvo en cuenta el mapa de curvas hipsométricas realizado por medio de ArcGIS que representa gráficamente la distribución aérea de las elevaciones del terreno sobre una equidistancia de 50 m. Esto junto con otros parámetros como la altitud media dada en metros sobre el nivel del mar (msnm) que se calculó por medio de ArcGIS y la mediana de la altitud dada en metros, para definir el tipo de relieve se consideraron factores como la topografía del terreno calculando la pendiente media y la clasificación de relieves propuesta por López de Cadenas de Llano en 1998. , para definir el tipo de relieve se consideraron factores como la topografía del terreno calculando la pendiente media y la clasificación de relieves propuesta por López de Cadenas de Llano en 1998.

Tabla 6. *Clasificación de parámetros de relieve.*

	Altitud media (msnm)	Mediana de altitud (m)	Pendiente media (%)	Relieve
Microcuena 1	1218	789	21,22	Muy fuerte
Microcuena 2	1317	851,5	14,47	Accidentado
Microcuena 3	1324	825	7,32	Presenta lomadas
Microcuena 4	1418	875	14,45	Accidentado
Microcuena 5	1421	1335,5	25,56	Muy fuerte
Microcuena 6	1439	949,5	12,09	Accidentado

Fuente: Modificado de Gaspari (2013).

Tabla 7.

Clasificación de tipos de relieve

Pendiente media (%)	Tipo de Relieve
< 0.5	Muy plano
0.5 a 1	Plano
1 a 3	Suave
3 a 12	Lomas
12 a 20	Accidentado
20 a 50	Muy fuerte
50 a 75	Escarpado
> 75	Muy escarpado

Fuente: López de Cadenas de Llano 1998.

3.5.2.4 Curvas hipsométricas. Las curvas hipsométricas expresan el potencial evolutivo de la cuenca hidrográfica, esto se hace por medio de gráficas en donde el eje Y representa la altura relativa de las curvas de nivel y el eje X representa el porcentaje del área acumulada.

Según esto se puede inferir que la microcuenca 2 está en fase joven y por ello tiene un gran potencial erosivo, mientras que la microcuenca 5 se encuentra en fase madura o podría representar una microcuenca en estado de equilibrio.

A continuación, se muestran las curvas hipsométricas de los cauces principales de cada una de las microcuencas.

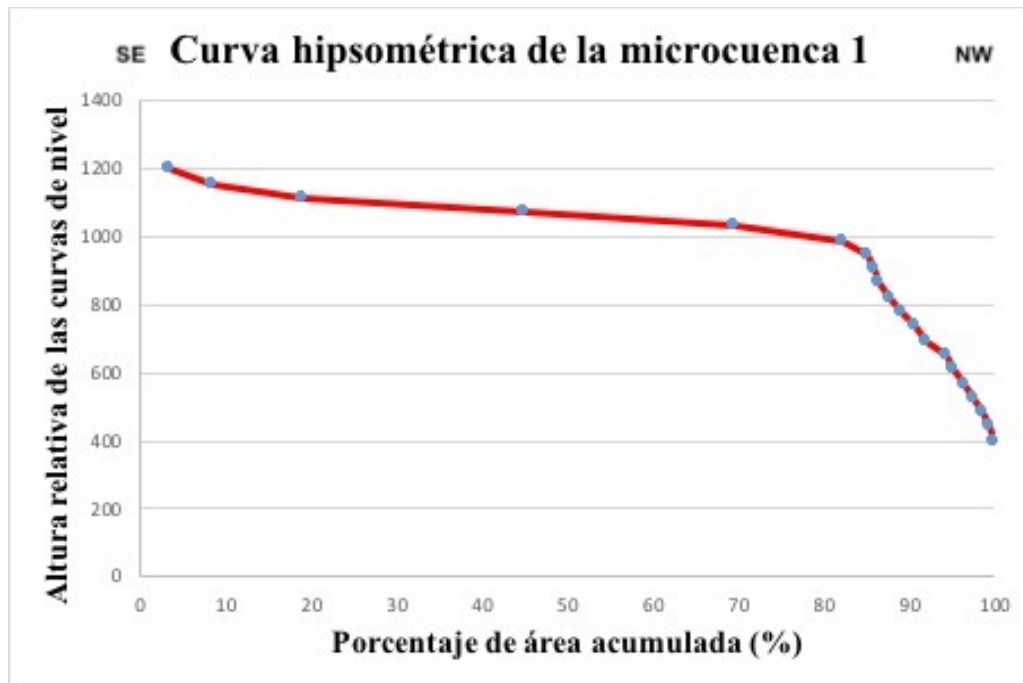


Figura 16. Curva hipsométrica de la microcuenca 1. Fuente: Autores.

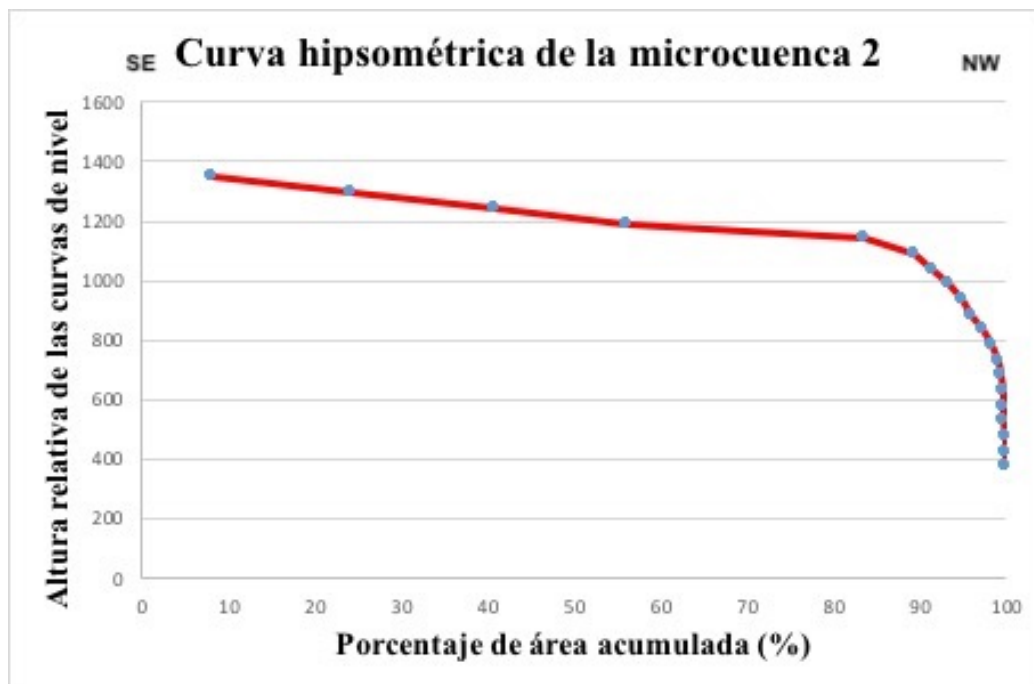


Figura 17. Curva hipsométrica de la microcuenca 2. Fuente: Autores.

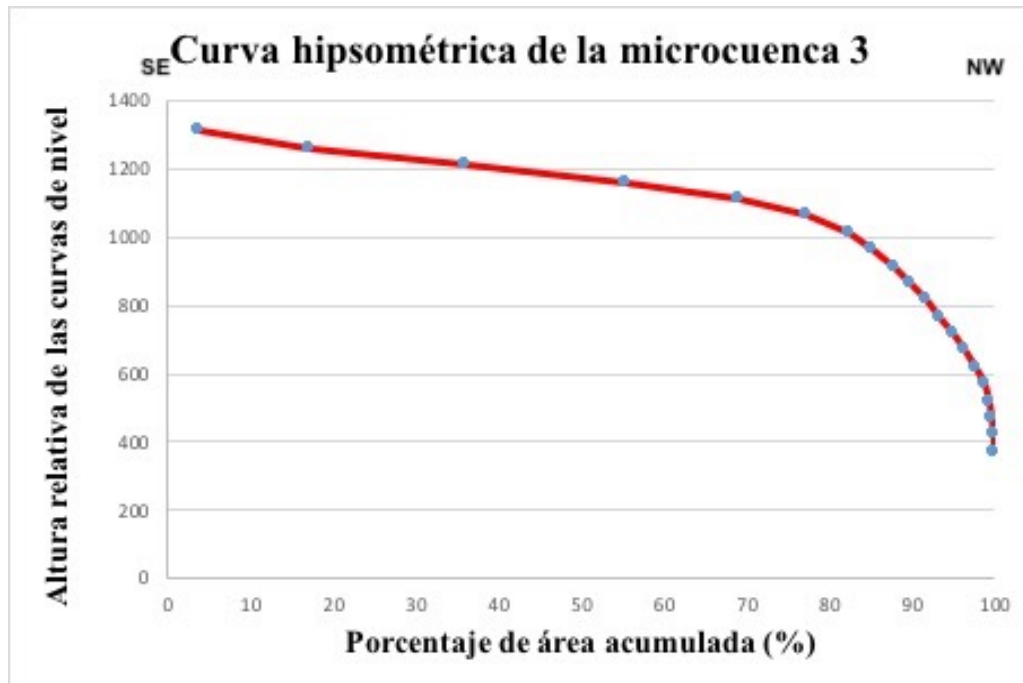


Figura 18. Curva hipsométrica de la microcuenca 3. Fuente: Autores.

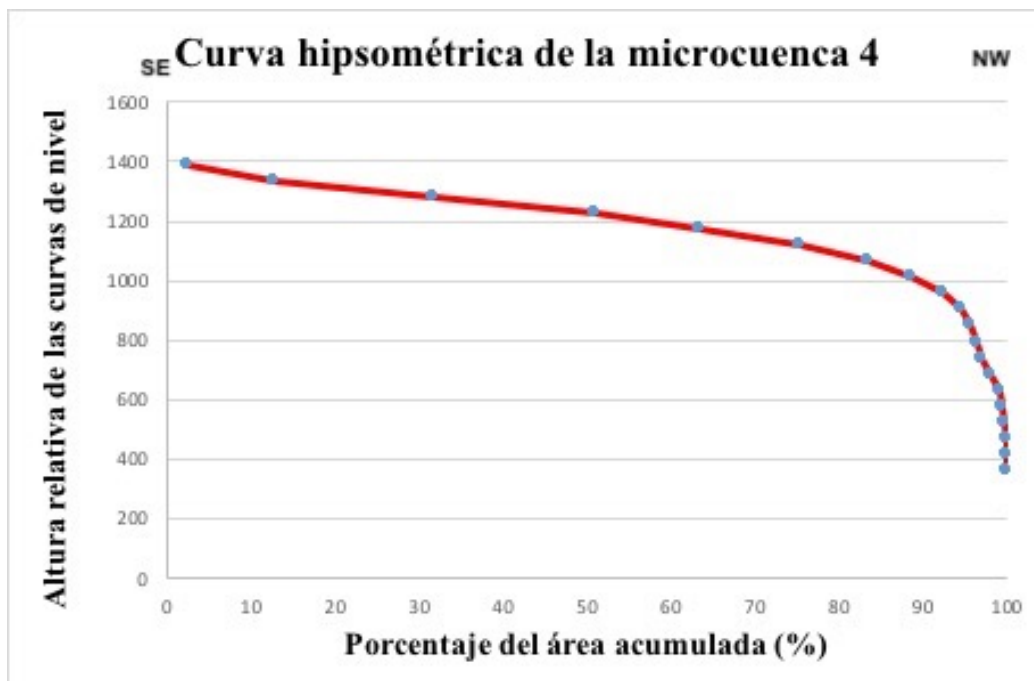


Figura 19. Curva hipsométrica de la microcuenca 4. Fuente: Autores.

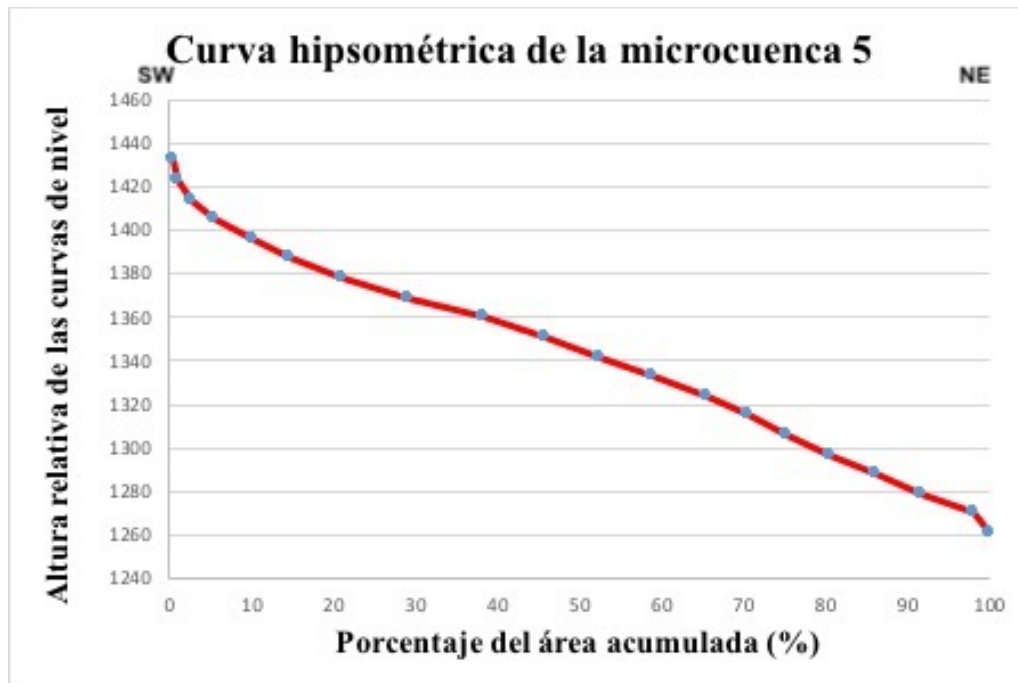


Figura 20. Curva hipsométrica de la microcuena 5. Fuente: Autores.

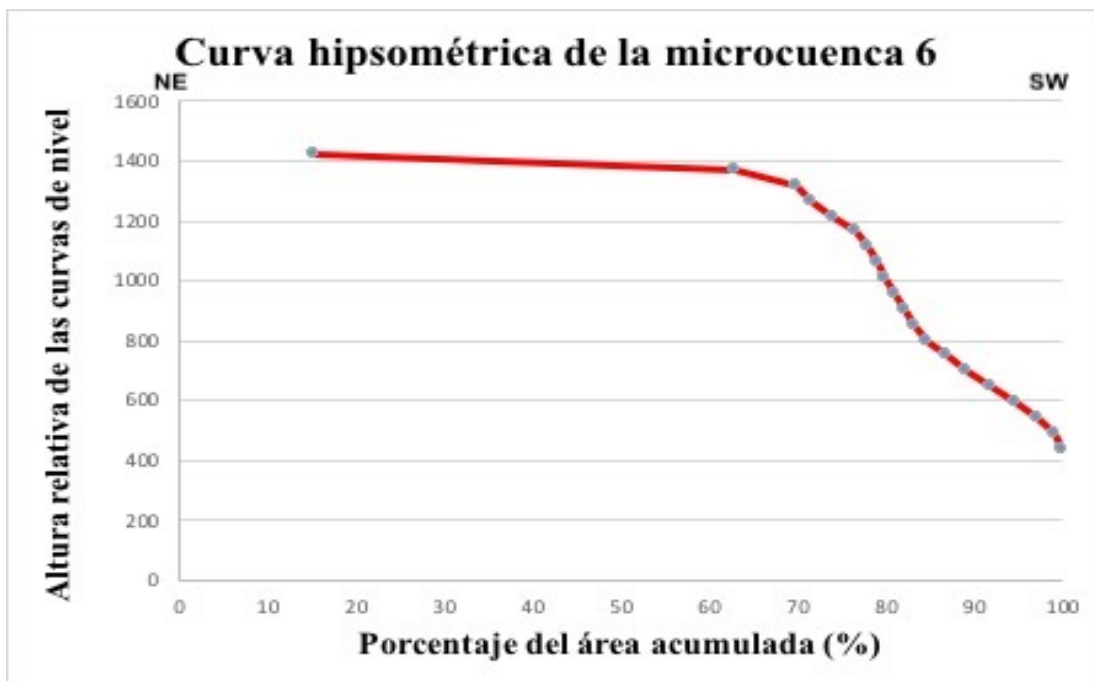


Figura 21. Curvas hipsométricas de la microcuena 6. Fuente: Autores.

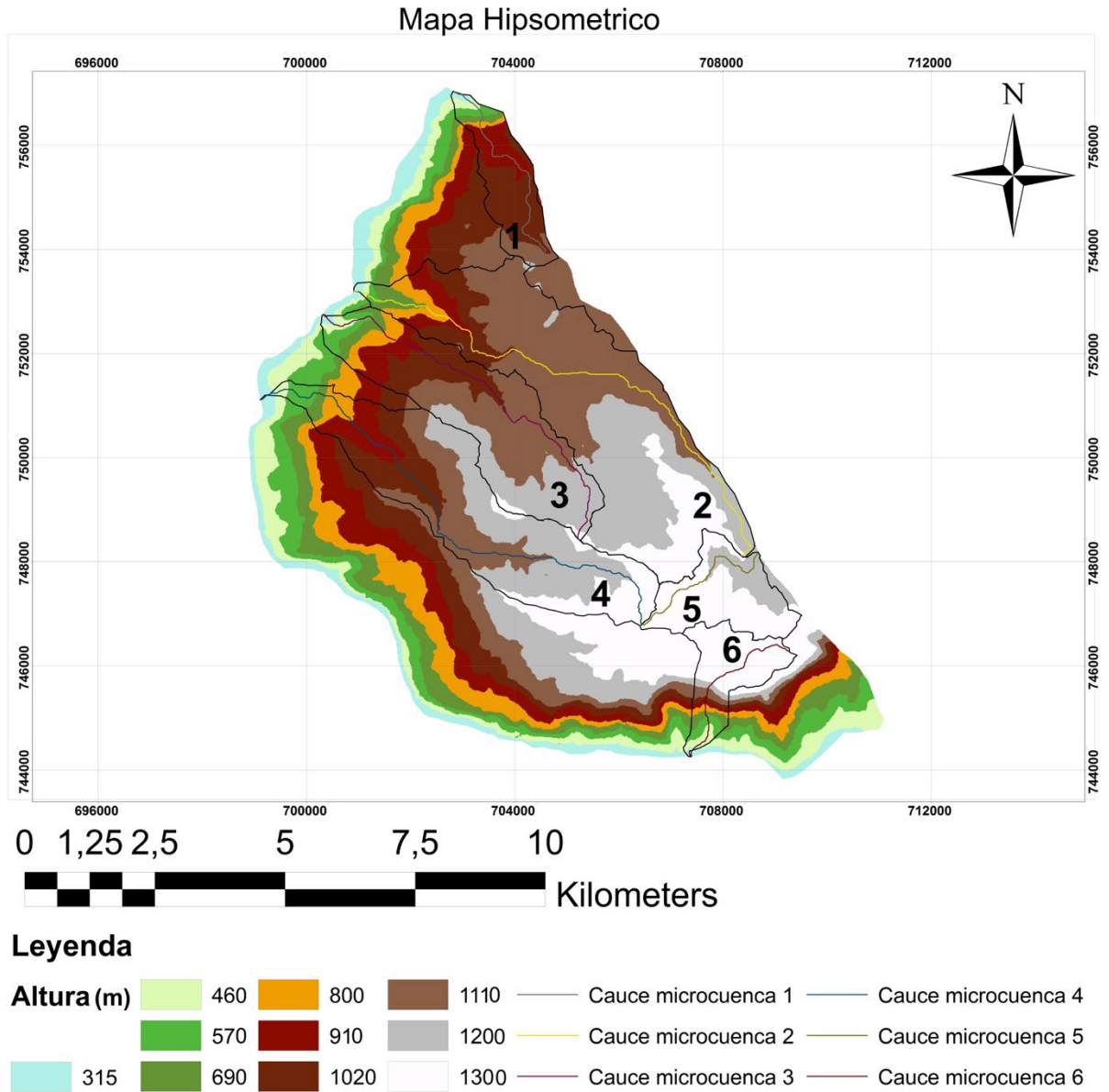


Figura 22. Mapa hipsométrico del Sur occidente de Los Santos. Fuente: Autores.

En el mapa hipsométrico se observan las alturas frecuentes en rangos, e integra las curvas hipsométricas de los cauces de cada microcuencia.

3.6 Análisis de precipitación.

Se realizaron e interpretaron gráficas de valores anuales de precipitación en base a los valores totales mensuales de precipitación que toma el Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales del municipio de Los Santos con la entidad IDEAM.

Se realizó una tabla con unos rangos de valores desde nulo a alto para organizar los meses en donde hay mayor abundancia de lluvia.

En base a los datos reportados por la entidad IDEAM y al análisis de la tabla que se realizó. Se puede concluir que en los meses de enero en los últimos 10 años se presentaron valores nulos de precipitación, los meses de abril, mayo, agosto, octubre y noviembre reportaron el mayor índice de lluvias en los últimos 12 años. Por el cual proponemos que para un futuro desarrollo de algún acuífero artificial que dependa de la recarga por método de lluvias, se desarrollen para recarga en los meses de octubre, meses reportados con mayores índices de pluviosidad.

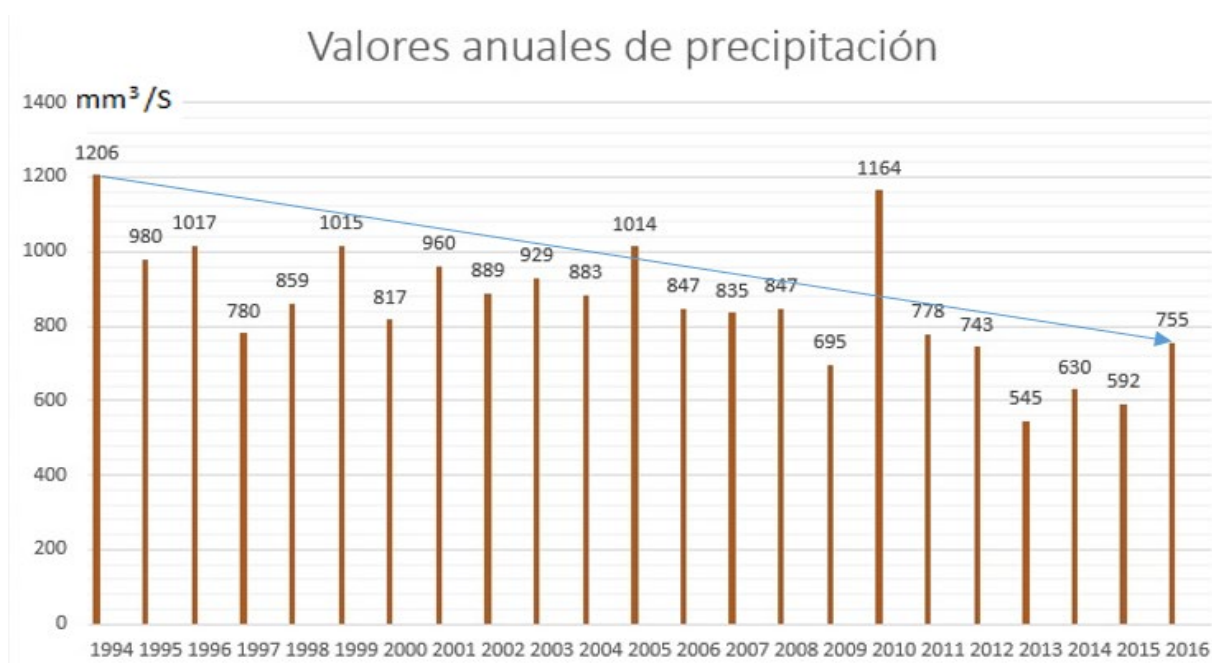


Figura 23. Valores anuales de precipitación en el municipio de Los Santos, la flecha azul representa la tendencia de precipitación. Tomado del IDEAM.

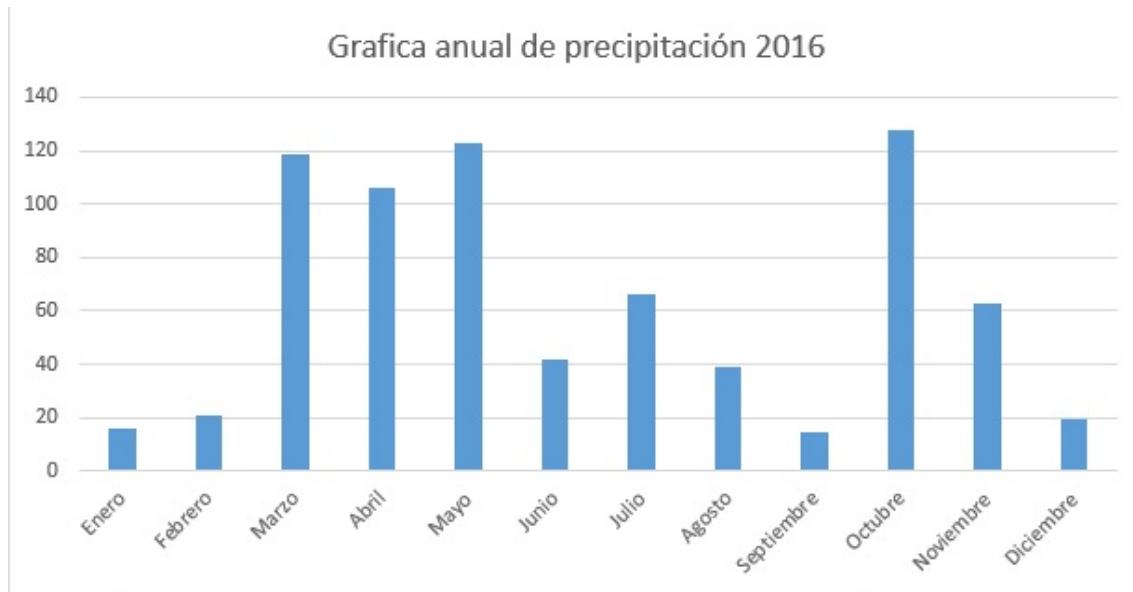


Figura 24. Gráfica anual de precipitación 2016. Tomado del IDEAM.

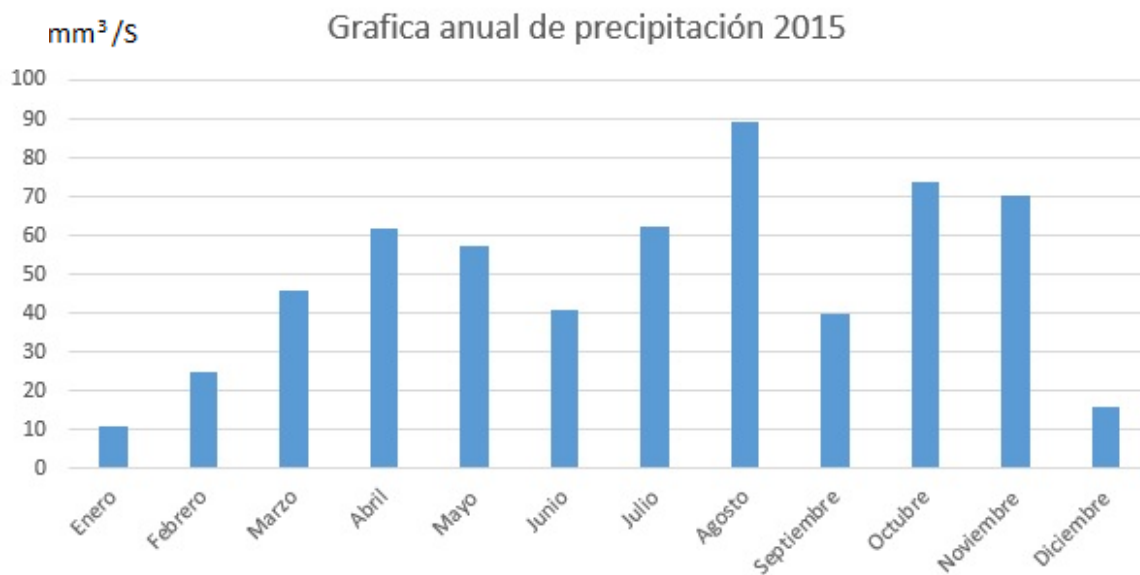


Figura 25. Gráfica anual de precipitación 2015. Tomado del IDEAM.

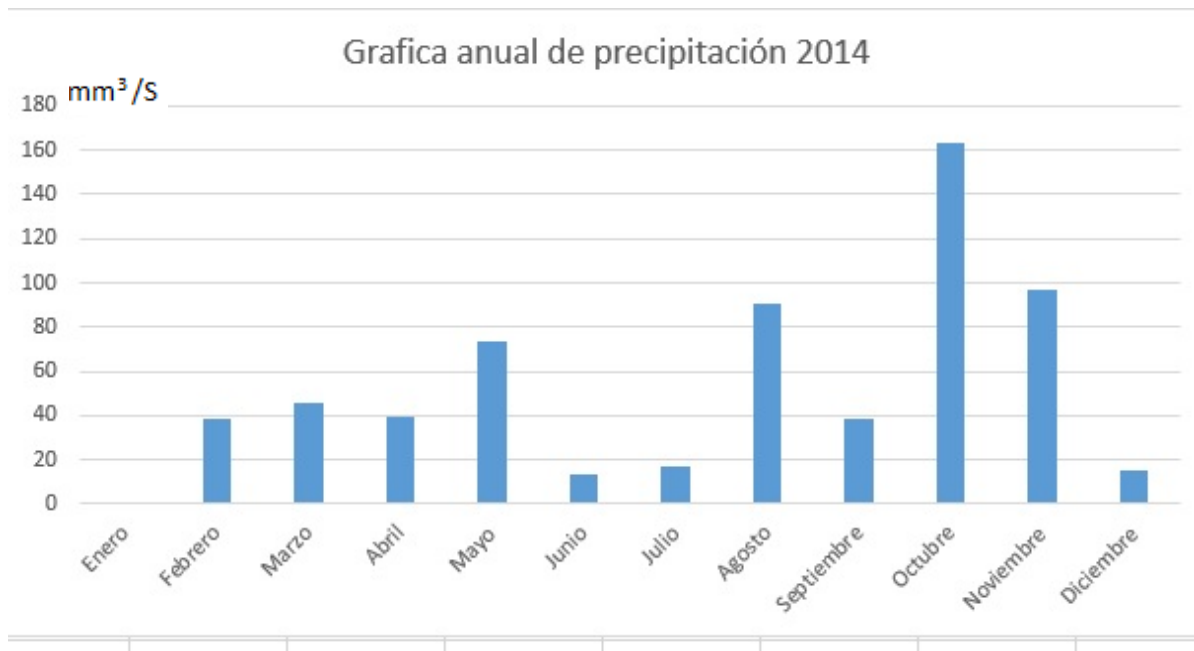


Figura 26. Gráfica anual de precipitación 2014. Tomado del IDEAM.

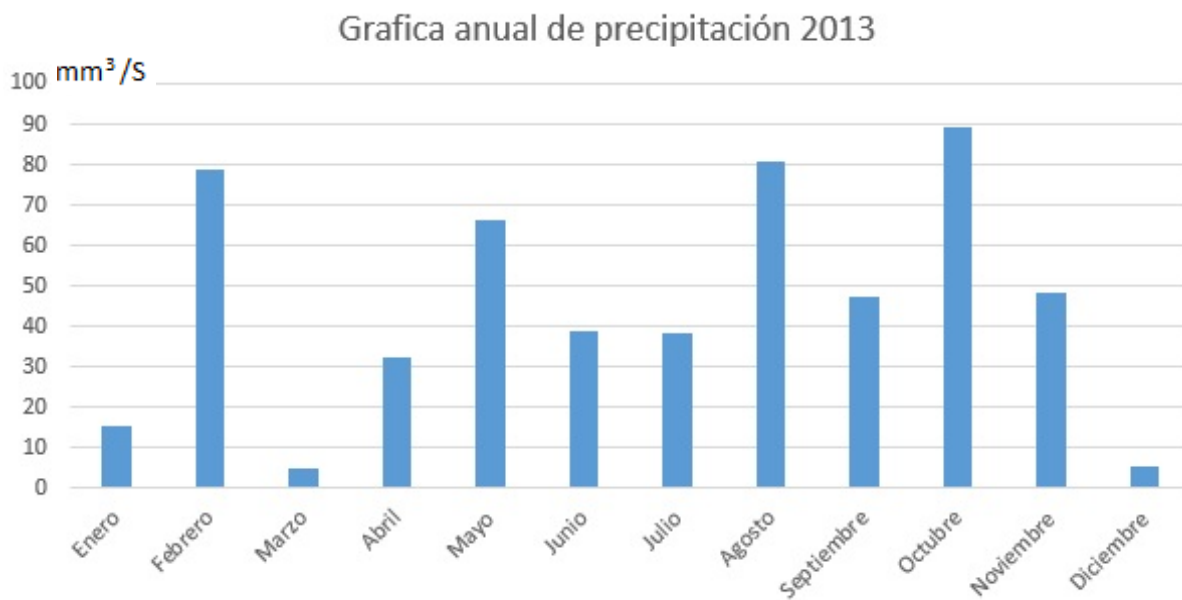


Figura 27. Gráfica anual de precipitación 2013. Tomado del IDEAM.

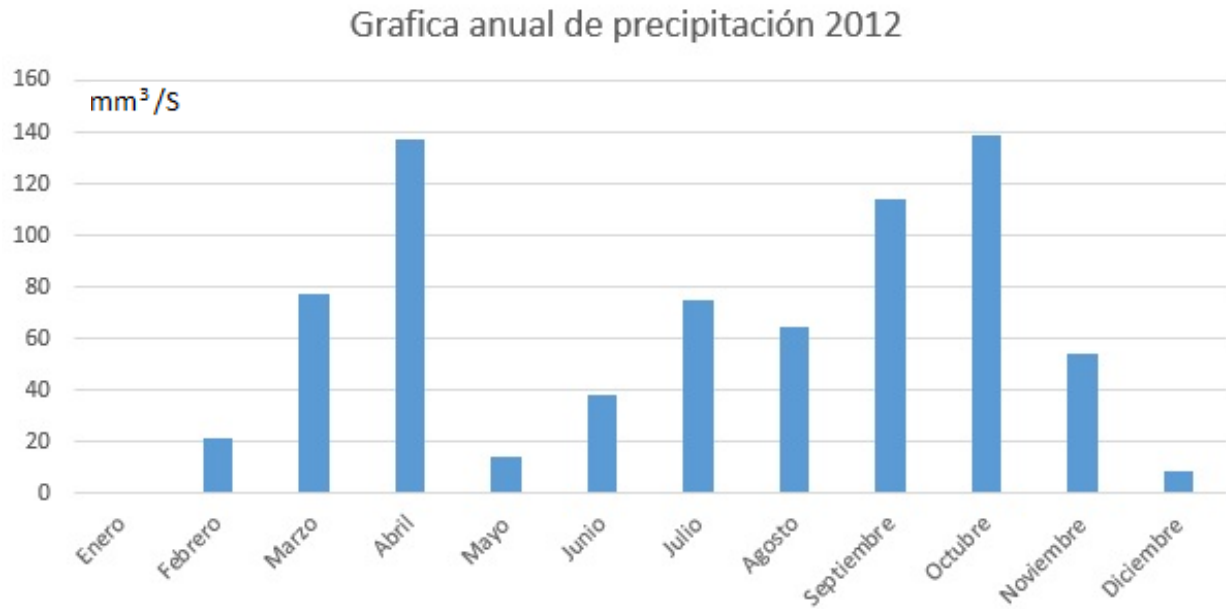


Figura 28. Gráfica anual de precipitación 2012. Tomado del IDEAM.

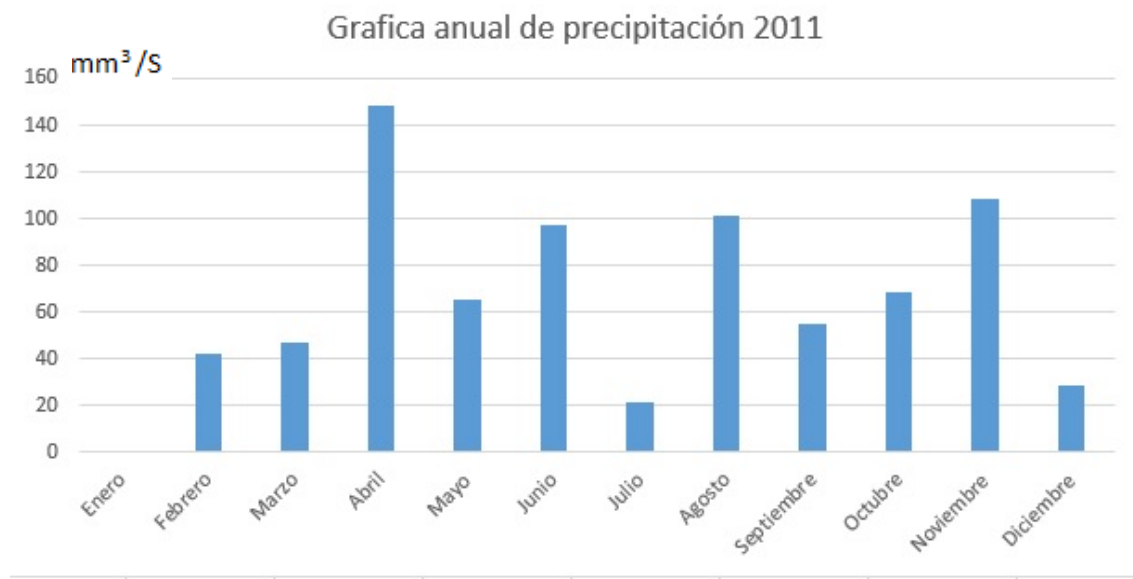


Figura 29. Gráfica anual de precipitación 2011. Tomado del IDEAM.

Se calculó la intensidad del déficit pluviométrico usando los datos proporcionados por el IDEAM de la estación meteorológica de categoría pluviométrica que se encuentra ubicada en el municipio de Los Santos, cuyo nombre y código del catálogo de estaciones son MESA LA (24060050), información entregada como anexo a este estudio.

La metodología que se utilizó en este estudio fue la empleada por la Red de Información Ambiental de Andalucía REDIAM (2014), en el Mapa de intensidad del déficit pluviométrico en Andalucía.

Inicialmente calculamos las anomalías pluviométricas con respecto a la media de la serie histórica de pluviosidad desde 1974 hasta 2016, para los últimos 6, 12, 24, 36 y 48 meses así:

Anomalía de los últimos 6 meses = Sumatorio de las precipitaciones de los últimos 6 meses dividido entre el sumatorio de la precipitación media mensual (en los meses x a $x - 6$) = $329.3/426 = \underline{0.77}$.

Anomalía de los últimos 12 meses = Sumatorio de las precipitaciones de los últimos 12 meses dividido en la precipitación media anual = $755.3/931.116 = \underline{0.81}$.

Anomalía de los últimos 24 meses = Sumatorio de las precipitaciones de los últimos 12 meses dividido en el doble de la precipitación media anual = $1347/931.116*2 = \underline{0.72}$.

Anomalía de los últimos 36 meses = Sumatorio de las precipitaciones de los últimos 36 meses dividido en el triple de la precipitación media anual = $1977.9/2605.5 = \underline{0.708}$.

Anomalía de los últimos 48 meses = Sumatorio de las precipitaciones de los últimos 48 meses dividido en el cuádruplo de la precipitación media anual = $2523/931.116*4 = \underline{0.67}$.

Las anomalías calculadas anteriormente se reclasificaron de tal manera que a los resultados superiores a 1 se les asigna un valor numérico de 0 y a los resultados menores que 1 les corresponde

un valor numérico de 1, debido a que los resultados de todas las anomalías calculadas anteriormente son menores que 1 (anomalías negativas) se le asignó a cada una un valor numérico de 1.

La suma de todos los valores numéricos reclasificados de las anomalías de los últimos 6, 12, 24, 36 y 48 meses es igual a 5, que corresponde a una intensidad de déficit pluviométrico extrema definida por REDIAM (2014), cuando a lo largo de los últimos 48 meses el total de precipitación ha sido inferior a la media.

3.7 Áreas de recarga

Las zonas de recarga son la parte de la cuenca hidrográfica en la cual por sus condiciones climatológicas, geológicas y topográficas, gran parte de las precipitaciones se infiltran en el suelo, llegando a recargar los acuíferos.

El área de estudio se encuentra en una región semiárida donde el promedio de precipitación anual es de 868 mm³, los drenajes no poseen flujo constate, es una mesa residual con relieve tabular y con una topografía ligeramente ondulada a casi plana, un suelo de poco espesor y poco permeable, al cual lo infrayace calizas con gran control estructural y el nivel freático es profundo, la recarga es limitada debido a la disponibilidad de agua en la superficie; el proceso de recarga ocurre de manera estacional, intermitente, a corto plazo (por ejemplo después de una fuerte lluvia) y localizada, es decir, implica un movimiento horizontal del agua antes de que se dé el proceso de recarga.

Los cuerpos superficiales de agua constituyen las principales áreas de recarga como los son ríos o drenajes, según Scanlon y otros (2002), en zonas áridas la recarga ocurre usualmente en topografías bajas como canales o arroyos efímeros por lo cual la recarga se localiza en las partes

bajas del terreno de la zona, dentro de las microcuencas, las áreas de recarga estarían ubicadas a lo largo de sus drenajes en la quebrada Los Santos, La Chivatera, Aguagorda, Zanjón La Vega y el Tablazo; el agua también se infiltra por escorrentía a través de las fracturas localizadas en estas áreas.

Según esto se puede inferir que la microcuenca 2 es una cuenca con gran de predisposición erosivo, mientras que la microcuenca 5 representa una cuenca en estado de equilibrio.

Estos estudios se realizaron en base a recopilación de datos de puntos de agua, el registro se tomó en una de las zonas de mayor interés ubicada en la vereda El Pozo con coordenadas X: 708264; Y: 746431; H: 1373 msnm. Se comporta como una zona con algunas pendientes pronunciadas, cuya litología no consolidada de grano fino presenta suelos saprolitos fértiles que favorecen los cultivos.

4. Resultados

4.1 Columna estratigráfica 1:200

Estratigrafía de la sección de la Formación Rosablanca en la vereda La Loma, en proximidades a la vereda Regadero Bajo. La sección descrita se levantó en la vereda Regadero Bajo ubicada en inmediaciones del municipio de Los Santos, Santander, se describió a través de un drenaje seco, a la base se observan nueve metros de areniscas de grano medio a grueso con fragmentos fósiles seguido de tres metros de intercalaciones de areniscas margas y calizas marrones, la arenisca es de grano medio con presencia de fragmentos de roca y moldes de amonites.

Más adelante hay un gran banco de treinta y dos metros de areniscas de grano fino de color café pardo, se observa que los bloques presentan estratificación plano paralela, la roca se encuentra muy diaclasada y algunas están rellenas de calcita.

Posteriormente se describieron nueve metros de intercalaciones de margas y calizas marrones diaclasadas y fosilíferas (bivalvos, equinodermos, gasterópodos), se observa estratificación plano paralela y hay presencia de nódulos.

Por último, se observa una capa de cuatro metros de calizas de color gris azulado con fragmentos fósiles de conchas y bivalvos. La caliza se encuentra muy diaclasada, algunas pueden ser casi verticales y medir hasta un metro.

Dentro de la sección estratigráfica descrita se observan principalmente dos ciclos estratigráficos. El primero se observa como un ciclo granodecreciente y va desde la base hasta los primeros doce metros. Seguido de otro granocreciente que va desde los doce metros hasta el tope. Estos ciclos evidencian eventos transgresivos y regresivos, los cuales están evidenciados por las secuencias granodecrecientes y granocrecientes, respectivamente. Con base en la litología observada tales como areniscas y calizas con contenido fósil y nódulos en algunos niveles. Se puede concluir que esta sección representa un ambiente transicional que va de ambientes continentales de alta energía a ambientes marinos someros de baja energía. Esto último es soportado por la abundante cantidad fósiles de origen marino.

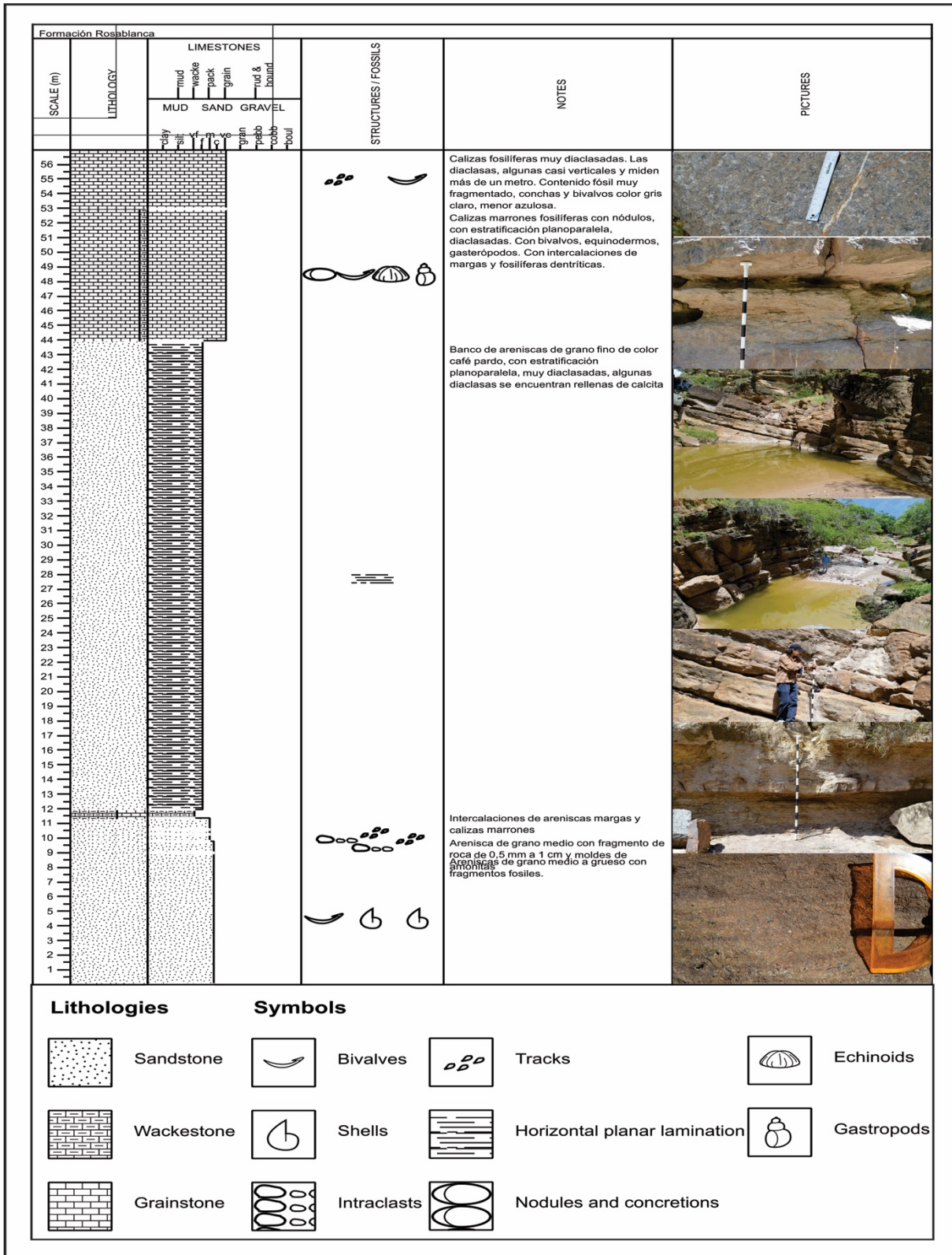


Figura 30. Columna estratigráfica de la Formación Rosablanca a escala 1:200. Fuentes: Autores.

4.2 Factor Geología.

El principal factor que influye en la predisposición geológica para percolación de agua es el tipo de roca; la capacidad de almacenar agua de una roca depende directamente de las diferentes propiedades físicas y químicas de esta, propiedades físicas tales como isotropía, densidad, porosidad, adsorción, absorción, capilaridad; y composición química que determina un factor importante en el almacenamiento de agua como lo es la disolución, por ejemplo, de minerales con carbonato de calcio (figura 31).

Otros factores que se deben tener en cuenta en la relación de las rocas con la predisposición geológica para percolación de agua son la distribución espacial de la formación rocosa, que se pueda acceder al recurso hídrico.

Dados los anteriores factores influyentes hemos determinado que la formación rocosa más importante para el análisis de predisposición para percolación de agua es la Formación Rosablanca, esta formación que litológicamente se compone de calizas lumaquéticas principalmente, y adquiere un gran valor en zonas donde su fracturamiento es alto (porosidad secundaria), o sea zonas en que la roca es más frágil y ha sido fuertemente afectada por esfuerzos tectónicos que acompañados de procesos de disolución de minerales pueden representar importantes zonas de almacenamiento de agua, esto acompañado de la presencia de algunos bancos de arenisca.

Por otra parte, la formación Los Santos también presenta una alta predisposición debido a que su litología es en principal medida compuesta de areniscas de grano medio con una importante porosidad primaria que supera a la de la formación Rosablanca, aun así esta formación pierde importancia en el análisis del recurso hídrico debido a que en la zona de estudio se encuentra a grandes profundidades infrayaciendo a la formación Rosablanca y su distribución geográfica es

desfavorable para la obtención del recurso hídrico ya que en la zona de estudio solo se encuentra aflorando en las partes bajas del cañones del río Chicamocha y Sogamoso lejos de la población.

La formación Paja tiene una distribución geográfica favorable pero su composición litológica no promueve el almacenamiento de agua ya que son principalmente shales o lutitas y su nivel de fracturamiento no es muy representativo; a la formación Tablazo también se le asignó un valor bajo ya que está compuesta en principal medida por calizas fosilíferas con un fracturamiento que no es muy representativo y además está muy poco distribuida por el área de estudio y solo se encuentra en pequeños morros de mayor altura en la zona.

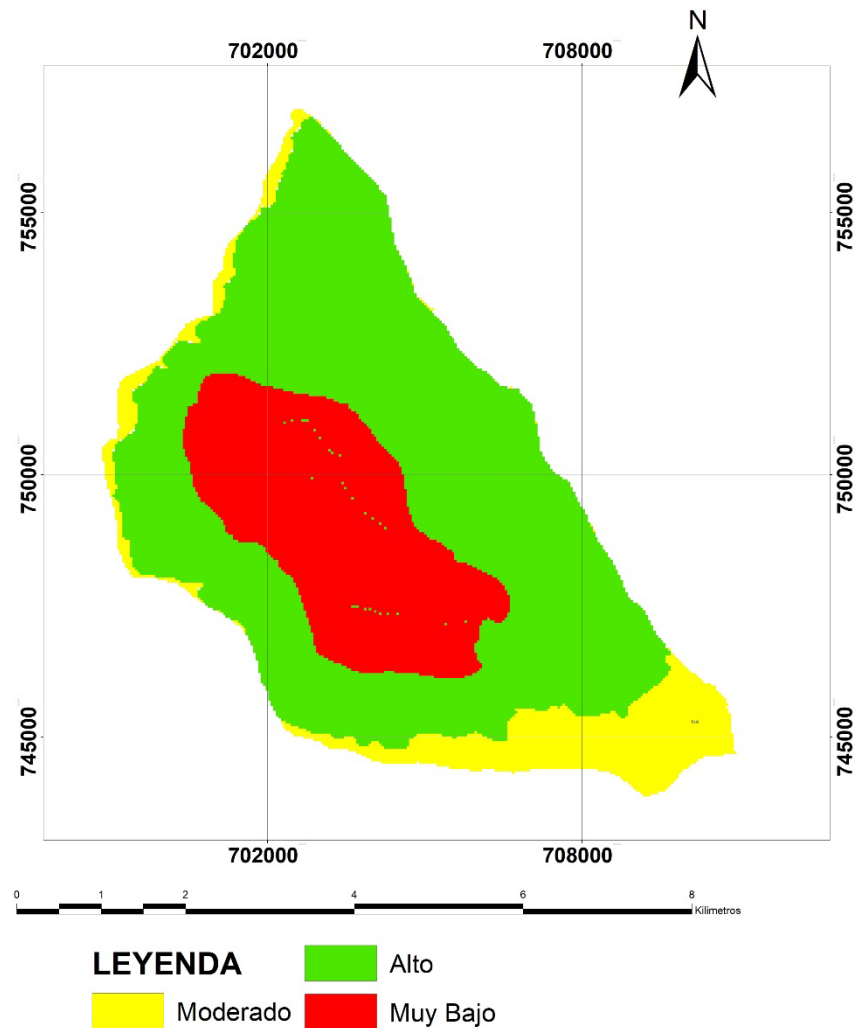


Figura 31. Mapa factor geología. Fuentes: Autores.

4.3 Factor Pendiente.

El gradiente de la pendiente es uno de los factores de influencia más importantes que controla directamente la percolación del agua de lluvia y es ampliamente utilizada en la delimitación de la evaluación de la predisposición para percolación de agua, las pendientes pronunciadas indican una mayor velocidad del agua (figura 32). Por lo tanto, es en las áreas de mayor relieve donde se incrementa la escorrentía que a su vez minimiza el grado de recarga de aguas subterráneas Oikonomidis, D., et al, 2015. Por el contrario de cuando la pendiente es menor, mayor es la cantidad de recarga.

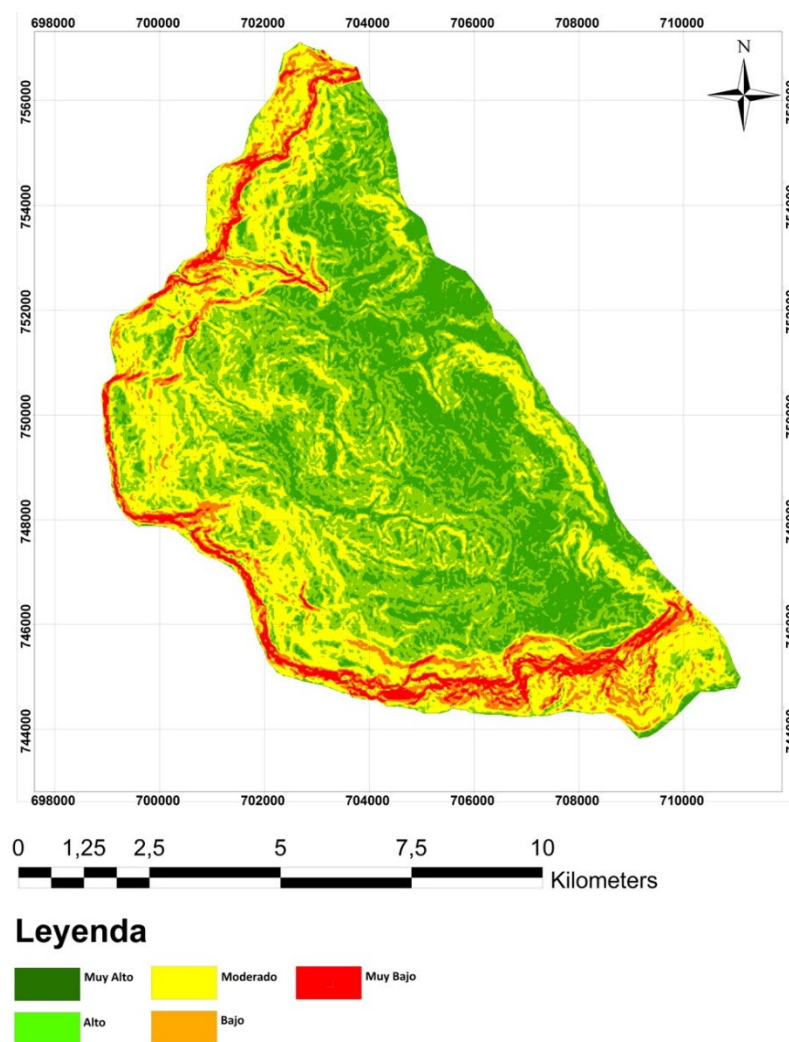


Figura 32. Mapa Factor Pendiente. Fuentes: Autores.

4.4 Densidad de drenaje

La densidad del agua subterránea es igual a la longitud total de todas las corrientes y ríos en una cuenca de drenaje dividida por el área total de la cuenca de drenaje, es una medida de qué tan bien o qué tan mal se drena una cuenca hidrográfica por los canales de las corrientes Oikonomidis, et al, 2015; cuanto más densa es la red drenajes la percolación de agua es mayor (figura 33).

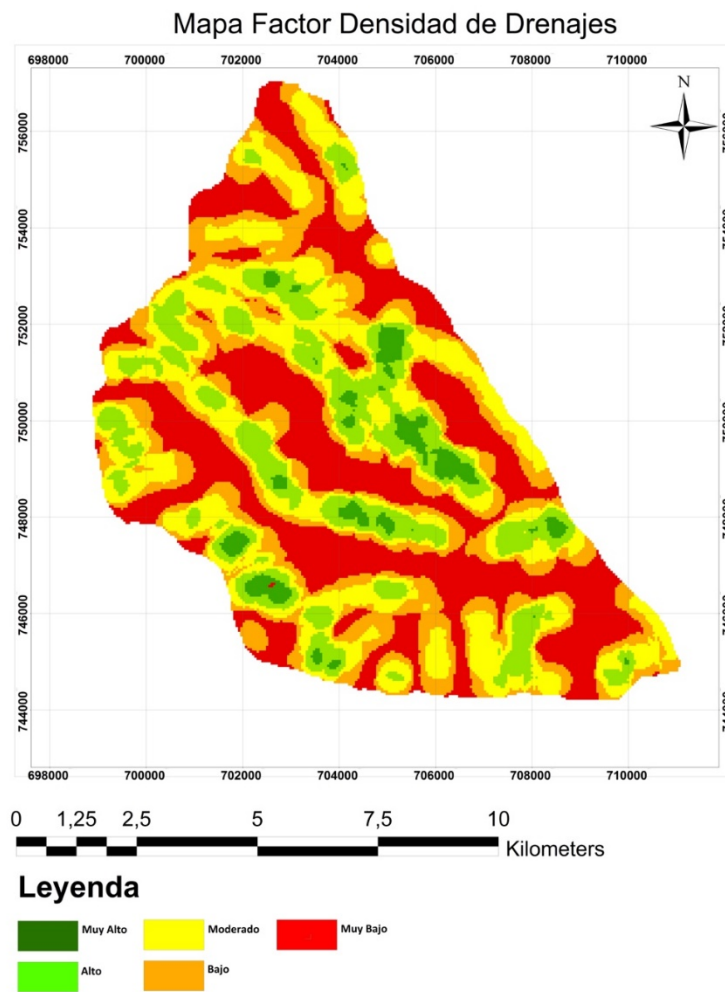


Figura 33. Mapa Factor Densidad de drenajes. Fuentes: Autores.

4.5 Densidad de lineamientos.

Constituye una flexión o rasgo físico cartografiable en la superficie terrestre, es de forma lineal, rectilínea o suavemente curvilínea y por lo general reflejan fenómenos estructurales de subsuelo como las fallas; también describen las zonas de debilidad de la roca que se pueden considerar acuíferos secundarios en afloramientos rocosos debido a su mayor permeabilidad y porosidad (Jamal, N. et al, 2018). La alineación de estos es un buen indicador de la potencialidad de las aguas subterráneas, ya que proporcionan paso al movimiento del agua; cuanto mayor sean los valores de densidad de lineamientos, mayor será la velocidad de percolación del agua subterránea al permitir que el agua superficial llegue más rápido al nivel freático (figura 34).

Se puede notar que, en el área de color rojo, donde no existen fallas y lineamientos, la potencialidad de la presencia de agua subterránea es baja, en contraste con el área de color verde, donde la probabilidad aumenta, se observa alta densidad de los lineamientos en la parte sur-oeste del área de estudio y moderada hacia el Nor-Este de la zona.

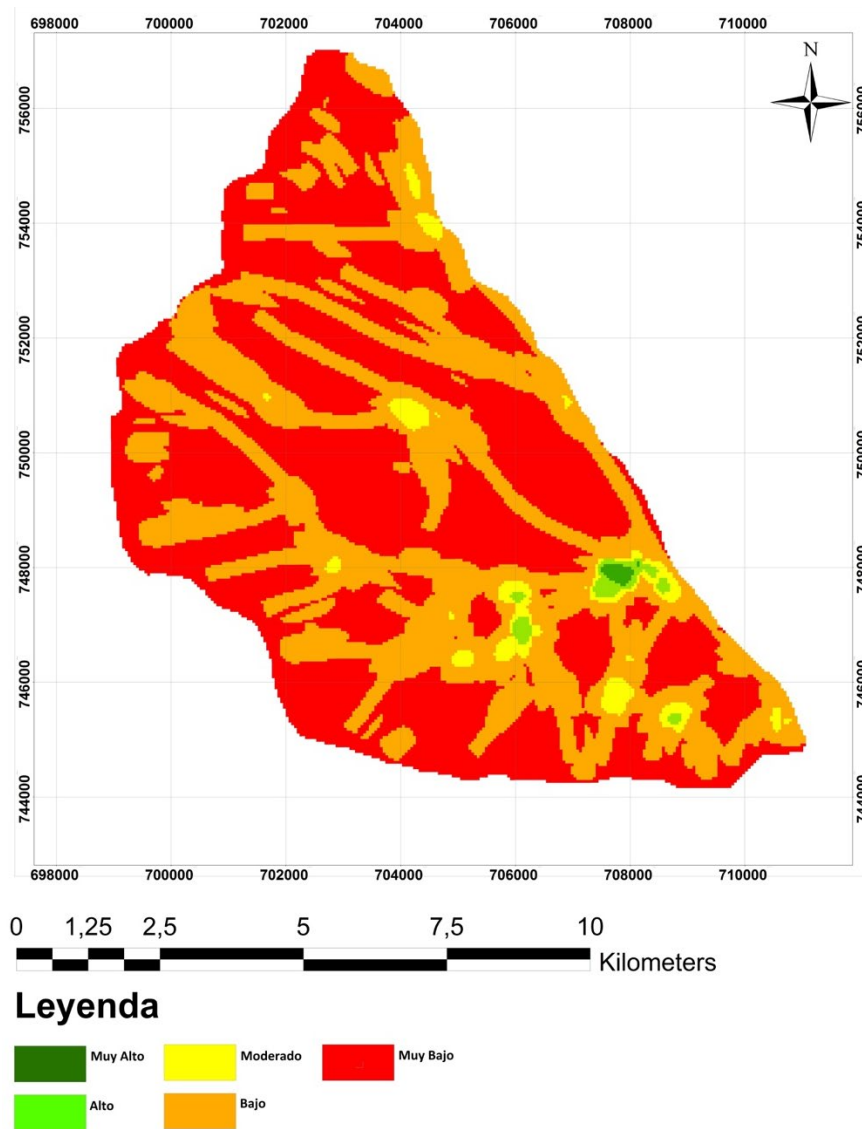


Figura 34. Mapa Factor Densidad de Lineamientos. Fuentes: Autores.

4.6 Mapa de la predisposición geológica para percolación de agua

Gran parte del área presenta una muy baja predisposición para la percolación de agua, específicamente en las veredas La Loma, Laguna Alta y en parte de la vereda Laguna Baja (figura 35). Las zonas delimitadas con color verde junto con las de color amarillo, que corresponden respectivamente a predisposición para percolación de agua alta y moderada, son las áreas con mayor capacidad de recarga de agua, estas áreas son más representativas para propiciar el

almacenamiento de agua subterránea cuando están situadas en lugares distantes de los escarpes, como en las veredas Paso Chico, Laguna Baja y El Pozo.

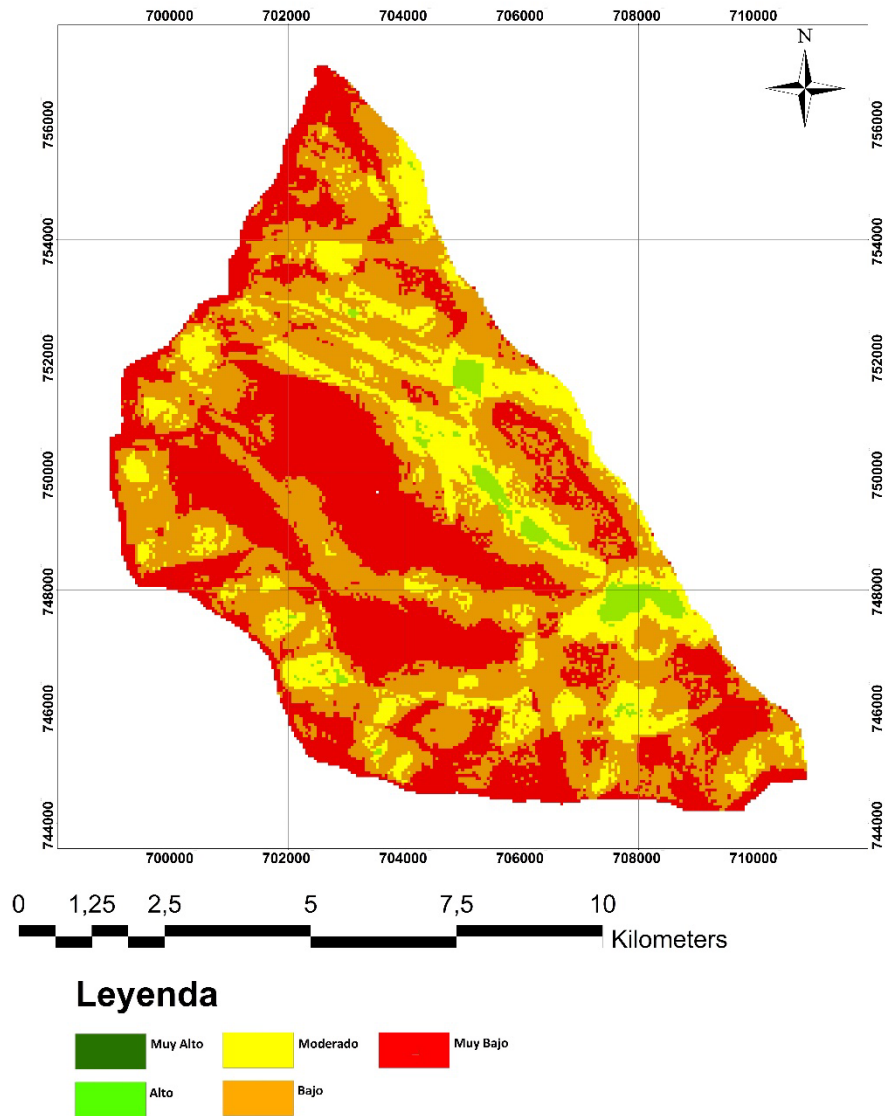


Figura 35. Mapa de la predisposición geológica para percolación de agua. Fuente: Autores.

5. Conclusiones

En términos generales la zona de estudio presenta una baja predisposición para percolación de agua debido a que en gran parte su litología es de poca porosidad a excepción de zonas que están regidas por un dominio estructural haciendo que el agua se infiltre y se profundice por el plano de fractura o de falla.

La existencia de fallas de rumbo dextrales como la Falla La Chivatera y también importantes fallas normales permite que parte del agua proveniente de lluvia y de quebradas paralelas a las fallas, se infiltre hasta encontrar la Formación Rosablanca que en zonas donde esté fracturada o haya presentado disolución, podría almacenar recurso hídrico.

En la formación Rosablanca hacia la vereda Regadero Bajo, se reconoce una zona de roca caliza fracturada; en temporadas de sequía el agua alcanza a subir a la superficie observándose pequeños charcos, mientras que en temporadas de lluvias la roca se satura de agua alcanzando a subir a niveles de 1,30 m sobre la superficie.

El ambiente natural del sur-occidente de Los Santos es semiárido debido a su limitada precipitación y agua superficial, así el agua subterránea podría ser considerada como alternativa de recurso de agua en la zona.

Según lo observado en campo y teniendo en cuenta los resultados del análisis de microcuencas, se considera que las microcuencas con mayor predisposición para la percolación de agua y mejor captación son las 2 y 5. Estas cuencas cubren una gran extensión, la número 2 se ubica en la vereda Regadero Alto, es una cuenca alargada con tendencia a concentrar escurrimiento de lluvias, no presenta la mayor densidad de drenaje, pero sí es la microcuenca con mayor área, por otro lado presenta una de las pendiente más bajas con 14% de inclinación lo que favorece a

que el agua lluvia permanezca más tiempo en superficie. A demás las rocas que conforman esta zona corresponden a la formación Rosablanca y en su mayoría son de tipo calizas fosilíferas, muy fracturadas, lo que favorece la percolación y acumulación de aguas lluvia.

Por el contrario la número 5, donde se ubica la vereda El Pozo presenta un área menor, pero tiene una densidad de drenaje mayor evidenciando una red de drenaje madura y eficiente, tiene una pendiente de 25% reduciendo la cantidad de aguas lluvia que podrían acumularse por percolación en el subsuelo; sin embargo, debido a la morfología de la cuenca y por el tipo de litología esta representa una capa espesa de suelo, lo cual permitiría la elaboración de pozos artificiales para la rápida captación de aguas lluvia en superficie.

Del mapa de la predisposición geológica para percolación de agua se puede concluir que las áreas que muestran un alto potencial se ubican al sureste y se caracterizan litológicamente por ser calizas fosilíferas, estas adquieren un alto valor en zonas donde su fracturamiento es alto (porosidad secundaria), tienen una alta densidad de lineamientos, pendientes suaves y una baja densidad de drenajes.

En base a la gráfica de valores anuales de precipitación se puede concluir que la tendencia de precipitación que presenta el municipio de Los Santos va a la baja, se han ido reduciendo los índices de pluviosidad a medida que el tiempo pasa y debido a que a lo largo de los últimos 5 años el mes de octubre frecuentemente presenta la mayor precipitación mensual, sugerimos este mes como el más óptimo para procesos de recarga artificial de acuíferos o almacenamiento de agua lluvia o de esorrentía. La intensidad de déficit pluviométrica calculada es extrema, lo cual condiciona de gran manera la cantidad de recurso hídrico a disposición de las comunidades afectadas.

6. Recomendaciones

Según los datos reportados por la entidad IDEAM y al análisis de datos de precipitación que se realizó el mayor índice de lluvias en los últimos 12 años se reportó en el mes de octubre. Por el cual proponemos que para el desarrollo de un futuro proyecto enfocado en la captación de agua de lluvia se desarrolle en el mes de octubre.

Se recomienda tener un control más estricto del registro de perforación de pozos para poder elaborar un inventario que facilite la consulta de datos para futuros estudios.

Es recomendable que se brinden capacitaciones a la comunidad relacionadas con el manejo del recurso hídrico.

Referencias Bibliográficas

- ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res; Includes Material
© JAXA/METI 2007. Accessed through ASF DAAC 10 August 2010.
- Cediel, F. (1968). El grupo Girón: una molasa mesozoica de la cordillera Oriental. Bogotá: Boletín Servicio Geológico Nacional.
- Contreras, N. (2008). Analisis del fracturamiento presente en la formacion los santos al noreste y centro de la mesa de los santos, Departamento de Santander. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología, Facultad de Fisicoquímicas. Trabajo de Pregrado.
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. México: Investigación y Ciencia.
- Díaz, E. J., Contreras, N. M., Pinto, J. E., Velandia, F., Morales, C. J., & Hincapie, G. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander. Boletín de Geología. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/boge/v31n1/v31n1a04.pdf>
- Etayo, F. (1983). Mapa de Terrenos geológicos de Colombia. Bogotá: INGEOMINAS.
- Etayo, F., & Rodríguez, G. I. (1985). Edad de la Formación Los Santos. Bogotá: Proyecto Cretácico: INGEOMINAS, Publicación Especial.
- Flórez, A. (2003). Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=bOZIGkStun8C&oi=fnd&pg=PA15&>

dq=Evoluci%C3%B3n+de+sus+relieves+y+modelados&ots=5ZDTjKILfx&sig=dLJBi7_un1mFyQaeMzh29LRDBj8&redir_esc=y#v=onepage&q=Evoluci%C3%B3n%20de%20sus%20relieves%20y%20modelados&f=false

Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.

Gómez, H. (1970). Abastecimiento de aguas subterráneas para el municipio de Los Santos, Santander. Bogotá: INGEOMINAS.

Gómez, H. 1969. Abastecimiento de aguas subterráneas para el municipio de Los Santos (Santander). Informe, INGEOMINAS, Bogotá.

Google. (s.f.). [Mapa de Los Santos, Colombia en Google maps], recuperado el 16 de septiembre, 2017, de:

<https://earth.google.com/web/@6.75573395,73.10230501,1338.66738571a,69360.63857968d,35y0h,0t,Orlas>

HETTNER, A., 1982. Die Kordillere von Bogotá; Pattermans Mitteil. Eng., 22 (104). 1:1-31. Ergänzungsheft

Horton, B.K., Saylor, J.E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., and Stockli, D.F. 2010. Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 122 (9-10): 1423-1442.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (Abril de 2010). Integración Geológica e Hidrogeológica del centro de Santander. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía. Recuperado de:

<http://recordcenter.sgc.gov.co/B10/22005010024690/Documento/pdf/2105246901101000.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Subdirección de Geomorfología y Suelos (SA). (2000). Unidades geomorfológicas del territorio colombiano. Bogotá D.C.: IDEAM - SA.

Jamal, N., Khan, S., Zahid, H., Khan, A., 2017, Delineation of groundwater potential zones using GIS and multi influence factor (MIF) techniques: a study of district Swat, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan, Environmental Earth Sciences (2018).

Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander: Boletín de Geología.

Julivert, M., 1964. La estratigrafía del Cretáceo al W del Macizo de Santander (parte N del Valle Medio del Magdalena y región de Mesas y Cuestas). *Léxique Stratigraphique International*, CNRS - UISG, Paris, V(4ª, Colombie):100 – 108.

Julivert, M., B. D., & Navas, J. (1964). Geología de la mesa de Los Santos. *Boletín de Geología*.

Julivert, M., Barrero, D., & Navas, J. (1964). Geología de la mesa de Los Santos. *BOLETÍN DE GEOLOGÍA*, (18).

Langenheim, R. 1954. Preliminary report on the stratigraphy of the Giron Formation in Santander and Boyaca. Instituto Geológico Nacional Informe 1011. Bogota.

M, Julivert, D, Barrero, J. NAVAS G. 1964. Geología de la Mesa de Los Santos. Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología. N° 18.

Miall, A.D. (2000). Principles of sedimentary basin analysis. Springer Berlin Heidelberg, 3rd printing.

- Mojica, J. Cuencas Catatumbo, Cesar – Ranchería, Cordillera Oriental, Llanos Orientales, Valle Medio y Superior del Oriental, Llanos Orientales, Valle Medio y Superior del Magdalena. Subdirección Técnica ANH. Diciembre, 2009.
- Morales, L.G., Podesta, D.J., Hatfield, W.C., Tanner, H., Jones, S.H., Barker, M.H.S., O'Donoghue, D.J., Mohler, E.P., Dubois, E.P., Jacobs, C., and Goss, C.R. 1958. General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia. In Weeks, L.G. (Ed.). Habitat of Oil, Symposium: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, pp. 641-695.
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., & Voudouris, K. (2015). A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415002279>
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., Voudouris, K., 2015, A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece, *Journal of Hydrology*, N°525 (2015) 197–208
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP). (1984). Provisional methodology for assesment and mapping of desertification. Rome, Italy: FAO-UNEP.
- Pinto, J. E., Torres, J. C., Isidro, S. G., & Toledo, D. (2008). Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos y sector Nordeste de Curití. Bogotá D.C.: Informe Interno INGEOMINAS.
- Pinto, J. *et al.* 2009. Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander. *Boletín de Geología*. Vol. 31, N° 1, enero - junio de 2009.

- Pulido, O. 1985. Reseña explicativa del Mapa geológico preliminar de la Plancha 135 (San Gil). INGEOMINAS, Bogotá, 6p.
- Red de Información Ambiental de Andalucía REDIAM. 2014. Mapa de intensidad del déficit pluviométrico, Andalucía.
- Royero, J. M., & Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado departamento de Santander, escala 1:300.000, Memoria explicativa. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía : <https://es.scribd.com/document/255140510/Memoria-Explicativa-Mapa-Geologico-Del-Departamento-de-Santander-2001>
- Royero, J. M., y Clavijo, J. 2001. Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander, Escala 1:400.000. Memoria Explicativa, INGEOMINAS, Bogotá, 92p.
- SedLog: a shareware program for drawing graphic logs and log data manipulation", D. Zervas, G.J. Nichols, R. Hall, H.R. Smyth, C. Lüthje and F. Murtagh, Computers & Geosciences, 35, 2151-2159, 2009. <http://www.secretosparacontar.org/Lectores/Contenidosystemas/Bosquessecotropicales.aspx?CurrentCatId=264>
- Scanlon, B.R.; Hwaly, P.G.; Cook, Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, No. 10: (2002). p. 18-39
- Servicio geológico colombiano, SGC. 2012. Informe mapa de unidades geomorfológicas de la plancha 120 escala 1:100.000. Bogotá. 54p.
- Subdirección de Recursos del Subsuelo de Ingeominas. (2010). Exploración de aguas subterráneas en la región central de Santander. Bucaramanga: INGEOMINAS.
- Tricart, J. 1968. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. Revisión geográfica de los Pirineos y el Suroeste. Sudoeste europeo. pp. 249-272.

- Ulloa, A. M., & Gómez, S. (Abril de 2007). Investigación geológica e hidrogeologica en el Macizo de Santander. Obtenido de Instituto Colombiano de Geología y Minería y Universidad Industrial de Santander:
<http://recordcenter.sgc.gov.co/B10/22005005024661/Documento/pdf/2105246611101000.pdf>
- Vargas O., Güiza, S., & Gonzalez, L. (2005). Geoquímica del suroriente de la plancha 5-06 departamentos de Santander y Norte de Santander. INGEOMINAS.
- Vélez Otálvaro, M. V. (s.f.). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Universidad Nacional –Medellín.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Restrepo, H., & Cruz, J. (1973). Mapa geológico del cuadrangulo H-12 Bucaramanga Escala 1:10000. Bogotá: Ingeominas.
- Ward, D., Goldsmith. 1973. Geología de Los Cuadrángulos H12 y H13, Bucaramanga y Pamplona Volumen XXI, Numero 1-3. INGEOMINAS.
- Ward, D.E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H. & Gómez, E. 1973. Mapa geológico del Cuadrángulo H-12 Bucaramanga. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá.
- Wheeler, O. 1939. Report on the Palmira series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama and La Paz formation near the eastern part of the Mares Concession. Int. Emp. Col. Petr.
- Zamarreño de Julivert, I. 1963. Estudio Petrográfico de las calizas de la Formación Rosablanca de la región de La Mesa de los Santos. Boletín de Geología N° 15, pp. 5-34 .UIS. Bucaramanga.