

INFILTRACIÓN POTENCIAL SOBRE LA CUENCA ARROYO GRANDE DE LA SABANA Y SU APOORTE A LA RECARGA DEL ACUIFERO MORROA, SUCRE, COLOMBIA



FELIX ANTONIO DOMINGUEZ PEREZ

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Ambientales

Director:

TEOBALDIS MERCADO FERNÁNDEZ
PhD. HIDROCIENCIAS



UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERIA
Sincelejo
2018

Notas de aceptación:

Firma de presidente del jurado

Firma del jurado 2

Firma del jurado 3

Sincelejo, fecha (día, mes, año)

RESUMEN

Las Aguas subterráneas son la principal fuente de abastecimiento para las zonas de Clima árido y semiárido, como lo es el departamento de Sucre. Los principales aportes para las recargas de los acuíferos se dan por los procesos de precipitación e infiltración. Por tanto, todas las acciones, trabajos e investigaciones que permitan conocer a fondo las dinámicas hidrológicas tanto superficiales como subsuperficial aportan de forma poderosa en la gestión y preservación del recurso Hídrico. La siguiente investigación se enfoca en conocer el potencial de Infiltración sobre la cuenca del Arroyo Grande de la Sabana (AGS), y Recarga natural al acuífero de Morroa sobre las áreas de mayor infiltración dentro de la cuenca de estudio. Los métodos utilizados fueron el análisis Morfométrico de la cuenca para describir su respuesta antes los eventos, análisis de precipitaciones, la estimación de la Infiltración potencial y la escorrentía mediante el Numero de Curva, apoyados en las herramientas SIG; Para la estimación de la Recarga, en sitios definidos con alto potencial de infiltración, se aplicó el método del Balance de masas de Ion Cloruro en zona no saturada. La zona de estudio es la más poblada del departamento e intercepta una franja importante del Acuífero de Morroa, del cual extraen agua los centros urbanos y rurales de Sincelejo, Corozal, Morroa, los Palmitos entre otros.

Palabras claves: (Infiltración potencial, recarga, Número de Curva, Balance de cloruro).

ABSTRACT

Groundwater is the main source of supply for the arid and semi-arid zones, Sucre – Colombia belongs to this type of zone. The main contributions for the recharges of the aquifers, are given by the processes of precipitation and infiltration. Therefore, all the actions, works and investigations that allow to know in depth the hydrological dynamics both superficial and subsurface contribute in a powerful way in the management and preservation of the water resource. The following research focuses on the potential of Infiltration on the Arroyo Grande de la Sabana basin (AGS), and the natural recharge to the Morroa aquifer on the areas of greatest infiltration within the study basin. The methods used were the morphometric analysis of the basin to describe its behavior before the events, rainfall analysis, the estimation of potential

infiltration and runoff through the Curve Number, supported by the GIS tools; For the estimation of the recharge, in defined sites with high infiltration potential, the method of mass balance of chloride ion in unsaturated zone was applied. The study area is the most populated of the department and intercepts an important part of the Morroa Aquifer, from which the urban and rural centers of Sincelejo, Corozal, Morroa, los Palmitos and others draw water.

Key words: (Potential infiltration, recharge, Curve number, Chloride balance, Morphometry).

Tabla de contenido

Contenido

RESUMEN.....	III
Lista de Figuras	VII
Lista de Tablas	IX
Lista de Ilustraciones	X
INTRODUCCIÓN.....	1
1. ESTRUCTURA TEORICA, CONCEPTUAL Y AREA DE ESTUDIO.....	4
1.1. Marco teórico	4
1.1.1. Ciclo Hidrológico.....	4
1.1.2. Infiltración	6
1.1.3. Recarga.....	8
1.1.4. Cuenca Hidrográfica.....	8
1.2. Marco Conceptual	9
1.3. Área de Estudio	13
1.3.1. Localización, Fisiografía y Descripción	13
1.3.2. Factores Climáticos.....	16
1.3.3. Geología.....	16
1.3.4. Hidrogeología.....	17
1.3.5. Cuenca Arroyo Grande de la Sabana (AGS)	23
1.4. Diseño metodológico	25
2. ANALISIS MORFOMETRICO E HIDROLOGICO DE LA CUENCA ARROYO GRANDE DE LA SABANA.....	26
2.1. Introduccion	26
2.2. Materiales y Métodos	27
2.1.1. Metodología	27
2.3. Resultados y Discusión.....	31
2.2.1. Propiedades de la Superficie	31
2.2.2. Propiedades del Patrón de Drenaje.....	38
2.2.3. Propiedades de la Red Hídrica	40
2.2.4. Tiempo de Concentración.....	42
2.2.5. Inferencias Hidrológicas	43

2.2.6. Análisis de la Precipitación en la Cuenca Arroyo Grande de la Sabana (AGS)	44
3. ESTIMACIÓN DE LA INFITRACIÓN POTENCIAL EN LA CUENCA ARROYO GRANDE DE LA SABANA	48
3.1. Introducción	48
3.2. Materiales y Métodos	49
3.2.1. Numero de Curva	49
3.2.2. Metodología	54
3.3. Resultados y Discusión.....	56
3.3.1. Cobertura del Terreno.....	56
3.3.2. Grupos Hidrológicos de Suelo (GHS)	59
3.2.1. Distribución espacial del NC	60
3.2.2. Estimación de Infiltración potencial.....	64
3.2.3. Estimación de Escorrentía.....	68
4. CUANTIFICACIÓN DE LA RECARGA AL ACUIFERO MORROA SOBRE LA CUENCA ARROYO GRANDE DE LA SABANA	69
4.1. Introducción	69
4.2. Materiales y Métodos	72
4.2.1. Balance del ion Cloruro	72
4.2.2. Marco Hidrogeológico.....	74
4.2.3. Metodología	76
4.3. Resultados y Discusión.....	80
4.3.1. Caracterización del contenido de Cloruro en la Precipitación	80
4.3.2. Recarga del Acuífero Morroa	81
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
5.1. Conclusiones	92
5.2. Recomendaciones	94
ANEXO A. Resultados de Análisis de Cloruros en agua de precipitación para los diferentes puntos de muestreo.	96
ANEXO B. Resultados de Análisis de Cloruros en perfil de suelos para los diferentes puntos de muestreo.	97
BIBLIOGRAFIA.....	98

Lista de Figuras

Figura 1. Ciclo del agua.	5
Figura 2. La cuenca hidrológica como sistema.	9
Figura 3. Clasificación de acuíferos por estructura y grado de confinamiento.....	11
Figura 4. Subregiones Sucre.	14
Figura 5. Hidrografía Sucre.	15
Figura 6. Acuífero Sucre zona norte.	18
Figura 7. Mapa Hidrogeológico del Acuífero de Morroa..	20
Figura 8. Localización de la cuenca Arroyo Grande de la Sabana (AGS)	23
Figura 9. DEM Cuenca AGS.	32
Figura 10. Aspecto u orientación cuenca AGS (grados).....	33
Figura 11. Mapa de Pendientes cuenca AGS (grados).....	35
Figura 12. Mapa de Relieve cuenca AGS (m.s.n.m.)	36
Figura 13. Curva Hipsométrica cuenca AGS.	37
Figura 14. Mapa de Orden de la Red Hídrica cuenca AGS	41
Figura 15. Precipitación Total Mensual Multianual - Estación Aeropuerto Rafael Barvo	45
Figura 16. Evolución de Precipitación Total anual - Estación Aeropuerto Rafael Barvo	45
Figura 17. Precipitación máx. 24 horas para diferentes periodos de retorno - cuenca AGS	46
Figura 18. Precipitación total anual para diferentes periodos de retorno - cuenca AGS	46
Figura 19. Diagrama de flujo del Método CN y S.....	55
Figura 20. Mapa de Cobertura del terreno sobre la cuenca AGS	57
Figura 21. Mapa de Grupos Hidrológicos de suelos cuenca AGS	59
Figura 22. Mapa del Número de Curva de la cuenca AGS	63
Figura 23. Mapa Retención Potencial Máxima S en la cuenca AGS.....	67
Figura 24. Precipitación - Escorrentía Mes multianual cuenca AGS	68
Figura 25. Los diferentes mecanismos de recarga en áreas áridas y semiáridas. Adaptado de Lerner 1997- (Vries & Simmers, 2002).	69
Figura 26. Concentraciones de Cloruro en agua de pozos profundos de la zona norte de la cuenca AGS	75
Figura 27. Puntos de muestreo del Cloruro en agua de precipitación y en perfiles de suelo en la zona norte de la cuenca AGS.....	82
Figura 28. Perfil de zona no saturada, Humedad y concentraciones de Cloruro para el sitio PM1 (Sabanas de Cali - Corozal).....	84
Figura 29. Perfil de zona no saturada, Humedad y concentraciones de Cloruro para el sitio PM2 (Piletas - Corozal).....	84
Figura 30. Perfil de zona no saturada, Humedad y concentraciones de Cloruro para el sitio PM3 (Bremen - Morroa).....	85

Figura 31. Perfil de Cloruro en los diferentes puntos de muestreo.....	85
<i>Figura 32. Recarga estimada con agua freática sobre la zona de mayor Infiltración potencial de la cuenca AGS</i>	<i>89</i>

Lista de Tablas

Tabla 1. Formaciones geológicas y profundidad de los niveles freáticos. Adaptado de (Jimenez & Rodriguez, 2008).	18
Tabla 2. Acuíferos en la zona de microcuenca Arroyo Grande de la Sabana. Adaptado de (CARSUCRE, 2016b).	19
Tabla 3. Niveles Acuíferos de la formación Morroa.	22
Tabla 4. Fases de la Investigación.	25
Tabla 5. Ecuaciones de Tiempos de Concentración. Adaptado (U. J. J. Vélez & Botero, 2011)	28
Tabla 6. Propiedades dimensionales y de superficie.	29
Tabla 7. Propiedades de la Red hídrica.	29
Tabla 8. Propiedades del patrón de drenaje.	30
Tabla 9. Propiedades de Superficie y Patrón de drenaje de la cuenca AGS.	31
Tabla 10. Aspectos de la Red Hídrica AGS.	40
Tabla 11. Tiempos de Concentración cuenca AGS.	42
Tabla 12. Precipitación máx. 24 horas para diferentes periodos de retorno cuenca AGS.	45
Tabla 13. Precipitación total anual para diferentes periodos de retorno cuenca AGS.	46
Tabla 14. Días de precipitación, TMM y Evapotranspiración, estación Apto. Rafael Barvo.	47
Tabla 15. Equivalencias entre las clases de texturas del USDA y los grupos hidrológicos.	52
Tabla 16. Categorías de coberturas para Pastos y Bosque.	54
Tabla 17. Categorías de la Cobertura del Terreno cuenca AGS.	58
Tabla 18. Grupos Hidrológicos del suelo en la cuenca AGS.	60
Tabla 19. NC en la cuenca AGS.	62
Tabla 20. S, Potencial Máximo de Retención en la cuenca AGS.	65
Tabla 21. Escorrentía potencial mensual en la cuenca AGS.	68
Tabla 22. Valores de Cloruro en Piezómetros. (CARSUCRE, 2005, 2018; HELMUTH et al., 2002)	75
Tabla 23. Valores de Cloruro en el Arroyo Grande de la Sabana. (CARSUCRE, 2018)	76
Tabla 24. Valores medios de Cloruro en Precipitación zona de estudio.	80
Tabla 25. Perfil de cloruro en suelo PM1 Sabanas de Cali.	83
Tabla 26. Perfil de cloruro en suelo PM2 Pileta.	83
Tabla 27. Perfil de cloruro en suelo PM3 Bremen.	83
Tabla 28. Cloruro en agua freática de pozos y estimación de la Recarga. Fuente Propia.	88

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Punto de muestreo 1. Perfil de suelo en ZNS (PM1), sector Sabanas de Cali - Morroa.....	78
Ilustración 2. Punto de muestreo 2. Perfil de suelo en ZNS (PM2), sector Pileta – Corozal.....	78
Ilustración 3. Punto de muestreo 3. Perfil de suelo en ZNS (PM3), sector Pileta – Corozal.....	79

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de recursos hídricos es uno de los grandes problemas a los cuales se enfrenta gran parte de los centros poblados del departamento de Sucre. Pese a que Colombia es uno de los países reconocidos por su gran riqueza en cuanto al recurso hídrico, en la zona norte del país se presentan índices de aridez entre moderado a deficitario en cuanto a la disponibilidad de agua superficial (IDEAM, 2014). La región sabana del departamento de Sucre no cuenta con fuentes superficiales de agua disponibles para el consumo humano ni las actividades productivas. Por lo que gran parte de los municipios hacen uso de las fuentes subterráneas para satisfacer las necesidades de la población.

Los acuíferos son la principal fuente de abastecimiento en estas zonas y por tanto son considerados sistemas estratégicos (IDEAM, 2014). Alrededor de una población de 953.256 habitantes se benefician de estas fuentes dándoles usos tanto domésticos como productivos (CARSUCRE, 2016a). Sobre el acuífero de Morroa, se han realizado numerosos estudios que han ayudado a identificar las características Geológicas, Hidrogeológicas y Químicas siendo bases indispensables para el conocimiento de su dinámica (CARSUCRE, 2005; HELMUTH, GUBERNEY, & RODRIGUEZ, 2002; Jimenez & Rodriguez, 2008).

La demanda actual sobre los recursos hídricos subterráneos genera una explotación intensa causando el mayor problema al que se enfrenta los acuíferos. Los balances hídricos realizados por la entidad de control (CARSUCRE, 2016a) muestran datos de extracción calculados sobre los acuíferos de Morroa, Betulia y Roble esta alrededor de unos 51.350.000 m³ anuales, con tendencias al aumento pues se evidencian incrementos considerables en la población lo que de forma directa se refleja en mayores caudales a extraer; como muestra de esta situación se presentan los cambios en los niveles a los cuales se extrae el agua, que pasaron de 100 hasta más de 800 metros de profundidad.

La recarga natural de los acuíferos se da por la infiltración del agua desde las primeras capas del suelo hasta llegar a las formaciones acuíferas y son el mayor aporte para el sostenimiento de estas fuentes de agua. Las recargas estimadas para

la zona del acuífero de Morroa están en el orden del 11% de lo extraído; para el acuífero Betulia y Roble estos datos son desconocidos. Las diferencias considerables entre las extracciones y las recargas dan muestra que no es sostenible este tipo de operación; sumado a lo anterior, es bien sabido que los valores de las recargas se ven afectados por los cambios de uso, formas y pendientes del suelo, las afectaciones sobre la cobertura vegetal y los cambios en las intensidades de los eventos de precipitación, lo que convierte la infiltración en un parámetro de vital control para llevar a cabo buenas gestiones del recursos hídrico.

Las cuencas u hoyas hidrográficas, son áreas de control para la medición y estudios de los parámetros hidrológicos de las regiones (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014). La cuenca Arroyo Grande de la Sabana, es la más pobladas del departamento de Sucre, albergando alrededor de 52% de la población (CARSUCRE, 2016a) y dentro de su área intercepta diferentes acuíferos de gran interés como son los acuíferos Morroa, Betulia y Roble. Sobre esta cuenca se han realizado estudios de características de aguas superficiales encontrando que su cauce principal presenta contaminación por el vertimiento de las aguas residuales urbanas que descargan sobre ella varios municipios, el aporte que se genera por estas aguas hacía las capas superficiales de los acuíferos no ha sido objeto de estudios.

Para realizar una gestión integral del recurso hídrico es importante tener información con mayor alcance y nivel de detalle (García, Botero, Bernal, & Ardila, 2012). Los diferentes estudios llevados a cabo ayudan a identificar zonas de recargas y dan a conocer valores de recargas puntuales (Jimenez & Rodriguez, 2008) pero se ve limitado para llevar a cabo una gestión a nivel regional.

Las situaciones expuestas, generan una gran incertidumbre llevándonos a cuestionar ¿Cuál es la infiltración que se genera sobre las áreas de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande de la Sabana?, ¿Cuál es su aporte sobre la recarga de los acuíferos que se interceptan con ella?, además que nos deja otra inquietud relacionada con la calidad del agua, ¿Que tanto puede afectar las condiciones de infiltración de aguas contaminadas las capas de los acuíferos? De la situación planteada surge la siguiente hipótesis, *La infiltración sobre la cuenca Arroyo Grande de la Sabana es baja y genera una baja recarga al acuífero de Morroa.*

El objetivo principal de este trabajo de investigación es Determinar la Infiltración potencial sobre la cuenca Arroyo Grande de la Sabana y su efecto sobre la Recarga en el acuífero Morroa. Para alcanzar este objetivo se desarrollaron los Objetivos Específicos:

- Determinar los parámetros Hidrológicos y las características morfométricas de la cuenca Arroyo Grande de la Sabana.
- Estimar la infiltración potencial en la cuenca Arroyo Grande de la Sabana.
- Evaluar la Recarga natural del acuífero de Morroa en las áreas de mayor infiltración potencial sobre la cuenca del Arroyo Grande de la Sabana

El documento se organiza en cinco capítulos que abarcan y desarrollan los temas planteados. El primer capítulo realiza una descripción general del área de estudio, los marcos de referencia y el diseño metodológico utilizado. Los capítulos 2, 3 y 4 desarrollan los métodos, tales como los indicadores cuantitativos morfométricos, el método del Número de Curva y el Balance de cloruro, respectivamente. En ellos se tratan los métodos y materiales, los resultados y análisis de los resultados obtenidos. En el capítulo cinco, se presentan las conclusiones generales del estudio.

1. ESTRUCTURA TEORICA, CONCEPTUAL Y AREA DE ESTUDIO

1.1. Marco teórico

1.1.1.Ciclo Hidrológico

El agua está presente en la tierra en sus tres fases: líquida, sólida y gaseosa; como también está presente en los diferentes medios a los que tiene acceso el ser humano como son la atmosfera, los mares y océanos, y las masas terrestres. Dado a que el agua puede desplazarse fácilmente de un medio a otro, cambiar de estado y cualidades en respuesta a su entorno, constituye un medio físico dinámico, tanto en el espacio como en el tiempo. El sistema mundial de repositorios de almacenamiento de agua y las múltiples vías de comunicación entre todos ellos está considerado como el ciclo hidrológico, (OMM, 2011).

El movimiento permanente del ciclo hidrológico se debe fundamentalmente a dos causas, primera: El Sol que proporciona energía para elevar las aguas (Evaporación), la segunda: la Gravedad terrestre que hace que el agua condensada, descienda y se movilice (precipitación y escurrimiento).

Los procesos que componen la dinámica del ciclo son la precipitación, intercepción, almacenamiento, infiltración, esorrentía, percolación, evaporación y transpiración. El comportamiento del agua en cada proceso es diferente tanto temporal como espacialmente.

Evaporación: transformación del agua líquida en gas cuando se mueve desde la tierra o las fuentes de agua hacia la atmosfera.

Transpiración: proceso en el cual las plantas disipan agua en forma de vapor desde las hojas y otras superficies.

Precipitación: se entiende como el vapor de agua condensado que cae a la superficie de la tierra, sea en forma de lluvia, nieve, granizo, niebla entre otros.

Intercepción: es la precipitación que intercepta el follaje de las plantas, se evapora y vuelve nuevamente a la atmosfera.

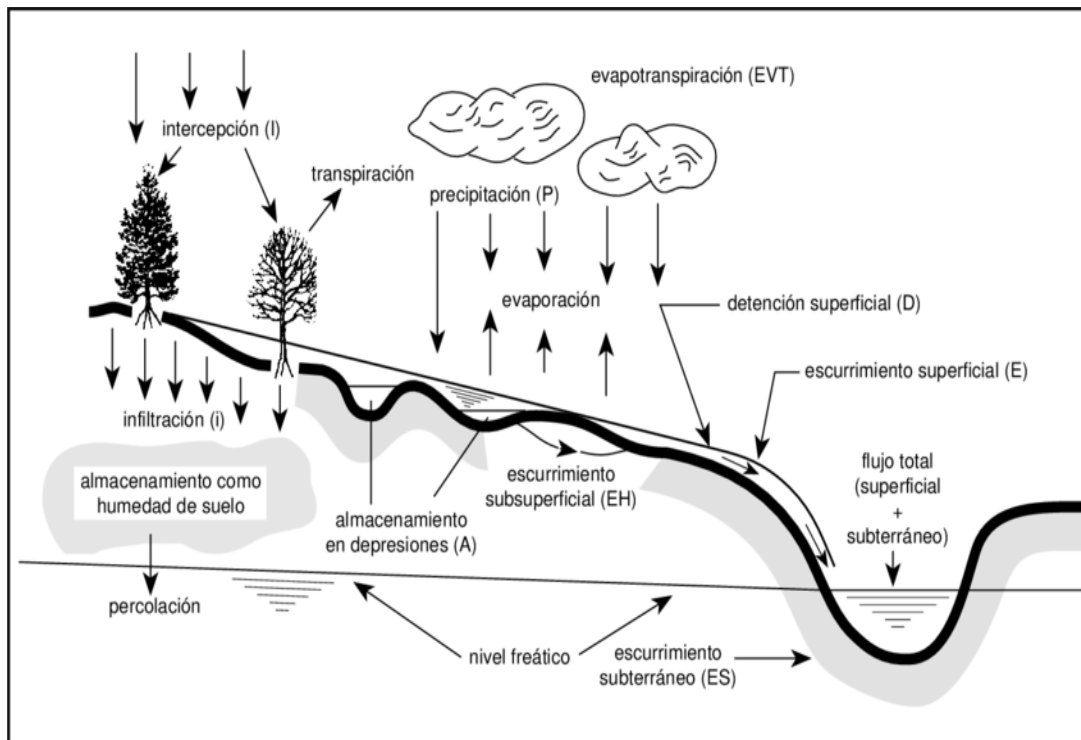


Figura 1. Ciclo del agua. Fuente: (Vincenti, 2016)

Escurrentía: Es la parte de la precipitación que se abre camino hacia las corrientes, los lagos o el océano a través del flujo superficial o subsuperficial. Antes que la escurrentía ocurra, la precipitación debe satisfacer las demandas iniciales de evaporación, intercepción, infiltración y retención superficial. (NSCS, 1999a).

Almacenamiento: Los reservorios almacenan agua y aumenta la cantidad de agua que se evapora y se infiltra.

Infiltración: El movimiento descendente del agua desde la superficie de la tierra hasta el subsuelo o las rocas porosas.

Percolación: Movimiento del agua a través del perfil de suelo, se le conoce como la infiltración que se da por debajo de la zona radicular.

1.1.2. Infiltración

Si bien la definición de infiltración es simple, involucra todos los aspectos del flujo a través de un medio poroso saturado variable, en sus diferentes estados sean estacionarios o dinámicos; flujo saturado en un medio homogéneo, isotrópico a transitorio, flujo inestable e insaturado a través de un flujo anisotrópico heterogéneo medio (Ferré & Warrick, 2005).

En una primera etapa la infiltración satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie (abstracción inicial), y posteriormente superando cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos.

La infiltración está gobernada por dos fuerzas, la gravedad y la acción capilar. Mientras que los poros pequeños ofrecen una mayor resistencia a la gravedad, los poros muy pequeños extraen el agua a través de la acción capilar además e incluso contra la fuerza de la gravedad.

La velocidad y el patrón de infiltración varían con la distribución y la velocidad con que se suministra agua a la superficie del suelo, la profundidad del nivel freático, las propiedades hidráulicas de los materiales del subsuelo y la distribución del contenido de humedad del antecedente (Ferré & Warrick, 2005). La tasa de infiltración es una medida de la velocidad a la que un suelo en particular puede absorber la lluvia o el riego. Se mide en pulgadas por hora o milímetros por hora. La velocidad disminuye a medida que el suelo se satura.

El agua infiltrada tendrá varias dinámicas de movimiento, parte de ella permanecerá en la capa del subsuelo poco profundo, donde se moverá gradualmente cuesta abajo a través del suelo y finalmente entrará en la corriente por filtración hacia la orilla del arroyo o corriente de agua. La otra parte del agua puede infiltrarse en acuíferos subterráneos mucho más profundos generando la recarga de este. El agua puede

viajar largas distancias o permanecer almacenada por largos períodos antes de regresar a la superficie (USGS, 2016).

La cantidad de agua que se absorberá en el tiempo depende de varias características de la cuenca:

- Características del suelo: Los suelos arcillosos y con limos absorben agua a un ritmo más lento que los suelos arenosos. Los suelos que absorben menos agua tienen como resultado una mayor escorrentía.
- Saturación del suelo: El suelo ya saturado por las precipitaciones anteriores no puede absorber mucho, por lo tanto, más precipitaciones se convertirán en escorrentías superficiales.
- Cubierta de la tierra: algunas cubiertas de tierra tienen un gran impacto en la infiltración y la escorrentía de lluvia. Las superficies impermeables, como estacionamientos, carreteras y desarrollos urbanos, actúan como un "carril rápido" para la lluvia, justo en los desagües pluviales que drenan directamente en las corrientes. Las inundaciones se vuelven más frecuentes a medida que aumenta el área de superficies impermeables.
- Pendiente de la superficie: el agua que cae en terrenos con pendientes pronunciadas corre más rápido que el agua que cae sobre un terreno plano.

Los métodos para medir la Infiltración pueden ser directos e indirectos. Los métodos directos, valoran la cantidad de agua infiltrada sobre un punto específico; las técnicas más conocidas son la de Lisímetros, Infiltrómetros y Simuladores de Lluvia. Los métodos Indirectos determinan la capacidad de infiltración (Retención potencial máximo) considerando datos controlados del ciclo hidrológico y propiedades particulares de la cuenca de estudio; Una de las técnicas más utilizadas es la del Número de Curva, este método se detalla en el capítulo 3. Para la buena determinación de la infiltración por este método es importante considerar factores como el grupo hidrológico de suelo (HGS), el tipo de cobertura, el tratamiento, la condición hidrológica y la condición de escurrimiento antecedente (ARC).

1.1.3. Recarga

La recarga se define como la entrada de agua infiltrada hacia la zona saturada del suelo, donde comienza a ser parte de las reservas subterráneas. Este proceso se da por la fuerza de gravedad y las mismas condiciones hidráulicas de las capas del perfil, (M. V. Vélez & Vásquez, 2004). Las formas de recarga natural a los acuíferos son por agua lluvia, por aguas superficiales y por transferencias en acuíferos. Dentro de las recargas naturales se distingue dos tipos Recarga directa y Recarga indirecta (Ruiz, Álvarez, & Marinero, 2003).

1.1.4. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un área de tierra que drena todas las corrientes y las precipitaciones hacia una salida común, como la salida de un embalse, la desembocadura de una bahía o cualquier punto a lo largo del canal de un arroyo (Mora, Pissarra, & Galbiatti, 2009). Los puntos topográficos más altos separan dos cuencas hidrológicas se llaman divisoria de drenaje. La cuenca hidrográfica está compuesta por agua superficial (lagos, arroyos, embalses y humedales) y todas las aguas subterráneas subyacentes y a nivel general, Las cuencas de áreas grandes contienen muchas cuencas hidrográficas más pequeñas (USGS, 2016).

Las cuencas hidrográficas tienen una alta importancia pues son utilizadas como unidades de control y referencia para los estudios hidrológicos y de planeación territorial-ambiental. También, porque el caudal y la calidad del agua de un río o cuerpos receptores de agua se ven afectados por factores inducidos sobre ella sean de tipo natural o antrópico, que ocurran en el área terrestre aguas arriba del punto de salida (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014).

La dinámica de la cuenca se representa como un sistema abierto donde existen entradas, procesos (propios de las características) y salidas. Generalmente es un comportamiento complejo el cual debe analizarse de forma integral.



Figura 2. La cuenca hidrológica como sistema. Fuente. (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014)

Morfología de la Cuenca Hidrológica

Se entiende la Morfología como el estudio de la formas de la superficie terrestre (Mora et al., 2009). La morfología describe las formas mediante datos e indicadores cuantitativos que dan a conocer las dinámicas del flujo, respuestas hidrológicas y los tipos de vida en función del relieve. También, da a conocer la evolución y procesos de modelado.

1.2. Marco Conceptual

El agua subterránea es parte integral del ciclo hidrológico, el estudio de la interacción de ella con el medio físico del subsuelo, los procesos que rigen su movimiento dentro de las rocas y sedimentos y la interpretación de la química que resulta de sus

interacciones es el campo de trabajo de la Hidrogeología (Brune et al., 1968; Rebollo & Loeches, 2007).

El agua fluye desde la superficie hacia abajo por los poros, fisuras y cavidades del suelo o la roca (zona no saturada, vadosa o de aireación). Estos espacios capilares están ocupados parcialmente por aire, agua u otros elementos líquidos y están sometidos por la gravedad o mantenidos por la acción de la capilaridad. La zona no saturada se compone de varias franjas que son la subzona de evaporación, la subzona intermedia y la franja capilar (Rebollo & Loeches, 2007). En si la zona no saturada es una zona de transición del agua y tiene una vital importancia en la dinámica del movimiento.

Una vez el agua pasa por las capas del suelo llena todos los espacios vacíos existentes, se forma la zona saturada, hay la presión es hidrostática (Brune et al., 1968). La zona saturada está limitada en sus partes tanto inferior como superior por las condiciones geológicas de la zona. El límite entre la zona saturada y la zona no saturada es conocido como superficie freática, en la cual se evidencia que la presión del agua en ese punto es igual a la atmosférica (Rebollo & Loeches, 2007).

Acuífero

Se les conoce a los estratos geológicos que acumulan, almacenan y transportan el agua subterránea. El acuífero puede ser una formación, un grupo de formaciones o una parte de una formación (Brune et al., 1968). Se han producido por las dinámicas terrestres y se componen de diversidad de materiales con sus características y propiedades hidráulicas particulares.

Las formaciones de los acuíferos deben presentar dos características, ser porosos y permeables, siendo así los materiales que lo pueden componer serian arenas, gravas o calizas kársticas. El acuífero se caracteriza por la cantidad de agua que puede aportar al ser sometido a explotación.

Los acuíferos tienen características que son necesarias de conocer para un adecuado manejo, las cuales son la extensión, el espesor, sus zonas de recarga y descargas y los cuerpos superficiales en contacto con él (Rebollo & Loeches, 2007).

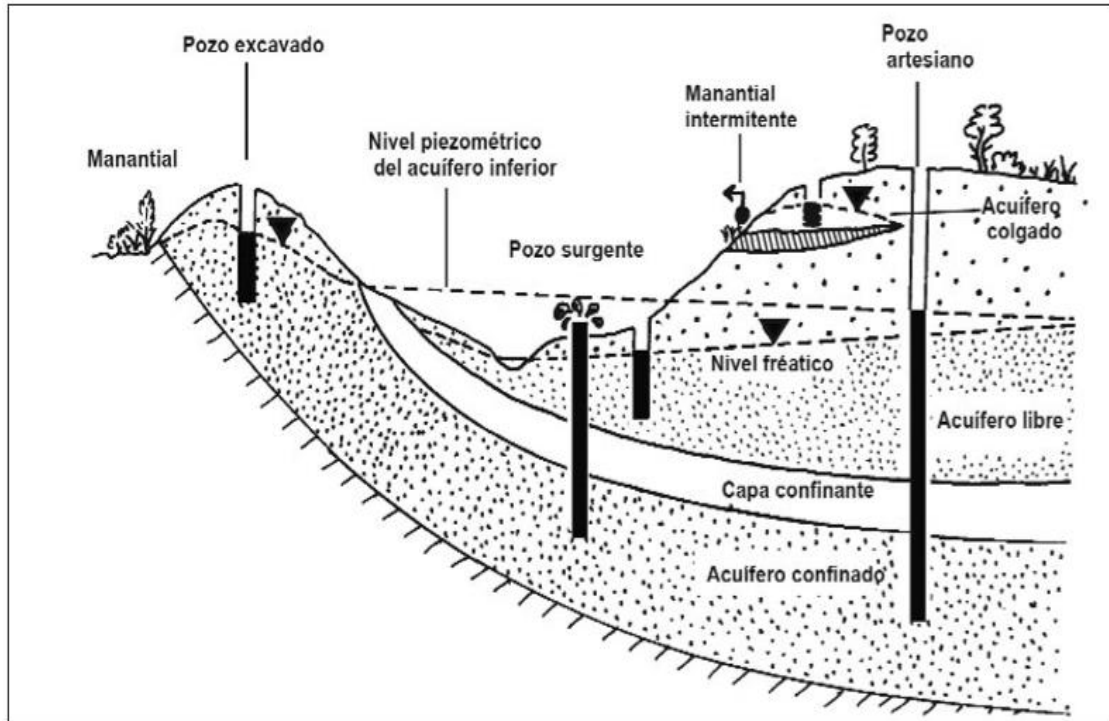


Figura 3. Clasificación de acuíferos por estructura y grado de confinamiento.

La clasificación de los acuíferos se puede hacer por la naturaleza del material constituyente y su posible afectación estructural, donde se pueden identificar:

- Acuíferos porosos: Existencia de poros intergranulares
- Acuíferos Kársticos: Con cavidades y conductos generados por la disolución de la roca original.
- Acuíferos Fisurados: Presentan fracturas abiertas que permiten el alojamiento de agua y su circulación a nivel subterráneo.

También se pueden clasificar de acuerdo a la estructura y el grado de confinamiento que tiene (Fig. 3); se pueden clasificar como:

- Acuíferos libres: Son aquellos en los cuales el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. La superficie del agua será el nivel freático y coincidirá con el nivel piezométrico.
- Acuíferos semiconfinados: Son acuíferos completamente saturados de agua limitados en su parte superior por una capa semipermeable (Acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuicierre), o por otro Acuitardo.
- Acuíferos confinados: Conocidos también como acuíferos artesianos, son formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas bajo presión en medio de rocas impermeables. En estos acuíferos el nivel del agua en un pozo se eleva por encima de la parte superior (techo) del acuífero hasta un nivel que se denomina nivel piezométrico.

Hidro geoquímica

Según (Brune et al., 1968), “Todas las aguas subterráneas llevan sales en solución. La fuente principal de estas sales es la solución de minerales. La calidad relativa del agua depende no solo de las cantidades totales de sólidos disueltos sino también de los tipos de sales y el uso que se dará al agua. Los componentes principales de las aguas naturales son calcio, magnesio, sodio, potasio y hierro férrico y ferroso como cationes, y carbonato, bicarbonato, sulfato, cloruro, flúor y nitrato como aniones. Los componentes minoritarios habituales son aluminio, manganeso, sílice, boro y selenio. Las huellas de cualquiera de los elementos conocidos pueden estar presentes y concentraciones considerables pueden existir en áreas locales”.

El estudio de las condiciones de calidad del agua subterránea busca identificar el estado de esta en su variación espacio temporal y así definir su uso, identificación de procesos naturales o antrópicos que generen afectación o contaminación a la fuente.

La regulación de los parámetros fisicoquímicos en Colombia para consumo humano, se señalan en la Resolución 2115/2007. (Anexo).

Sistema de Información Geográfica (SIG)

Para el campo de la hidrología aplicada, los SIG ofrecen grandes ventajas metodológicas, apoyo en la gestión y administración de los recursos hídricos (DIAZ CARVAJAL, 2015). Su capacidad de procesar gran cantidad de información sobre las bases cartográficas la convierten en la indispensable herramienta en el modelamiento hídrico, integración de variables ambientales, facilitando análisis de resultados contextualizados.

El método del Número de Curva, en esencia relaciona de manera tabular diferentes variables que se requieren representar de forma espacial sobre una zona de estudio, con ayuda del SIG este proceso es mucho más rápido y económico. Al actualizar alguna capa de información, que generalmente son las de cobertura de suelos, se puede generar un mapa nuevo de NC, forma inmediata (Ferrér, 1995).

1.3. Área de Estudio

1.3.1. Localización, Fisiografía y Descripción

El departamento de Sucre está localizado en la parte Nororiental de Colombia, en la región Caribe entre las coordenadas de latitud Norte $10^{\circ} 08'$ y $08^{\circ} 16'$ y latitud oeste $74^{\circ} 32'$ y $75^{\circ} 42'$ al norte de las cordilleras Central y Occidental; cuenta con 26 municipios y limita al norte con el mar caribe al este con el departamento de Bolívar, al oeste con Córdoba y al sur con Antioquia.

Al norte del departamento el territorio bordea con las playas del Golfo de Morrosquillo formando franjas de anchura variable de tierra firme y espacio marítimo presentándose procesos de interacción mar-tierra, la zona presenta características ecosistemitas ricas y diversas (INVEMAR et al., 2007). La parte sur del departamento compone la depresión inundable de los ríos bajo Magdalena, Cauca y san Jorge, caracterizadas por muchas ciénagas sobre todo a lo largo del río san Jorge. Al noreste se observa, se observa una faja de colinas que hacen parte a estribaciones de la serranía de San Jacinto o Montes de María. Entre las grandes zonas centro y sur, se extienden sabanas con bajas pendientes. Esta condiciones de ubicación

geográfica, entre otros criterios de división político administrativa, vocación económica, relaciones intermunicipales, nexos histórico-culturales ayudan a clasificar fisiográficamente el territorio en 5 subregiones (Fig. 4) Al norte están las subregiones de Morrosquillo y Montes de María, al centro la región Sabanas y al sur la región Mojana y San Jorge (Aguilera Diaz, 2005).



Figura 4. Subregiones Sucre. ¹

En el departamento se conforman 3 cuencas hidrográficas que son San Jorge, Canal del Dique y la cuenca Mar Caribe y Golfo de Morrosquillo (Fig. 5). (Aguilera Diaz, 2005) “La hidrología continental presenta al norte varios caños y arroyos poco profundos de corta longitud, que vierten sus aguas en el mar Caribe, Golfo de

¹ Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Subregiones_de_Sucre

Morrosquillo y Canal del Dique, sus vertientes son de carácter estacional; en la zona central y sur se localiza la cuenca del río San Jorge, principal eje fluvial del departamento que nace en el Nudo de Paramillo y drena sus aguas en el Brazo de Loba del río Magdalena; sigue la dirección suroccidente nororiente y circunda numerosas ciénagas y drenajes que bajan de las serranías cercanas, su longitud es de 368 km aproximadamente, de la cual la tercera parte se encuentra en Sucre. En el sur del departamento está la zona de La Mojana, la cual es anegadiza y rica en aguas superficiales temporales, permanentes y estacionarias que forman muchos ríos, caños, ciénagas y zápales”.



Figura 5. Hidrografía Sucre.²

² Fuente: IGAC, Sucre. Características geográficas, Geografía física, Capítulo 2. p.54

1.3.2. Factores Climáticos

El departamento de Sucre, se caracteriza por un clima cálido seco y zona de vida de Bosque Seco tropical (bs – T), según el sistema de clasificación Foto climático de Holdridge (CARSUCRE, 2005). A nivel general la precipitación muestra un marcado gradiente de aumento de lluvias en dirección norte-sur. Las menores lluvias se presentan al norte y hacia la parte central, con volúmenes en el rango de 1.000 a 1.500 mm anuales, con leves incrementos hacia el municipio de San Onofre. El régimen de precipitaciones es de tipo mono modal en la mayor parte del departamento, la temporada seca es marcada y se extiende de diciembre a marzo. A partir de abril, las lluvias aumentan hasta alcanzar máximos en el periodo de julio a septiembre y disminuyen gradualmente hasta diciembre, donde comienza la temporada seca. El número de días con lluvia en la mayor parte del departamento es de 50 a 100, en promedio durante todo el año (IDEAM, 2018). La temperatura media en el norte del departamento está en el rango de 26 a 28° C. hacia el sur se registran las mayores temperaturas medias anuales, registradas en los municipios del Roble y Galeras, con más de 28° C, (IDEAM, 2018).

1.3.3. Geología

En el departamento de Sucre afloran rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados de origen marino, transicional y continental, con edades que van desde el cretáceo superior al cuaternario (CARSUCRE, 2005). La geología de la zona de estudio la componen las unidades lito-estratigráficas Sincelejo, Morroa y Betulia. La formación Sincelejo se describe como una unidad potente, constituida por areniscas de grano fino a conglomeráticas, con estratificación cruzada y variaciones locales a facies lodosas. Hacia el tope predominan los conglomerados matriz soportados sobre las arenitas, compuestas por líticos volcánicos y cuarzo lechoso (INGEOMINAS, 2001, 2015). La formación Betulia se localiza al centro - oriente de la zona de estudio, suprayaciendo a la formación Morroa en forma discordante. La unidad es definida como una serie de sedimentos fluviolacustres, compuestos por

una alternancia de arcillas arenosas friables y limolitas, en parte estratificadas y con notables cambios de facies (INGEOMINAS, 2015). Su espesor de acuerdo a las compañías petroleras es de 1500 – 1700 metros (Jimenez & Rodriguez, 2008).

La formación Morroa corresponde a la zona con mayor potencial acuífero. Suprayace a la formación Sincelejo e infrayace a la formación Betulia. Forma una franja amplia y alargada que se extiende en dirección N 10° E, con un promedio de 3 Km de ancho. Es sobre esta formación que se encuentran las zonas urbanas de Sincelejo, Corozal, Morroa, los Palmitos y Sampués. Se caracteriza por presentar una topografía ondulada formada por un sistema de colinas bajas alargadas, de pendientes suaves a moderadas y vertientes cortas, alternando con valles pequeños poco profundos (CARSUCRE, 2005); su espesor es variable, alcanzando su mayor potencial en la zona central entre Corozal y Sincelejo donde tiene unos 500 metros disminuyendo hacia el norte donde su espesor es de unos 300 metros en Ovejas (Jimenez & Rodriguez, 2008). Litológicamente esta formación se constituye por capas de areniscas friables y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales. Estructuralmente se encuentra conformando un gran monoclinal con rumbo N 25° E y buzamientos variables desde 5° a 20° al SE. El buzamiento aumenta hacia la base, a medida que se acerca al contacto con la Formación Sincelejo Superior, a la cual suprayace aparentemente en forma discordante (CARSUCRE, 2005). Dentro de la formación Morroa, se delimitan dos zonas, arenosa y arcillosa.

1.3.4. Hidrogeología

El departamento de Sucre contiene formaciones acuíferas en toda su extensión (Fig. 6). La cuenca de estudio intercepta los acuíferos de Morroa, Betulia y el Roble, considerados importantes del departamento por su oferta hídrica. Los datos descriptivos de las formaciones acuíferas se presentan en la tabla 1 y 2. La unidad acuífera Morroa, abastece al mayor número de habitantes de la región y por lo tanto se concentra los mayores estudios sobre ella.



Tabla 1. Formaciones geológicas y profundidad de los niveles freáticos. Adaptado de (Jimenez & Rodriguez, 2008).

Unidad Geológica	Descripción	Tipo Acuífero	Prof. Freática (metros)
SINCELEJO SUPERIOR (Tpss)	Areniscas De grano grueso y conglomerados e intercalaciones de arcillas.	Semiconfinados	5 - 20
MORROA (Tpm)	Areniscas de color gris con diferentes nódulos de areniscas calcáreas e intercalaciones de conglomerados y Arcillolitas.	No confinado	24,8 - 60,4
BETULIA (Qpb)	Arcillolitas abigarradas con intercalaciones de pequeños paquetes arenosos.	Confinado	> 100

Tabla 2. Acuíferos en la zona de microcuenca Arroyo Grande de la Sabana. Adaptado de (CARSUCRE, 2016b).

ACUIFERO	MORROA	BETULIA	ROBLE
LOCALIZACIÓN	Localizado entre los municipios de Sincelejo, Corozal, Morroa, Los Palmitos, Ovejas y Sampués.	Localizado entre los municipios de Betulia, San Pedro, Buenavista, Sincé, Galeras, El Roble, Corozal, Los Palmitos, Sampués y Ovejas.	Localizado entre los municipios de El Roble, Galeras, Corozal y Sincé.
POBLACION ABASTECIDA	485.247 personas en Sucre y 273.774 personas en Bolívar y Córdoba.	98.958 personas	31.750 personas
PRODUCCION HIDRICA	Mayor producción Hídrica del Departamento (67%; 44,98 Millones m ³ /año)	8% con 5,3 Millones m ³ /año	4%; 2,7 Millones m ³ /año
VALOR OFERTA	12.600 millones m ³ /año (700 Millones m ³ en zona Céntrica Sincelejo Corozal y Morroa)	No se conoce	No se conoce
VALOR DEMANDA	52,5 millones m ³ /año	13,0 millones m ³ /año	No se conoce

Unidades Hidrogeológicas del Acuífero de Morroa

Se han diferenciado 4 unidades hidrogeológicas en las zonas del Acuífero de Morroa, agrupadas por las características topográficas, geológicas, hidráulicas y químicas. Tomado de los estudios de la entidad de control y trabajos académicos adelantados en la zona, se presentan las unidades hidrogeológicas, (CARSUCRE, 2005; HELMUTH et al., 2002; Jimenez & Rodriguez, 2008). Las diferentes Unidades Hidrogeológicas y los niveles respectivos se muestran a nivel espacial en la fig. 7.

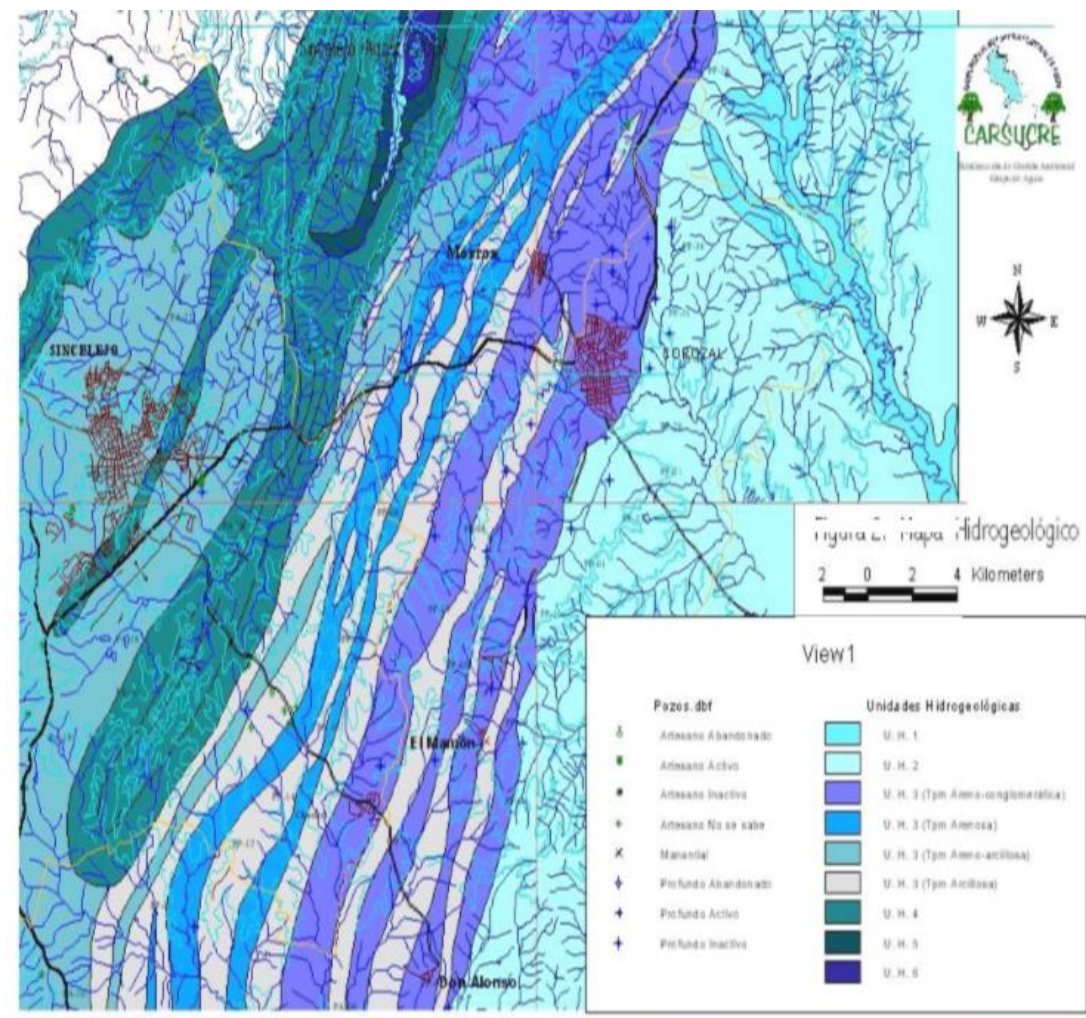


Figura 7. Mapa Hidrogeológico del Acuífero de Morroa. (CARSUCRE, 2005).

Unidad hidrogeológica 1 (U.H.1.): Conformada por depósitos aluviales principalmente de arroyos de la zona. Su permeabilidad primaria es moderada y su estructura es favorable para la recarga, tienen poco almacenamiento por su escaso espesor. Constituida por arenas, gravas, limos y arcillas. Esta unidad es considerada de alta vulnerabilidad a la contaminación y más si se tiene en cuenta su relación con las aguas superficiales que transportan los residuos líquidos de los centros urbanos. Su recarga es por aguas lluvias.

Unidad hidrogeológica 2 (U.H.2.): Es considerado un acuitardo por sus características arcillosas. Sus capas permeables están confinadas, son de espesor variables y la recarga directa no se da por lluvias, sino por una recarga desde los sedimentos arcillosos que la confinan.

Unidad hidrogeológica 3. (U.H.3.): Corresponde a la formación Morroa, el cual se caracteriza por ser un acuífero complejo, continuo y de extensión regional, constituido por capas semiconfinados y confinadas de areniscas y conglomerados poco consolidados, interceptado con capas de arcillolita, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales. Se subdividió en 4 grupos para mejor estudio:

- Formación Morroa Areno-Conglomerática: Conformada por los niveles A y B del acuífero.
- Formación Morroa Arenosa: Correspondiente a los niveles C y D.
- Formación Morroa Areno-Arcillosa: Correspondiente a los niveles E y F.
- Formación Morroa Arcillosa: la conforman las capas y lentes de arcillas que separan los niveles acuíferos de la formación.

Tabla 3. Niveles Acuíferos de la formación Morroa.

NIVEL	UBICACIÓN	CORRELACIONA	CARACTERISTICAS LITOLÓGICAS	ESPESOR	Permeabilidad	Disposición Estructural
A	Hacia el techo de la formación Morroa, en contacto con la formación Betulia. Sobre este se encuentra el casco urbano del Corozal y los Palmitos, Piletas, Don Alonso y Mamón.	Con los Niveles A y B	compuesta por areniscas líticas de grano fino hasta grueso de color gris claro y hasta pardo, con lentes conglomeráticos y algunas capas y lentes de arcilla.	El espesor de la capa permeable varía entre 30 a 226 metros, con buzamiento hacia el oriente entre 5 y 10°.	Alta	Favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.
B	Se encuentra debajo del nivel A, separado por un lente de arcilla. Sobre este nivel están el municipio de Morroa y Chocho	Con los Niveles C y D	Se compone de areniscas friables de grano fino a medio, de color amarillo ocre, con lentes y capas de grava sueltas hacia el techo y delgadas capas de arcillas finamente estratificadas.	Varía entre 38 y 164 metros, con buzamientos hacia el oriente entre 10° y 15°	Moderada a Alta	Favorable a la recarga y almacenamiento de agua subterránea.
C	Este nivel debajo del nivel B, separado de ésta por una capa de arcilla.	Con los Niveles E y F	Constituido por areniscas líticas finas y medias de color gris, ferruginosas, lentes y capas de grava de color gris amarillento, areniscas arcillosas muy friables y algunos lentes de arcillolitas.	Varía entre 40 y 60 metros con buzamiento hacia el oriente 15°.	Alta	Favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.
D	Están separados del nivel acuífero C, por una capa de arcilla y entre sí por un lente arcilloso.	Con el Nivel G	Constituido por areniscas líticas medias de color amarillo grisáceo algo consolidado, arenisco fino arcilloso, algunos lentes conglomeráticos y lentes arcillosos.	Para D varía entre 40 y 50 m. Para E entre 40 a 60 m. Con buzamientos hacia el oriente de 15°	Baja a Moderada	Favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.
E						
F	Se encuentra ubicado hacia la base de la formación Morroa, desde el noroccidente de Morroa hasta el sur del corregimiento de Bremen.	Con el Nivel H	Compuesta de areniscas líticas finas a medias algo consolidadas, areniscas finas arcillosas dentro de las cuales son comunes las concreciones endurecidas de areniscas calcáreas, algunos lentes conglomeráticos consolidados y lentes arcillosos.	Buzamientos hacia el oriente entre 15° y 25°	Baja	Favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.

1.3.5. Cuenca Arroyo Grande de la Sabana (AGS)

La cuenca Arroyo Grande de la sabana (Fig. 8), se localiza entre las coordenadas planas X=852.000, Y=1'537.000, y X=897.000, Y=1'495.000 (CARSUCRE, 2016a). Alberga el 52% de la población del departamento de Sucre, siendo así la cuenca con mayor densidad poblacional. Su uso principal es ganadero (CARSUCRE, 2016b); predomina el paisaje de lomerío y valles a orillas de los arroyos.



Figura 8. Localización de la cuenca Arroyo Grande de la Sabana (AGS)

Presenta un área de 70,544 Ha. La cuenca intercepta varias subregiones geográficas. Al norte la subregión Montes de María, que la componen una faja de colinas que hacen parte de las estribaciones de la serranía de San Jacinto. Entre las grandes zonas centro y sur, se extiende la subregión Sabanas, con bajas pendientes. En la parte sur se ubica la subregión Mojana, que la compone la depresión inundable de los ríos bajo Magdalena, Cauca y San Jorge, caracterizada por muchas ciénagas sobre todo a lo largo del río San Jorge (Aguilera Díaz, 2005).

La cuenca AGS hace parte de la macro cuenca San Jorge, El principal cuerpo de agua de la cuenca lo constituye el Arroyo del mismo nombre; el cual nace en la confluencia de los arroyos Caimán y San Miguel, en cercanías a la localidad de Bremen, a una altura de 167 m.s.n.m. Recorre gran parte del departamento de Sucre en dirección Norte – Sur recibiendo los afluentes de otros arroyos y corrientes menores que descargan tanto en su margen izquierda como derecha para finalmente desembocar en la ciénaga de Santiago Apóstol a una cota de 25 m.s.n.m. (Álvarez, 2014).

La cuenca tiene aportes de aguas residuales sin tratamiento de los municipios de Sincelejo, Corozal, Morroa; Otros municipios que descargan sobre la misma con algún tipo de tratamiento son Betulia, los Palmitos y Sincé.

Se extienden por cuatro de las subregiones del departamento, Montes de María, Mojana, Sabanas y San Jorge. Su cauce principal atraviesa un sector del área de recarga del acuífero de Morroa, como también partes importantes de los acuíferos de Betulia y del Roble generando un alto riesgo para la calidad de las aguas subterráneas con la cual se abastecen los municipios que se suministran de estas fuentes (CARSUCRE, 2016b).

1.4. Diseño metodológico

La investigación se realizó en diferentes fases definidas en la siguiente tabla 4:

Tabla 4. Fases de la Investigación.

FASE	DESARROLLO	METODO	TECNICAS	INSTRUMENTOS	FUENTES	RESULTADO
FASE I	Precipitación y Morfometría de cuenca del Arroyo Grande de la Sabana	Distribución Gumbel para Precipitación. Indicadores cuantitativos Morfométricos (Horton, Strahler).	Base de datos Análisis Numérico	ArcGIS, Excel	Información Secundaria	Características Morfométricas y dinámica de la Precipitación de la cuenca Arroyo Grande de la Sabana
FASE II	Estimación de la infiltración y escurrimiento potencial	Método del Numero de Curva	Procesamiento de cartografía			Mapas de las Infiltración y Escurrimiento potencial sobre la cuenca Arroyo Grande de la Sabana
FASE III	Estimación de la Recarga en la Zona Saturada no en puntos de interés	Balance del Ion Cloruro	Análisis de Agua Análisis de suelos Análisis de Información existente	Muestras de agua y suelo en puntos de Interés. Información existente sobre los estudios de acuíferos.	Información Primaria	Perfil de Cloruro en zonas de interés y estimación de la recarga

2. ANALISIS MORFOMETRICO E HIDROLOGICO DE LA CUENCA ARROYO GRANDE DE LA SABANA.

2.1. Introducción

Los factores que controlan el almacenamiento de las aguas subterráneas son diferentes a nivel espacio-temporal y dependen de parámetros como la disponibilidad de la lluvia como fuente principal de agua; las características del drenaje que tienen un papel vital en la distribución de la escorrentía e indican un esquema de infiltración además de gobernar el comportamiento del flujo del agua en la superficie del terreno vertical y horizontalmente; los tipos de formaciones lito estratigráfica, que favorecen el flujo y el almacenamiento; y la pendiente, como el factor que gobierna la energía del flujo del agua sobre las cuencas (Singh, Thakur, & Singh, 2013).

Mediante la Morfometría se pueden caracterizar los componentes de las cuencas hidrográficas conforme a indicadores cuantitativos, que permiten tener una visión clara y objetiva al momento de analizar los procesos de desarrollo de las formas de la tierra por procesos erosionales. Su estudio aporta al entendimiento de las respuestas de la cuenca ante eventos de lluvia. Por lo tanto es uno de los pasos iniciales en el proceso de planificación territorial y manejo de la cuenca (Magesh, Jitheshlal, Chandrasekar, & Jini, 2012; Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014). La Morfometría de una cuenca se puede evaluar conforme a las características que describen los indicadores, tales como la superficie, el relieve, la composición de red hídrica o de patrones de flujo (Mora et al., 2009).

Los indicadores morfométricos pueden ser de dos clases, tipo descriptivos lineales de escala y adimensionales. Los primeros permiten comparar unidades topográficas geoméricamente análogas sin inferencia directa del tamaño, dentro de los cuales están las longitudes de las redes de flujo, el perímetro, las densidades de corrientes y relieve; los segundos son en general relaciones de medidas de longitud por lo que las formas de unidades análogas se pueden comparar independientemente de la escala (Strahler, 1957).

En este capítulo se determinan varios factores que controlan el almacenamiento de agua subterránea en la cuenca de estudio, como la Precipitación, las características del drenaje y las pendientes. El análisis Morfométrico se realiza con el apoyo de herramientas SIG, para evaluar el drenaje, identificar la potencialidad permeabilidad de la superficie y la susceptibilidad de la cuenca a erosión natural. Se analiza la dinámica de Precipitación sobre una estación de la zona de estudio, mediante distribuciones de probabilidad con el método de Gumbel, lo cual será también un insumo indispensable en la aplicación del método de Número de Curva para la estimación de la infiltración potencial y la escorrentía.

2.2. Materiales y Métodos

2.1.1. Metodología

Para determinar la Precipitación se solicitó al IDEAM la información de las estaciones pluviométricas disponibles, obteniendo datos de precipitación máximas mensuales en 24 horas y valores totales mensuales, para el periodo de 1.943 hasta 2.017 (74 años de registro) de la Estación Aeropuerto Rafael Barvo ubicado en Corozal, Sucre. Luego se procedió a realizar los análisis y ajustes respectivos a las series; con las precipitaciones obtenidas, se aplicó el método estadístico para las proyecciones de los periodos de retorno para 2, 5, 10 y 25 años, mediante la función de distribución Gumbel (Chow, 1951; Gumbel, 1941). De manera informativa, con los registros de la estación se calcularon los promedios de la Temperatura media del mes y con ella se identificaron los valores respectivos para la evapotranspiración de la zona mediante las tablas de Thornthwaite.

El tiempo de concentración se entiende como el tiempo en el cual la escorrentía superficial del punto más alejado de la cuenca alcanza el punto de salida. Existen diversas fórmulas establecidas para el cálculo y se basan en la relación deferentes parámetros de la cuenca, tales como la pendiente, la longitud del cauce, intensidad de la lluvia, el coeficiente de rugosidad entre otras. Para la estimación se recomienda tomar el valor promedio de los resultados obtenidos de por lo menos cinco ecuaciones diferentes (U. J. J. Vélez & Botero, 2011). El tiempo de concentración se determinó mediante el promedio de los resultados de las ecuaciones de Kirpich,

Temez, Giandotti, California Culvert Practice y Bransy-William descritas en la Tabla 5.

Tabla 5. Ecuaciones de Tiempos de Concentración. Adaptado (U. J. J. Vélez & Botero, 2011)

Ítem	Autores	Formula
1	Bransy-Williams	$tc = 14,6 * L * A^{-0,1} * S^{-0,2}$
2	California Culvert Practice	$tc = 60 \left[\frac{0,87085 * L^3}{H} \right]^{0,385}$
3	Giandotti	$Tc = \frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{25,3 * \sqrt{S} * L}$
4	Kirpich	$tc = 0,0078 * Lp^{0,77} * S^{-0,385}$
5	Temez	$Tc = 0,3 * \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76}$

Donde tc es el tiempo de concentración (min), Tc es el tiempo de concentración (horas), L longitud del curso de agua mas largo (km), H es la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m), S es la pendiente promedio del cauce principal (m/m), A es el área de la cuenca (km²).

La caracterización Morfométrica de la cuenca del Arroyo Grande de la Sabana, se realizó mediante el cálculo de las propiedades dimensionales, de composición de la red de drenaje y características del relieve de forma sistemática utilizando cartografía y modelos de elevación digital, como base para la creación de varias capas temáticas SIG (DIAZ CARVAJAL, 2015; Magesh, Chandrasekar, & Soundranayagam, 2011; Magesh et al., 2012; Singh et al., 2013). Las metodologías utilizadas para el cálculo de las propiedades se presentan en las tablas 7, 8 y 9.

Para el procesamiento se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) obtenido del Geoportal del Consorcio de Información Espacial (CGIAR-CSI) que es un Grupo de investigación para el desarrollo agrícola internacional, el cual proporciona SRTM con resolución espacial de 90 metros. Disponible en <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

Delimitación de la Cuenca se realizó con Los datos del DEM SRTM 90m se importaron a ArcGIS 10.5 en su extensión ArcHydro para el proceso de corrección de datos del modelo y así reducir errores. Se realizó el llenado de vacíos para garantizar el flujo en superficie con le extensión Fill. Luego, se procedió a definir la dirección del flujo y la acumulación de este, determinando cuantas celdas drenan sobre una celda específica con las herramientas Flow_Direction, Flow_acumulation.

Posterior a este procedimiento y con la información del flujo, se generó la red de corrientes con lo cual se define la capa de cuencas hidrográficas que contiene el área de drenaje para cada corriente. Esta capa fue convertida a formato SHP y verificada con la capa de drenajes.

Definida la cuenca de estudio, se calcularon (a) los parámetros dimensionales como el área drenada, perímetro de la microcuenca, el ancho, la longitud total y desnivel; como también (b) los parámetros de composición de la red de drenaje como son el número de orden y longitudes de las corrientes, utilizando el software ArcGIS. Las pendientes del cauce principal, de la microcuenca y de la red hídrica, se calcularon mediante datos exportados de ArcGIS a hojas de cálculo Excel. Con los datos de la altitud y las áreas acumuladas se obtuvo la gráfica Hipsométrica; otras características morfométricas como Factor de Forma, Radio de Elongación, Radio de Circularidad, Densidad de drenaje, Frecuencia de corrientes y textura de drenaje se calcularon mediante las expresiones mostradas en la Tabla 6, 7 y 8.

Tabla 6. Propiedades dimensionales y de superficie.

Propiedades Dimensionales y de Superficie	Descripción/Formula	Referencia
Área (A)(Km ²)	Superficie que drena a todos los sistemas hidrológicos y fluviales que componen la cuenca, proyectada en un plano horizontal. (Km ²).	(Horton, 1945)
Perímetro (P)(Km)	Es la medida lineal del límite topográfico divisor de aguas, sobre un plano horizontal. (Km).	(Smith, 1950)
Aspecto u orientación	Orientación de la superficie de un terreno respecto al norte.	-
Pendiente de la cuenca (j)(%)	$J = 100 * \frac{\sum Li * E}{A}$	(Horton, 1945)
Relieve (R)(Km)	$R = H - h$	-
Curva Hipsométrica	El método produce una curva acumulativa del área total sobre la proyección de la altura en el plano.	(Strahler, 1952)

Tabla 7. Propiedades de la Red hídrica.

Propiedades de la Red Hídrica	Descripción/Formula	Referencia
Numero de corrientes de la red Hídrica	Número total de corrientes de todos los Ordenes	(Strahler, 1957)
Orden de la red Hídrica (U)	Rango jerárquico	-
Longitud de los segmentos de la red Hídrica (Lu)(Km)	Longitud de las corrientes	(Horton, 1945)
Longitud media de la red Hídrica (Lsm)(Km)	$Lsm = \frac{Lu}{Nu}$	(Strahler, 1957)

Tabla 8. Propiedades del patrón de drenaje.

Propiedades Patrón de Drenaje	Descripción/Formula	Referencia
Factor de forma	$Rf = \frac{A}{L^2}$	(Horton, 1945)
Radio de elongación	$Re = 1,128 \sqrt{\frac{A}{L}}$	(Magesh et al., 2011, 2012; Singh et al., 2013)
Radio de circularidad	$Rc = 4\pi * \frac{A}{P^2}$	(Strahler, 1957)
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{Lu}{A}$	(Horton, 1945)
Frecuencia de corrientes	$Fs = \frac{Nu}{A}$	(Horton, 1945)
Textura de drenajes	$Rt = \frac{Nu}{P}$	(Smith, 1950)
Relación de alivio	$Rh = \frac{R}{Lb}$	(Magesh et al., 2011, 2012; Singh et al., 2013); <i>Lb</i> , longitud de la cuenca.

2.3. Resultados y Discusión

A partir del procesamiento digital del archivo SRTM 90m DEM versión 4 entre las latitudes 5 – 10° N, longitudes 80 y 75° W, se logró caracterizar las formas de relieves con respecto a las curvas de nivel y crear una superficie vectorizada de la cual se logró identificar el área de estudio (Fig. 9), además de calcular mapas de pendientes, contorno y aspecto entre otros.

Tabla 9. Propiedades de Superficie y Patrón de drenaje de la cuenca AGS.

Área (A) (km ²)	Perímetro (P) (km)	Relieve (m)	Factor de Forma	Pendiente Prom. Cuenca (%)	Radio de elongación (Re)	Radio de Circularidad (Rc)
705,44	238,02	239	0,16	4,03	0,45	0,16

Densidad de drenaje (km/km ²)	Frecuencia de corrientes	Textura del drenaje	Relación de Alivio	Área más frecuente entre curvas de nivel (km ²)	Altura más frecuente (m.s.n.m.)	Altitud de frecuencia media (m.s.n.m.)
2,43	6,04	17,89	0,04	109,4	154,5	145,9

2.2.1. Propiedades de la Superficie

Aspecto u Orientación.

Generalmente el aspecto se refiere a la orientación de una cuenca o ladera montañosa. La orientación de una superficie respecto al norte puede tener influencias importantes en su clima local, pues los rayos del sol están en el oeste a la hora más calurosa de la tarde, por lo que la mayoría de las superficies orientadas al oeste serán más cálidas que las laderas orientadas hacia el este. Esta situación puede tener efectos importantes en la distribución de la vegetación y biodiversidad (Magesh et al., 2011, 2012). La orientación se mide en sentido de las agujas del reloj en grados, desde 0° siendo el norte, 90°este, 180°sur, hasta llegar a 360° norte, formando un círculo completo. Las áreas planas no van a tener orientación de pendiente descendente por lo que su valor será -1. El mapa de orientación de la

Microcuenca del Arroyo Grande de la Sabana se presenta en la Fig. 10. De la interpretación visual se aprecia una marcada orientación hacia el oeste en la toda la superficie de la microcuenca con mayor acentuación hacia la zona superior. Por lo tanto, se puede argumentar que estas superficies tienen un contenido de humedad más bajo y tienen una tasa de evaporación más alta, por lo que el índice de vegetación para esa zona es más bajo.

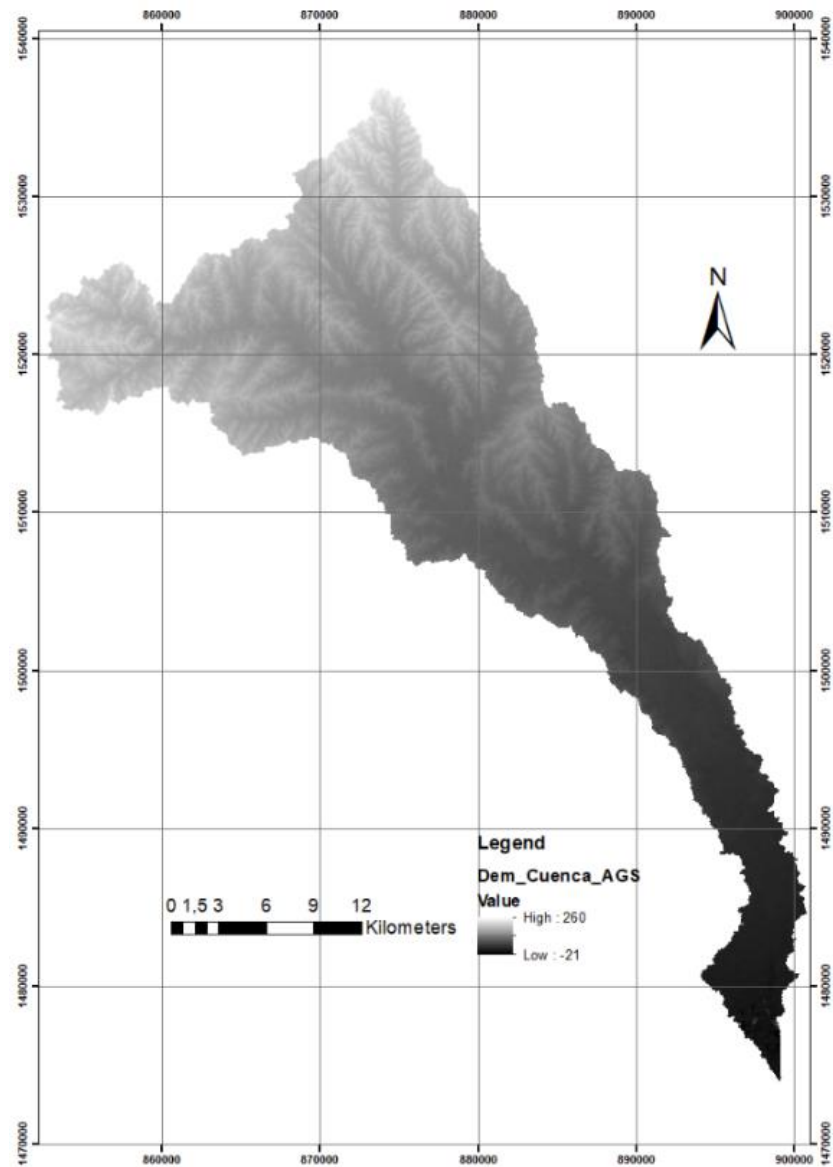


Figura 9. DEM Cuenca AGS.

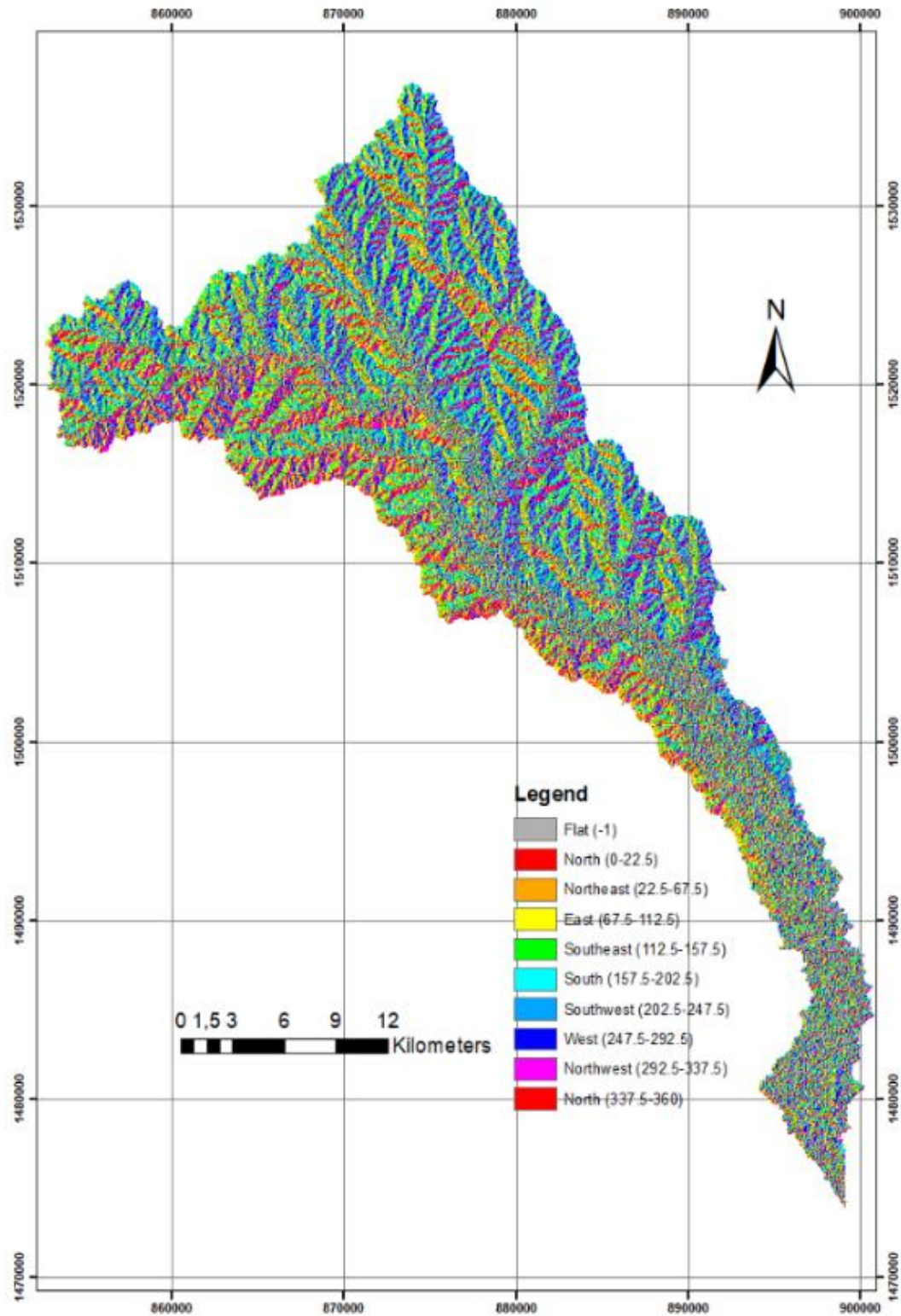


Figura 10. Aspecto u orientación cuenca AGS (grados).

Pendiente

La pendiente es una característica física que se refiere a la cantidad de inclinación de una superficie ante la horizontal. Es uno de los principales factores que controla el tiempo de flujo superficial o la concentración de lluvia en las redes de drenaje de una cuenca. Su estudio es fundamental para comprender la distribución de los taludes lo que aporta información valiosa para las actividades productivas de mecanización en la agricultura, para planificación territorial urbana y de estructuras de ingeniería para control ante crecidas, para control de erosiones y prácticas de conservación (Magesh et al., 2011, 2012). La pendiente de una cuenca tiene una relación importante, pero a la vez compleja, con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo y el suministro de agua subterránea a las corrientes (Horton, 1932).

El mapa de pendientes de la microcuenca del Arroyo Grande de la Sabana se muestra en la Fig. 11. El grado de pendientes varía entre 0° a 54°. El mayor grado de pendiente da como resultado un escurrimiento rápido y una mayor tasa de erosión con potencial de recarga débil. Las pendientes con rangos mayores a 6° se concentran en la parte norte de la microcuenca, cerca de la subregión Montes de María. Rangos menores a 6° se orientan en la parte baja correspondiente a la región Sabana. La tabla 10. Muestra la pendiente promedio de la cuenca con un valor porcentual de 4,03%.

Relieve

Se define como la diferencia de las cotas máximas y mínimas de la cuenca. Desempeña un papel significativo en el desarrollo de los accidentes geográficos, drenajes, flujos de agua superficial y subterráneos, permeabilidad y propiedades erosivas del terreno. El relieve total de la microcuenca Arroyo Grande de la Sabana se presenta en la tabla 10. La figura 12 presenta los mapas de las distribuciones de la altura sobre la superficie. La altura máxima de la microcuenca llega hasta 260 msnm.

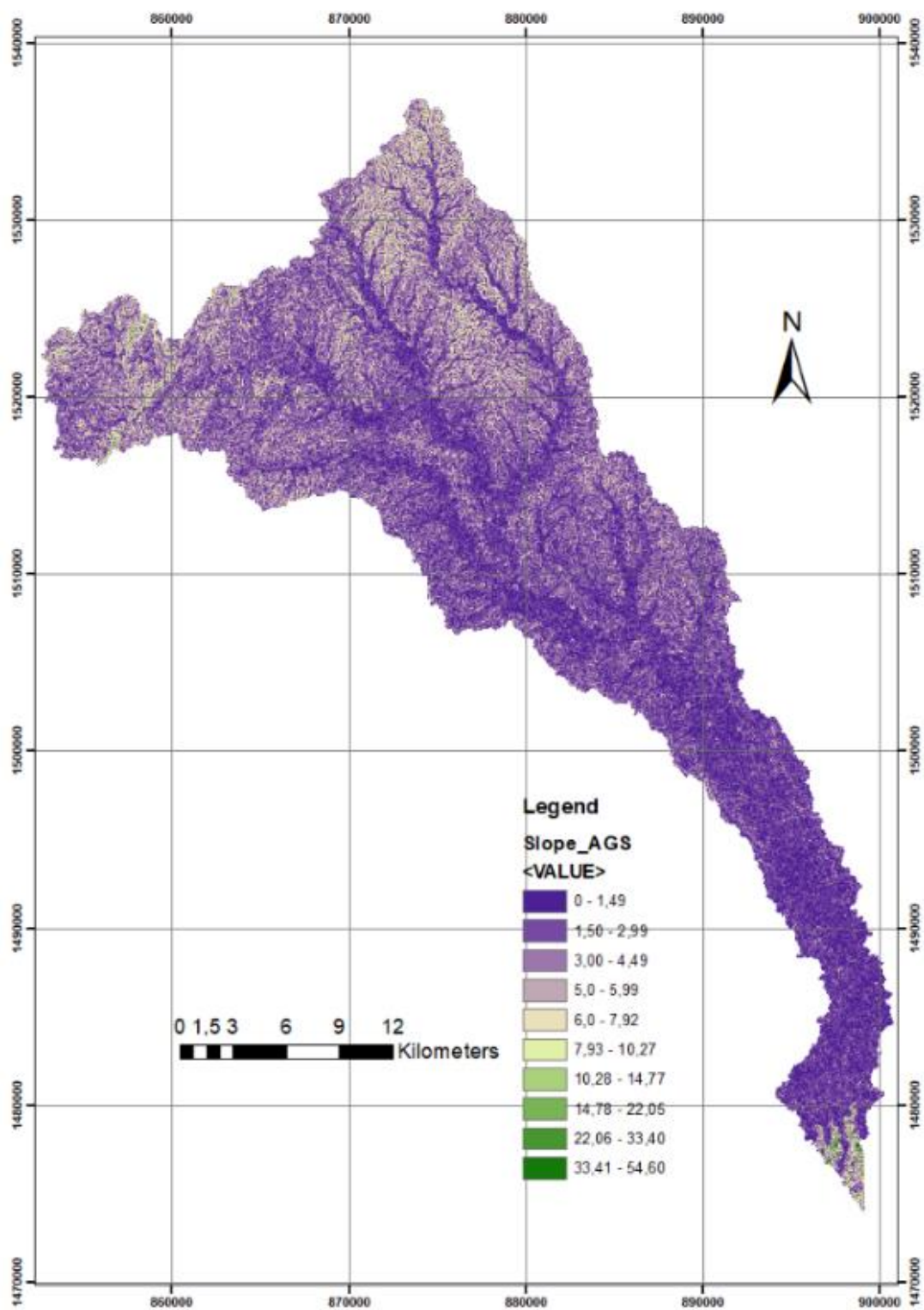


Figura 11. Mapa de Pendientes cuenca AGS (grados)

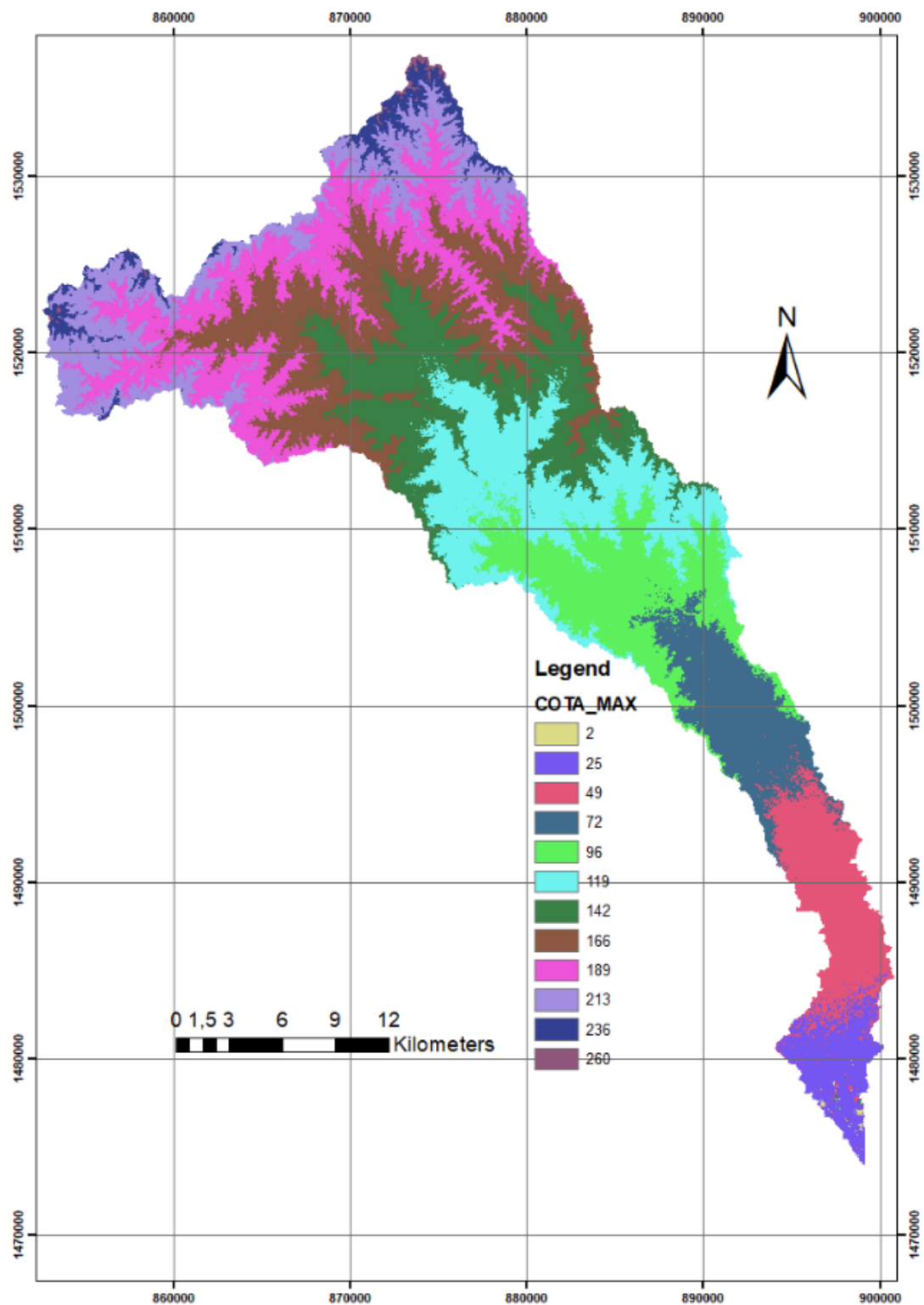


Figura 12. Mapa de Relieve cuenca AGS (m.s.n.m.)

Curva Hipsométrica

La propiedad Hipsométrica es una forma conveniente y objetiva de describir la relación entre las características altimétricas y la superficie de la cuenca de estudio. La Curva hipsométrica de la microcuenca AGS (Fig. 13), muestra una distribución de masas normal con respecto a la altura, presentando un modelo en forma de curva S, que corresponde a una forma típica de una cuenca en etapa de equilibrio o madura. Las curvas características del estado de equilibrio generalmente representan cuencas de tercer o cuarto orden en rocas relativamente homogéneas. Se puede decir que los procesos de erosión, transporte de escorrentías y las pendientes contribuyentes, son estables; es decir, se ha desarrollado un sistema de taludes, canales y pendientes estables que se adaptan más eficientemente a la reducción de masa de tierra por las fuerzas de arrastres disponibles, lo que permite que se equilibre contra las fuerzas resistivas de cohesión mantenidas por el lecho de roca, suelo y capa vegetal (Strahler, 1952).

La Curva Hipsométrica ayuda a definir claramente el valor de altura media de la cuenca correspondiente a 154,5 m.s.n.m. y además sirvió para determinar que dentro del 50% del área acumulada se encuentra la mediana de la altitud 145,9 m.s.n.m. (tabla 10).

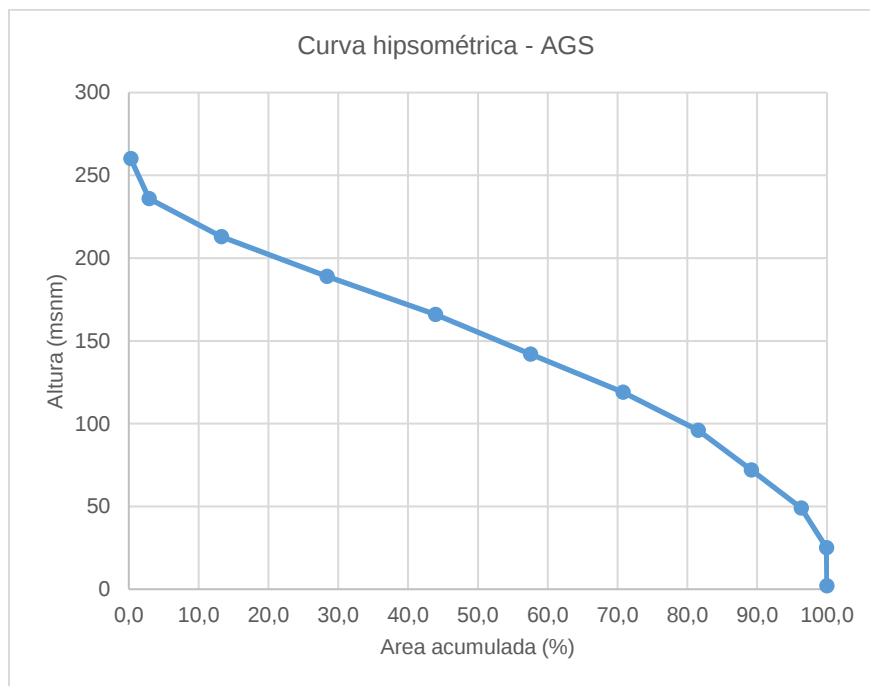


Figura 13. Curva Hipsométrica cuenca AGS.

2.2.2. Propiedades del Patrón de Drenaje

Factor de Forma

Es la relación entre el ancho y el largo de una cuenca de drenaje. El factor de forma para la microcuenca AGS muestra valores de 0,16 lo que la caracteriza como una cuenca alargada; que se caracterizan por presentar escorrentías máximas más bajas y de larga duración, permitiendo un buen patrón de drenaje.

Radio de Elongación

Se define como la relación entre el diámetro del círculo de la misma área que la cuenca de drenaje y la longitud máxima de la cuenca. Los valores entre 1 – 0,9 se asocian a formas circulares con bajos relieves, los valores entre 0,9 – 0,8 se asocian formas ovaladas, y los valores menores a 0,7 se definen como superficies alargadas con alto relieve y pendientes pronunciadas (Singh et al., 2013). La relación de elongación de la cuenca es 0,45 (tabla 10), lo que sugiere que la cuenca pertenece a la cuenca de forma alargada y pendientes pronunciadas.

Radio de Circularidad

La circularidad de una cuenca está principalmente relacionada con la longitud y la frecuencia de las corrientes, las estructuras geológicas, el uso de la tierra, el clima, el relieve y la pendiente de la cuenca. La relación de circularidad es la relación entre el área de una cuenca y el área de un círculo que tiene la misma circunferencia que el perímetro de la cuenca, los valores de circularidad entre 0,4 – 0,5 indican geología homogénea altamente elongadas y permeables (Magesh et al., 2011, 2012). La cuenca del AGS tiene un Radio de Circularidad de 0,16 indicando forma alargada, baja descarga de escorrentía y alta permeabilidad en zonas de la cuenca según las condiciones del subsuelo.

Densidad de Drenaje

Se puede definir como la proximidad del espaciado entre los canales. Es un excelente indicador de la permeabilidad de una cuenca y está relacionada estrechamente con la longitud del flujo superficial. Su valor da una gran aproximación a la irregularidad del paisaje y el potencial de escorrentía. Las áreas empinadas e impermeables en regiones de alta precipitación tienen valores mayores a 3,6

km/km²; los valores menores a 1,8 km/km² y cercanos a cero representan cuencas suficientemente permeables donde gran parte de la lluvia es llevada al suelo a través de la infiltración. Los valores de densidades de drenajes bajos están relacionados a relieves bajos. Las diferencias de drenajes se suelen atribuir a diferencia de lluvia y relieve. En áreas mal drenadas, las precipitaciones suelen ser mayores que en cuencas bien drenadas. Otros factores son vitales para determinar la densidad de drenaje, como la capacidad de infiltración del suelo y la resistividad inicial del terreno a la erosión. La cuenca del AGS presenta una densidad de drenaje de 2,43 km/km² clasificándola como una cuenca con densidad de drenaje moderada, relacionado con áreas moderadamente empinadas o montañosas, con materiales subterráneos moderadamente permeables y vegetación escasa.

Frecuencia de Corrientes

Se define como el número de corrientes por unidad de área (Horton, 1932). Los valores de la frecuencia de las corrientes para la cuenca AGS es de 6,04 corrientes/km², Los valores de la frecuencia de las corrientes indican una correlación positiva con la densidad de drenaje y sugieren un aumento en la población de las corrientes con respecto a la densidad de drenaje (Magesh et al., 2011, 2012). La formación de las corrientes depende de la frecuencia de las lluvias, la temperatura y la litología de la cuenca y da un indicio de la textura de drenaje.

Textura del Drenaje

Es la cantidad total de segmentos de flujo de todas las órdenes por perímetro de esa área, o lo que significa el espaciado relativo de las líneas de drenaje (Horton, 1945). La textura se puede clasificar para valores menores a 4 como topografías de textura gruesa y muy gruesa, entre 4 – 10 como moderada o fina, para texturas por encima de 10 se consideran finas y texturas mayores a 15 se consideran muy finas (Magesh et al., 2011, 2012; Smith, 1950). La textura del drenaje en la cuenca de estudio tiene un valor de 17,89, clasificándola como cuenca de textura ultrafina.

Relación de Alivio

Se conoce como la relación entre la diferencia de alturas con la longitud máxima horizontal de la cuenca. Mide la pendiente general de la cuenca de drenaje y es un indicador importante al momento de analizar los procesos de erosión de la cuenca.

La Relación de alivio de la cuenca de estudio es de 0,04 indicando que la cuenca tiene una pendiente suave.

2.2.3. Propiedades de la Red Hídrica

El desarrollo de las redes hídricas depende de la geología y la precipitación, además de las influencias exógenas y endógenas. Los resultados de los parámetros calculados para la microcuenca del Arroyo Grande de la Sabana mediante ArcGIS se presentan en la Tabla 10. Numero de segmentos de las corrientes, las longitudes de las Corrientes y las pendientes de la red.

Numero de Corrientes de la Red Hídrica

Los números de segmentos de las corrientes disminuyen a medida que aumenta el orden de la red hídrica. Se calculó el número total por cada orden y el número total de flujo.

Tabla 10. Aspectos de la Red Hídrica AGS.

Orden Red Hídrica	Nº Corrientes Red Hídrica (Nu)	Longitud Total Red Hídrica (km)	Longitud media Red Hídrica (km)	Longitud de la Red Principal (km)	Pendiente Promedio de la Red Hídrica (%)
1	2.167	884,08	0,41		
2	998	427,32	0,43		
3	488	184,74	0,38		
4	305	106,22	0,35	91,61	1,13
5	155	51,53	0,33		
6	145	59,52	0,41		
Total	4.258	1.713,40	0,40		

Orden de la red Hídrica

Se calculó el orden de la red hídrica mediante el método Strahler (1964). Esta clasificación asigna un nivel de orden de magnitud relativo para cada segmento de flujo, determinada por la disposición secuencial de los afluentes con respecto al cauce principal; así, se define el Orden de la red hídrica como una medida de la posición de una secuencia en la jerarquía de los afluentes. Las redes de drenajes

de la cuenca de estudio son de sexto orden (Fig. 14). Las clasificaciones de las redes hídricas proporcionan una base cuantitativa simple para determinar el grado de desarrollo de las redes de drenajes de las cuencas. Una cuenca con una red hídrica de orden 6, se considera bien drenada a nivel cualitativo, es decir con rápida respuesta al escurrimiento superficial; aunque para dar una mejor definición de la capacidad de drenaje se debe complementar el análisis con la densidad de drenaje.

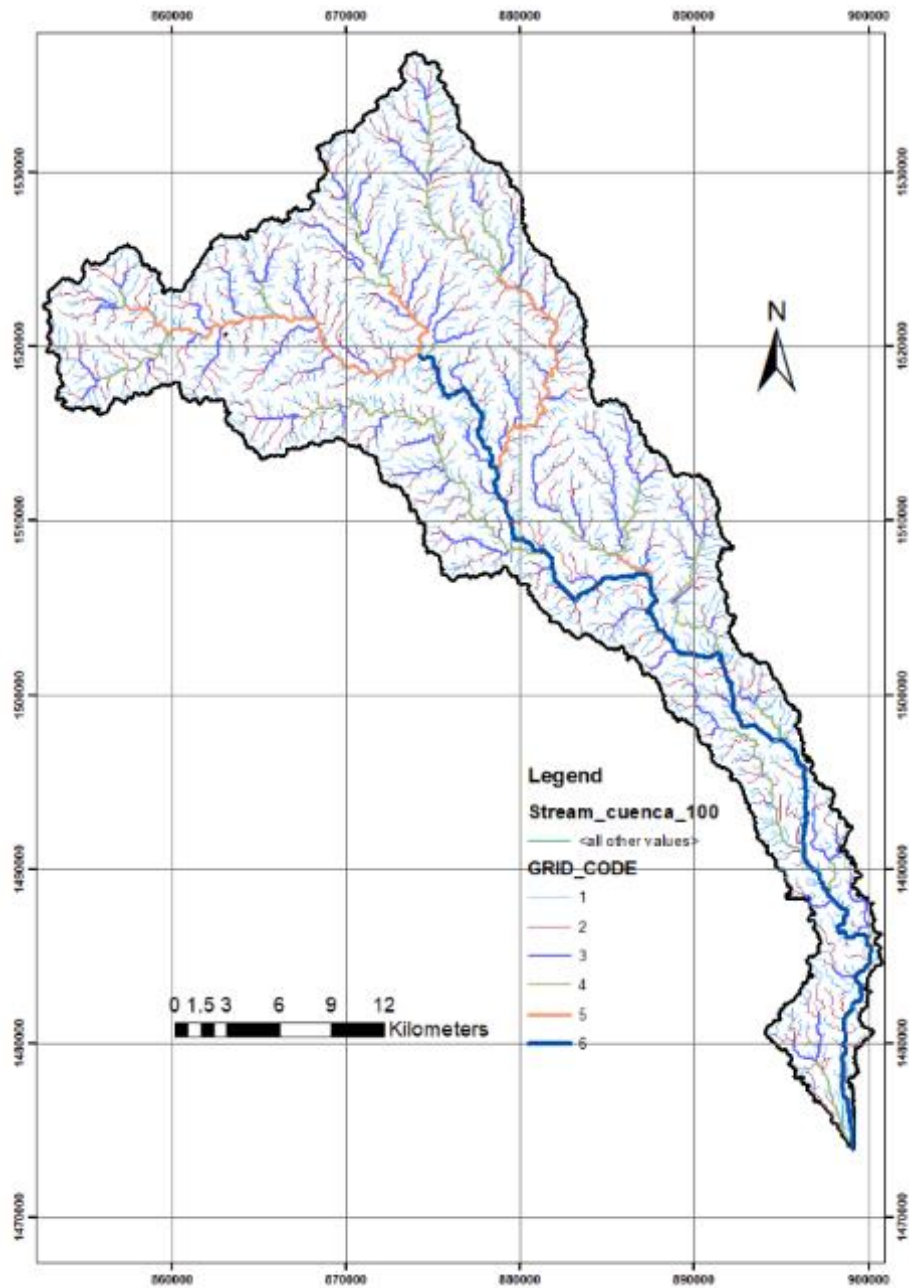


Figura 14. Mapa de Orden de la Red Hídrica cuenca AGS

Longitud de los segmentos de la red hídrica

La longitud de la corriente es indicativo del área contribuyente de la cuenca de un orden dado. En la tabla 11, se muestran las longitudes calculadas para la cuenca AGS.

Longitud media de la red Hídrica

Es una propiedad característica relacionada con el tamaño de los componentes de la red de drenaje y sus superficies de cuencas contribuyentes. Se obtiene mediante la relación entre la longitud total de la red hídrica por orden de flujo con el número de segmentos de la red de hídrica (Magesh et al., 2011, 2012).

2.2.4. Tiempo de Concentración

El Tiempo de concentración se define como el tiempo en que toda la cuenca contribuye al flujo superficial cuando se tiene una lluvia uniforme en toda la cuenca (U. J. J. Vélez & Botero, 2011). Su valor se puede estimar con base a una serie de ecuaciones empíricas que se han realizado teniendo en cuenta variables morfológicas de la cuenca como propias de los eventos de precipitación. Para la cuenca AGS se calculó el Tiempo de Concentración Utilizando las ecuaciones mencionadas en la Tabla 4. Que relacionan parámetros de forma de la cuenca, Los valores obtenidos se muestran en la tabla 11. Se destaca que el valor promedio para el tiempo de concentración es de 25,79 horas. El coeficiente de varianza para los resultados está en el rango del 29%, es decir que los resultados presentan baja varianza.

Tabla 11. Tiempos de Concentración cuenca AGS.

Autor de la Ecuación	Tc (horas)
Kirpich	21,21
Temez	28,78
Giandotti	19,70
California Culvert Practice	21,24
Bransby-Williams	38,02
Tiempo de Concentración Promedio	25,79
Desviación estándar	7,70
Coeficiente de varianza	29%

2.2.5. Inferencias Hidrológicas

Según los valores del radio de elongación, del radio de circularidad, el factor de forma, el relieve y la curva hipsométrica, la cuenca AGS está en una etapa de equilibrio y presenta una forma alargada con relieves considerables en la parte norte correspondiente a la subregión Montes de María y un relieve más bajo en la zona de la subregión Sabanas. Estos resultados indican que en la parte norte de la cuenca se presentan caudales moderados y en la parte sur bajos caudales de escorrentía bajos como respuestas a eventos de precipitación. La forma alargada sugiere que la zona no es propensa a inundaciones.

El drenaje de la cuenca presenta densidad moderada, este tipo de densidades se relacionan con áreas modestamente empinadas o montañosas, con materiales subterráneos moderadamente permeables, con altas perspectivas de agua subterránea, lo cual se puede confirmar con los valores de la relación de alivio, que indican moderadas a bajas capacidades de descarga y alto potencial de aguas subterráneas.

La red de drenaje es de sexto orden y presenta una forma dendrítica o ramificada, lo cual es un indicador de buena respuesta hidrológica a la escorrentía, además de textura muy fina que indica homogeneidad en los materiales del suelo y vegetación escasa. Sobre la cuenca no se aprecian zonas de controles de drenajes naturales. El aspecto de la cuenca está marcado por vertientes orientadas hacia el oeste con mayor presencia en la parte norte, dando indicios de baja vegetación, baja humedad y alta evaporación.

Analizando el comportamiento de la red de drenaje, los valores de textura y densidad de drenaje, se infiere características moderadas de tipo erosivo por efecto climático sobre la superficie del terreno en la parte norte de la cuenca y arrastre de material sobre la zona media y baja.

Los parámetros de drenajes observados revelan las áreas sobre las cuales se pueden adelantar medidas y obras para mejorar las recargas subterráneas y el manejo de aguas superficiales de las escorrentías que se generan con las lluvias.

Los parámetros morfométricos evaluados mediante SIG ayudan a entender varias características del terreno como la dinámica de las redes de hídricas, las

distribuciones de la vegetación según la orientación del terreno, demarcaciones de los patrones de flujo y los accidentes geográficos; además el formato SIG se puede integrar con la información temática existente como uso/cobertura de tierras, formas de terreno, tipos de suelos y parámetros como el Numero de Curva, lo que es una ayuda fundamental para una mejor planificación y administración de las cuencas, en la gestión hídrica, en el manejo de recursos naturales y planificación de aguas subterráneas.

2.2.6. Análisis de la Precipitación en la Cuenca Arroyo Grande de la Sabana (AGS)

Es de vital importancia determinar las Precipitaciones y realizar análisis de frecuencia de flujo como base fundamental para llevar a cabo caracterizaciones hidrológicas de las cuencas de drenaje. Esta información es el insumo primario para los estudios del Número de Curva. Mediante distribuciones de probabilidad se analizan las frecuencias de las informaciones hidrológicas existentes. Para la zona de estudio se obtuvo la información hidrológica del IDEAM en la estación Aeropuerto Rafael Barvo en Corozal – Sucre, para un periodo de 75 años de registro desde 1.943 hasta 2.017; de la cual, se realizaron los análisis de frecuencias correspondientes a las Precipitaciones máximas en 24 horas y Precipitaciones totales mensuales mediante el método de Gumbel para diferentes tiempos de retorno.

En la Figura 14 se presenta los resultados de los análisis de frecuencias para la Precipitación Total mensual en el periodo de los años de estudio junto con las desviaciones estándar, de la cual se identifican los meses con mayor precipitación entre mayo y octubre. En la Figura 15 se presenta la tendencia de la Precipitación anual total, mostrando una tendencia al incremento con marcados picos de frecuencias máximas que llegan hasta 1.500 mm anuales, con probabilidad de ocurrencia de 25 años. En las tablas 12 y 13, se presentan los resultados de las proyecciones de las precipitaciones con periodos de retorno a 5, 10, 15 y 25 con su respectivo grafico (Fig. 17 y 18).

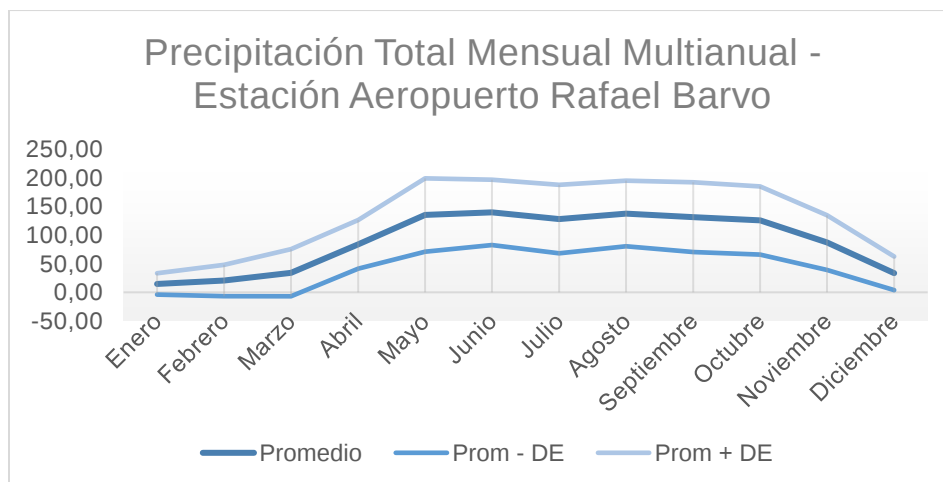


Figura 15. Precipitación Total Mensual Multianual - Estación Aeropuerto Rafael Barvo

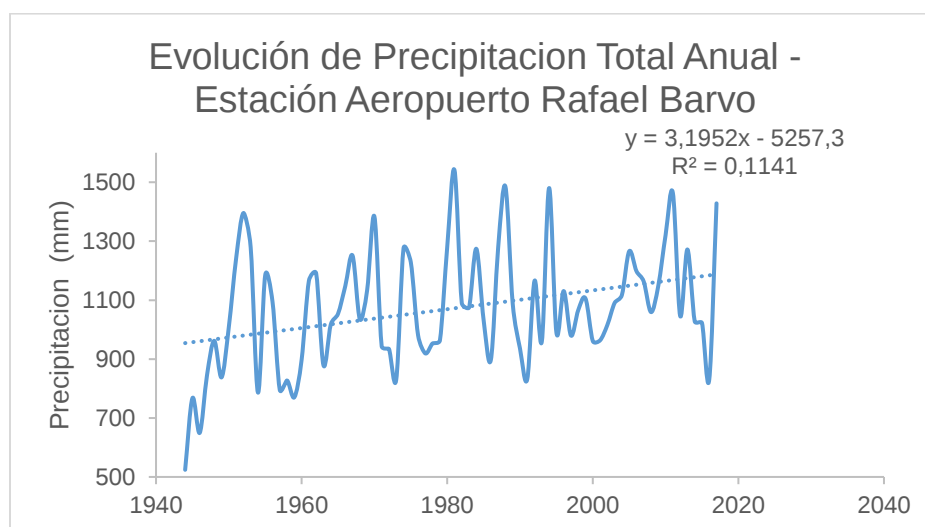


Figura 16. Evolución de Precipitación Total anual - Estación Aeropuerto Rafael Barvo

Tabla 12. Precipitación máx. 24 horas para diferentes periodos de retorno cuenca AGS.

Gumbel		
T (años)	Pmax24	Prob. (Pmax<=x)
2	72,04	0,5
5	90,96	0,8
10	103,48	0,9
25	119,30	0,96
50	131,04	0,98
100	142,69	0,99
200	154,30	0,995
500	169,62	0,998

Tabla 13. Precipitación total anual para diferentes periodos de retorno cuenca AGS.

Gumbel		
T (años)	P total anual	Prob. (Pmax<=x)
2	1038,44	0,5
5	1232,93	0,8
10	1361,69	0,9
25	1524,39	0,96
50	1645,08	0,98
100	1764,89	0,99
200	1884,26	0,995
500	2041,74	0,998

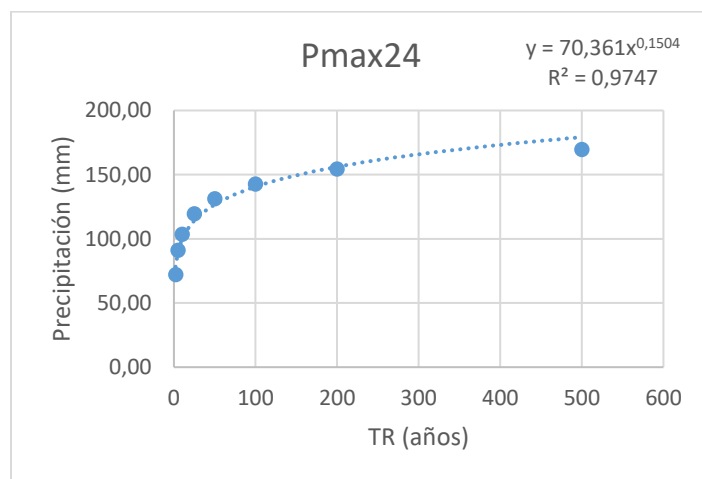


Figura 17. Precipitación máx. 24 horas para diferentes periodos de retorno - cuenca AGS

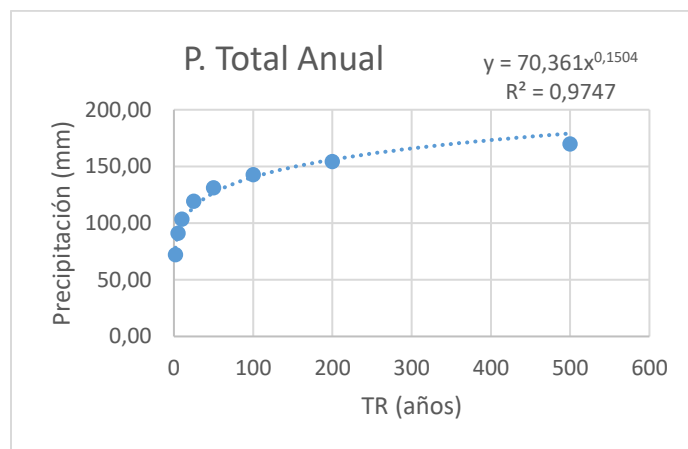


Figura 18. Precipitación total anual para diferentes periodos de retorno - cuenca AGS

Tabla 14. Días de precipitación, TMM y Evapotranspiración, estación Apto. Rafael Barvo.

Características	Valores	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Número de días totales de precipitación	Prom	2	2	3	8	12	11	11	12	11	12	9	4
	Max	5	6	9	12	20	17	20	18	17	17	15	10
	Min	0	0	0	2	5	6	5	7	7	7	6	0
Temperatura media mes (Tmm) - (°C)	Prom	27,7	28	28,2	28,1	27,7	27,6	27,8	27,5	27,1	26,7	26,8	27,3
	Max	29,4	29,4	29,8	29,7	29,1	29,4	29,4	29	28,4	27,9	28,5	28,9
	Min	26,1	26,3	26,6	26,6	26,2	26,4	26,3	26,1	25,7	25,5	25,6	25,6
Evapotranspiración mm/día - (Thornthwaite)	Tmm> 26,5°C	4,8	4,9	5	5	4,8	4,8	4,9	4,8	4,7	4,6	4,6	4,7

3. ESTIMACIÓN DE LA INFITRACIÓN POTENCIAL EN LA CUENCA ARROYO GRANDE DE LA SABANA

3.1. Introducción

La infiltración del agua en el suelo es el proceso inicial que genera la dinámica de las recargas a los acuíferos y los flujos base sobre una cuenca. Las zonas que dependen de las fuentes subterráneas requieren de una gestión de los recursos hídricos eficientes. Por tal motivo es importante identificar las áreas con mejores condiciones de infiltración y estimar la capacidad de retención que puede aportar para que el proceso de recarga se presente.

El método del número de curva (CN-SCS) es una herramienta validada a nivel mundial para la estimación de Infiltración y la Escorrentía en zonas áridas y semiáridas, utilizándose ampliamente para gestiones ambientales, estudios de conservaciones y protección, aun en cuencas no calibradas. Este método logra una interacción con las herramientas SIG, aumentando la precisión y la facilidad de aplicación, además de disminuir costos. Para su aplicación se requiere del manejo de la información disponible como los tipos de suelos y la cobertura (usos) del terreno.

En este capítulo se llevará a cabo la determinación del NC y los cálculos de la Infiltración en la cuenca AGS mediante las herramientas SIG. Los resultados obtenidos se presentan en mapas para mostrar la variación espacial y así identificar las zonas que ayuden a mejorar la recarga de acuíferos por sus buenas condiciones de infiltración. Los análisis del NC y la infiltración se realizaron para las diferentes condiciones de humedad.

Como temas complementarios se realizará la estimación de la escorrentía superficiales para eventos de lluvia, debido a que es un parámetro fundamental en la estimación de la Recarga mediante el método del Balance de Cloruro.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Numero de Curva

EL método del Número de Curva es utilizado para estimar la escorrentía y la infiltración potencial máxima de los eventos de precipitación sobre una cuenca hidrográfica. Fue desarrollado por Soil Conservation Service (SCS), y es el producto de una gran investigación de campo y del esfuerzo de importantes investigadores. Su desarrollo fue motivado, en la década de 1950, por la aprobación de la Ley de protección de cuencas y prevención de inundaciones agosto de 1954, en los Estados Unidos (NSCS, 1999b).

El método se desarrolla a partir de datos de cuencas medidas conociendo los suelos, la cubierta y las condiciones hidrológicas. Los datos obtenidos ayudan a relacionar la lluvia, la retención máxima potencial y la escorrentía, mediante un valor adimensional (Numero de Curva) que representa el promedio de los valores de la respuesta de la zona de estudio ante la precipitación.

La ecuación para el cálculo de la escorrentía con el método del Número de Curva, se obtiene de las siguientes consideraciones:

Conforme (NSCS, 1999c), La infiltración acumulada después que la escorrentía se inicia (F) es al potencial máximo de retención (S), como la escorrentía directa (Q) es al potencial máximo de escurrimiento, este último definido como la diferencia entre la precipitación y la abstracción inicial (P - Ia).

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{(P - Ia)} \quad (1)$$

De la ecuación de balance hídrico, obtenemos:

$$P = Q + Ia + F \quad (2)$$

Despejando F de (2) y se reemplaza en (1), se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (3)$$

El método estándar SCS-CN se basa en la ecuación (3) que expresa la relación entre precipitación, P (mm); escorrentía, Q (mm) y la abstracción inicial Ia (mm).

Luego, el análisis de los registros de precipitación y escorrentía de eventos de tormenta indica que hay un umbral que debe excederse antes de que se produzca la escorrentía. La tormenta debe satisfacer la interceptación, el almacenamiento de depresión y el volumen de infiltración antes del inicio de la escorrentía. La lluvia requerida para satisfacer los volúmenes anteriores se denomina abstracción inicial (Ia). Se producirán pérdidas adicionales a medida que comienza la infiltración después de la escorrentía, mientras que la infiltración acumulada aumenta con la lluvia hasta una cantidad de retención máxima. La escorrentía también aumenta con la lluvia (Shadeed & Almasri, 2010).

Por consiguiente, la ecuación (3) es aplicable cuando la $P > Ia$; En caso contrario, donde la $P < Ia$, la escorrentía será 0.

A través de los estudios de muchas cuencas agrícolas pequeñas, se encontró que abstracción inicial (Ia), se aproximaba mediante ecuaciones empíricas a la relación $Ia = 0,2S$. Quedando de la expresión (3) de la siguiente manera:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad (4)$$

Al eliminar la Ia , como variable independiente, podemos utilizar la combinación de S y P , para la estimación de la escorrentía. El parámetro del potencial máximo de retención (S), varía con la humedad del suelo antecedente y otras variables, Puede tomar cualquier valor entre cero e infinito, sin embargo, en la práctica solo se toma valores del intervalo 0 a 15 pulgadas, por lo que se requiere el uso de varias cifras decimales para lograr una precisión en este rango. Por esta razón, se estableció un nuevo parámetro denominado Número de curva (CN), el cual tiene una relación inversa con S y presenta un rango limitado entre 0 y 100 (NSCS, 1999c). Un CN de

100 representa una cuenca completamente impermeable con retención cero, en donde toda la lluvia se convierte en escorrentía. Un CN de 0 representa conceptualmente el otro extremo, con la captación reteniendo toda la precipitación y donde no se generen escorrentías, independientemente de la cantidad de lluvia (Shadeed & Almasri, 2010). Su rango práctico es de 40 a 98 y es usado como valor entero.

S, se puede estimar como:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (5) \text{ (pulgadas)}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6) \text{ (milímetros)}$$

Grupo hidrológico de suelo (HGS)

Los suelos se clasifican en cuatro HSG (A, B, C y D) de acuerdo con su tasa de infiltración mínima, que se obtiene para el suelo desnudo después de una humectación prolongada. La tasa de infiltración es la velocidad a la que el agua ingresa al suelo en la superficie del suelo. Está controlado por las condiciones de la superficie. HSG también indica la velocidad de transmisión, la velocidad a la que el agua se mueve dentro del suelo. Esta tasa está controlada por el perfil del suelo. Podemos definir los grupos hidrológicos de la siguiente manera (NRCS, 1986):

- **Grupo A:** suelos con bajo potencial de escurrimiento aun cuando están completamente húmedos. Son suelos profundos donde el agua es transmitida libremente a través del perfil; comúnmente tienen menos del 10% de arcilla y más del 90% de arena, con texturas que varían de arenosa a gravillosa, tienen alto potencial de transmisión de agua (más de 7,6 mm/h).
- **Grupo B:** suelos con un potencial de escurrimiento moderadamente bajo cuando están completamente húmedos. El movimiento del agua dentro del perfil no está impedido. Son suelos de moderadamente profundos a

profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados y texturas que van desde las moderadamente finas a las moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua (3,8 – 7,6 mm/h).

- **Grupo C:** tienen un potencial de escurrimiento moderadamente alto cuando están húmedos. Son suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas. Estos suelos presentan una tasa baja de transmisión de agua (1,2 – 3,8 mm/h).
- **Grupo D:** suelos con alto potencial de escurrimiento y tasas de infiltración muy bajas cuando están totalmente húmedos. Pueden presentar horizontes arcillosos en la superficie o próximos a ella, fenómenos de expansión - contracción, nivel freático permanentemente alto o ser suelos poco profundos sobre material impermeable. Las texturas son arcillosas, con más de un 40% de arcilla y menos del 50% de arena. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión de agua (0 – 1,2 mm/h).

Tabla 15. Equivalencias entre las clases de texturas del USDA y los grupos hidrológicos.³

TEXTURA	Brakensiek & Rawls (1983)	Témez (1987)	MOPU (1990)	MOPT (1992)	Ferrer- Julià (2003)	NRCS (2007)
Arenosa (Ar)	A	A	A	A	A	A
Arenoso-franca (Ar-F)	A	A	A	A-B	A	A*-B
Arcillosa (a)	D	D	D	D	D	C*-D
Arcillo-arenosa (a-Ar)	D	C	C	C	C	C*
Arcillo-limosa (a-L)	D	D	D	C	D	C*
Franca (F)	B	B	B	C	C	A*-B*-C
Franco-Arenosa (F-Ar)	A	B	B	B	B	A*-B
Franco-Arcillosa (F-a)	D	B-C	C	C	C	C
Franco-arcillo-arenosa (F-a-Ar)	C	C	B	C	C	B*-C
Franco-arcillo-limosa (F-a-L)	D	D	C	C	C	C
Franco-limosa (F-L)	B	B	B	B	C	A*-B*-C
Limosa (L)	B	C	C	A	D	B*

³ *Estructura con buenos agregados, baja densidad aparente y/o más del 35% de fragmentos rocosos.

Fuente: (DÍAZ CARVAJAL, 2015; Mongil & Navarro, 2012).

Por fuera de los estados unidos pueden existir limitaciones al momento de aplicar el método por la clasificación de los suelos, pues las tablas presentadas corresponden a caracterizaciones propias de su región y es poco disponible las caracterizaciones propias para otros países. Ahora bien, se puede obtener el grupo hidrológico a menos de forma orientativa, recurriendo a criterios como la textura (DIAZ CARVAJAL, 2015).

Tipo de cobertura de terreno y tratamientos

Las condiciones de la superficie de una cuenca son evaluadas por medio del uso de la tierra y las distintas clases de tratamientos. Se considera el uso de la tierra como la cobertura y esta incluye todo tipo de vegetación, suelos desnudos, usos no agrícolas, superficies impermeables y cuerpos de agua. Los tratamientos del terreno se aplican directamente a los usos agrícolas del suelo e incluyen prácticas mecánicas como contorneo, terrazas entre otros (NSCS, 2002).

En la infiltración, juega un papel importante la vegetación, debido a que le brinda diferentes dinámicas que mejoran las condiciones para que el flujo ingrese al subsuelo, dentro de estas dinámicas se resaltan, el aumento de la rugosidad de la superficie retardando el flujo del agua y aumentando el tiempo de contacto; los canales de infiltración aportados por los sistemas radiculares de las plantas; la protección directa que aporta ante los impactos de las gotas de lluvia, evitando la erosión y el aumento de la materia orgánica en el suelo mejorando la estructura del mismo, (DIAZ CARVAJAL, 2015).

Condición hidrológica

Según la Resolución 0865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, el tipo de vegetación y la densidad de la cobertura en la cuenca tienen una gran influencia en la capacidad de infiltración del suelo. Se definieron las siguientes categorías de cobertura para pasto natural. El porcentaje se estima cualitativamente en los planos respectivos (Tabla 16):

Tabla 16. Categorías de coberturas para Pastos y Bosque.⁴

Categorías de cobertura para Pasto natural	
Pobre	< 50% del área cubierta de pasto. Alta intensidad de pastoreo.
Media	50% - 75% de superficie cubierta de pasto. Intensidad media de pastoreo.
Buena	> 75% del área cubierta de pasto. Intensidad leve de pastoreo.
Categorías de cobertura para Bosques	
Pobre	Bosques regularmente quemados con pocos arbustos y poco humus vegetal.
Media	Con algunos arbustos, moderada cantidad de humus vegetal y pasto
Buena	Protegido con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie.

Condición antecedente de escorrentía (ARC)

La variabilidad en la CN resulta de la intensidad y duración de la lluvia, la precipitación total, las condiciones de humedad del suelo, la densidad de cobertura, la etapa de crecimiento y la temperatura. Estas causas de variabilidad se denominan colectivamente Condición de escorrentía antecedente (ARC). ARC se divide en tres clases: II para condiciones promedio, I para condiciones secas y III para condiciones más húmedas, (NSCS, 2004).

Los resultados que arroja el método corresponden a los valores medios, los resultados de las relaciones llevadas a cabo para asimilar los comportamientos para las diferentes condiciones se muestran en la tabla anexo 2.

3.2.2. Metodología

Sobre la cuenca del Arroyo Grande de la Sabana, se aplicó el método del Número de Curva basado en las herramientas SIG, Mediante el almacenamiento, procesamiento, análisis y representación espacial de la información. La fig. 19 Muestra la metodología general llevada a cabo (Ferrér, Rodríguez, & Estrela, 1995; Shadeed & Almasri, 2010).

Los datos y herramientas utilizados para este proceso fueron:

⁴ Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004)

- Modelo de Elevación Digital (DEM): Se utilizó el archivo SRTM 90m DEM versión 4 entre las latitudes 5 – 10 N, longitudes 80 y 75 W. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Cartografía de Colombia: Se utilizó la cartografía del IGAC Colombia en escalas 1:100.000. Dentro ellas están la información de Drenajes, Zonas Hidrogeológicas, Geología de Sucre, Cobertura vegetal, Cubierta del terreno, en formatos ESRI Shapefile (SHP). Disponible en: <http://www.siac.gov.co/>
- Programa ArcGIS versión 10.5 y extensión ArcCN-Runoff. (Zhan, Huang, & Ave, 2004)

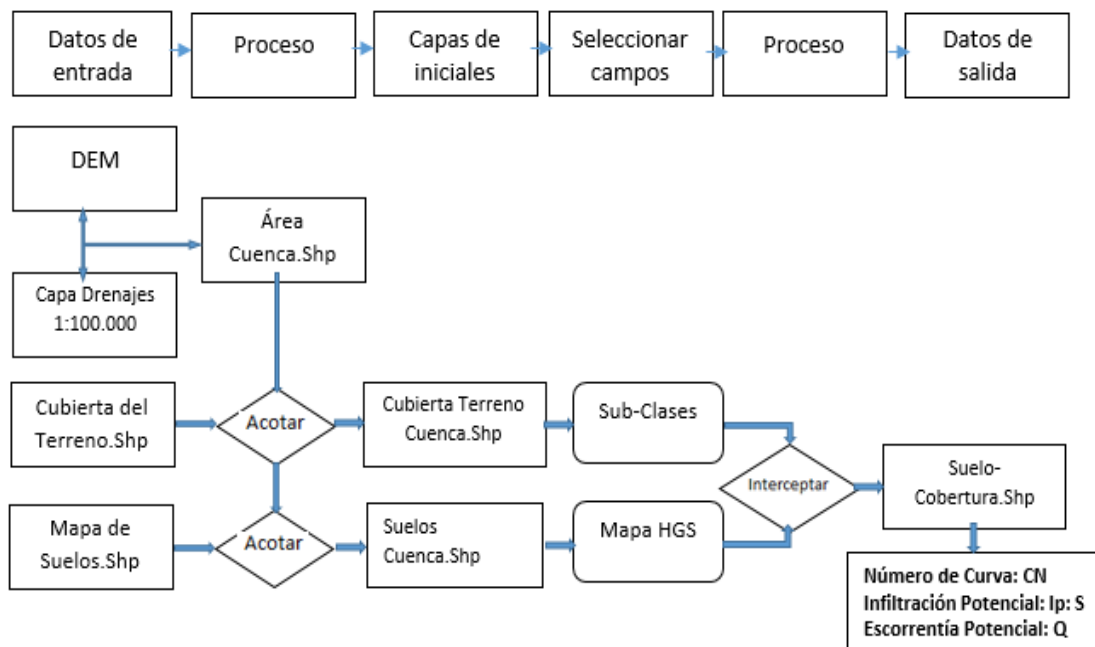


Figura 19. Diagrama de flujo del Método CN y S.

Para estimar el NC en cuenca AGS, se realizaron los cortes específicos con las capas de suelos y coberturas de la cuenca (uso del suelo). Sobre la capa de Coberturas de la cuenca, se realizaron las respectivas clasificaciones (Subclases), según los parámetros del método del NC identificando las zonas correspondientes a zonas urbanas, bosques, cultivos, cuerpos de agua, pastos, suelo desnudo, vegetación secundaria. Sobre la capa de Suelos de la cuenca, se definió el tipo de grupo hidrológicos (HGS) correspondiente a la características Litológicas y las coberturas vegetales. Definidos las capas de los mapas de Subclases y HGS grupos

hidrológicos de suelos, se realizó el proceso de interceptar ambas capas así se unifico la información en una sola base. Concatenada la información de Subclases y HGS, se utilizó la extensión de ArcGIS ArcCN-Runoff, aplicando los parámetros propios del software, obteniendo así el NC, obteniendo de esta forma los respectivos valores del Número de Curva NC II.

Obtenido en NC II para las diferentes áreas sobre la microcuenca de estudio, se exportan los datos a una tabla de Excel y se calculan los valores de NC I y NC III. Con el NC III, se aplican las ecuaciones 4 y 6, para el potencial máximo retención (S) y la esorrentía (Q).

Obtenidos los valores de S y Q , se adicionaron los resultados a la capa base de la cuenca de estudio en ArcGIS y se procedieron a generar los respectivos mapas temáticos. Para la calibración de los resultados, se realizaron los análisis de los resultados obtenidos de la infiltración con el método del NC con los reportados en los diferentes estudios de infiltración eficaz realizados en la zona.

3.3. Resultados y Discusión

3.3.1. Cobertura del Terreno

Los usos y tratamientos del suelo se utilizan para determinar los complejos hidrológicos de coberturas del terreno. El efecto de las condiciones de la superficie de una cuenca es determinante para las respuestas ante eventos de lluvia. El área ocupada por cada categoría del mapa de coberturas y su porcentaje de participación sobre la cuenca AGS se presentan en la tabla 17. La representación gráfica se muestra en la Figura 20.

La cobertura del terreno de la cuenca AGS se determina conforme a las especificaciones del método del NC (NSCS, 2002) y se clasifica en siete categorías: Bosque (2,44%), Cuerpos de agua (1,10%), Cultivos (0,31%), Infraestructura Urbana (4,15%), Pasto (90,69%), Suelo desnudo (0,18%) y Vegetación Secundaria (1,12%). La categoría de Pastos es la más común en la cuenca, siendo en su mayoría pastos

pobres. Este dato confirma lo definido en el capítulo 2, donde la caracterización morfológica de la cuenca muestra que la zona presenta baja cobertura vegetal. La zona de Bosques, se ubica sobre los cauces de las corrientes que se forman a lo largo de la cuenca. Trabajos previo caracterizan la zona de la cuenca como del 90% con aptitud ganadera y agrícola (Aguilera Diaz, 2005; CARSUCRE, 2016b).

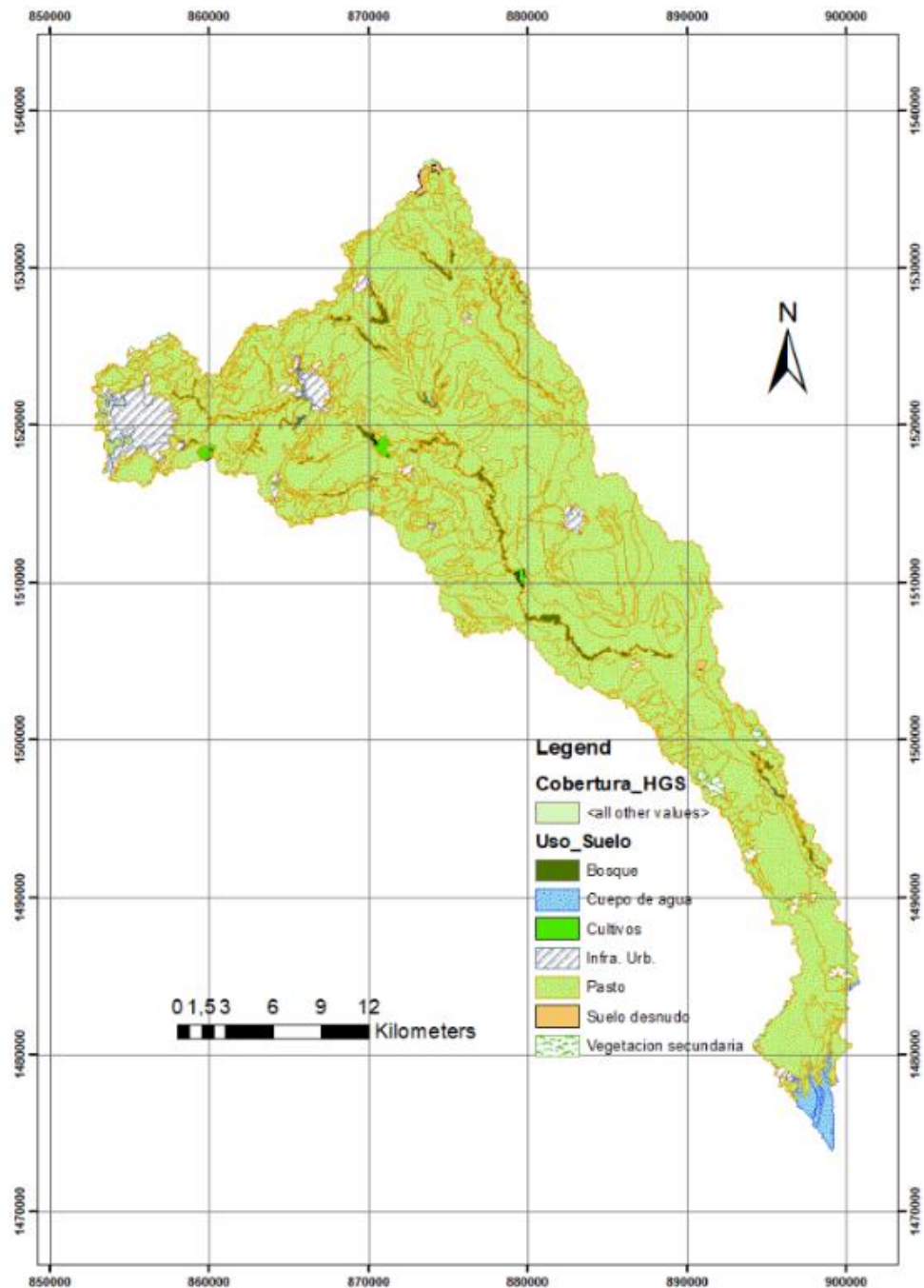


Figura 20. Mapa de Cobertura del terreno sobre la cuenca AGS

Tabla 17. Categorías de la Cobertura del Terreno cuenca AGS.

Cobertura del Terreno	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque	1.720	2,44%
Bosque de galería y ripario	1.720	2,44%
Cuerpo de agua	779	1,10%
Zonas Pantanosas	22	0,03%
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	75	0,11%
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	682	0,97%
Cultivos	221	0,31%
Otros cultivos transitorios	171	0,24%
Mosaico de cultivos	50	0,07%
Infraestructura Urbana	2.928	4,15%
Tejido urbano continuo	2.679	3,80%
Zonas industriales o comerciales	197	0,28%
Aeropuertos	27	0,04%
Zona de disposición de residuos	26	0,04%
Pasto	63.972	90,69%
Pastos limpios	49.095	69,60%
Pastos arbolados	1.591	2,26%
Pastos enmalezados	3.483	4,94%
Mosaico de pastos y cultivos	5.520	7,82%
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1.105	1,57%
Mosaico de pastos con espacios naturales	3.178	4,51%
Suelo desnudo	129	0,18%
Tierras desnudas y degradadas	96	0,14%
Zonas quemadas	33	0,05%
Vegetación secundaria	791	1,12%
Arbustal	781	1,11%
Vegetación secundaria o en transición	10	0,01%
Total general	70.541	100,00%

3.3.2. Grupos Hidrológicos de Suelo (GHS)

La definición de los GHS se realiza mediante el análisis y clasificación según los factores propios de la superficie (NSCS, 2009). En la tabla 18 se representan los GHS para la cuenca AGS.

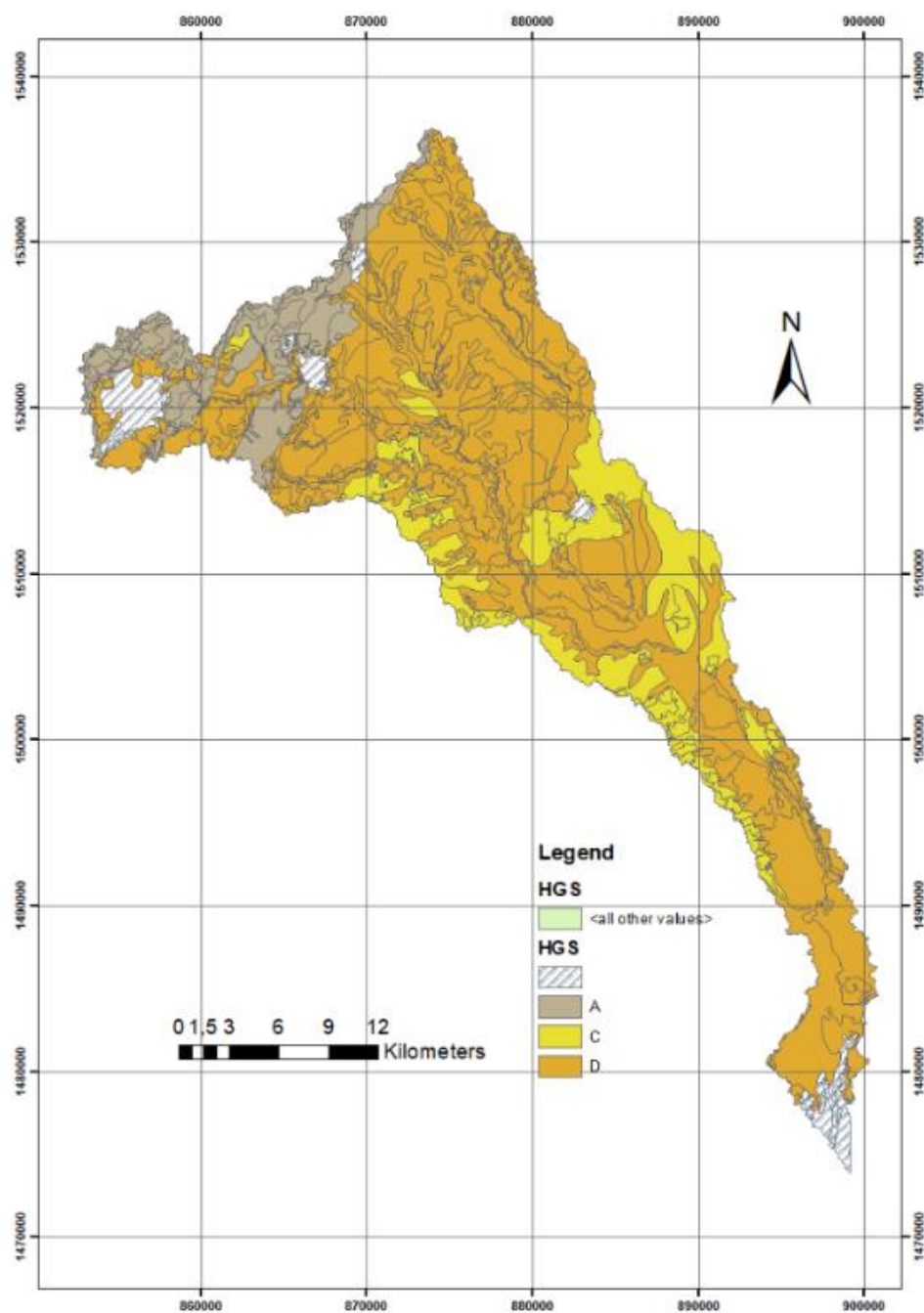


Figura 21. Mapa de Grupos Hidrológicos de suelos cuenca AGS

El 27,05% de los suelos de la cuenca pertenecen a los grupos hidrológicos A y C, con capacidades buenas y moderadas para la infiltración, respectivamente. Parte importante de la cuenca correspondiente al 68,78% está compuesta por suelos pertenecientes al grupo hidrológico D, el cual es representativo de un alto escurrimiento y baja infiltración. El 4,16% de la cuenca no se clasifica dentro de grupos hidrológicos de suelos, debido a que corresponden a texturas de zonas urbanas y cuerpos de agua.

La distribución de los grupos hidrológicos de suelo en la cuenca AGS se presenta en la figura 21. El grupo hidrológico A, se ubica en la zona norte de la cuenca, correspondiente a la subregión de los Montes de María, donde se concentran las mayores pendientes y los relieves altos. El grupo D se concentra en mayor proporción hacia la subregión Sabanas, centro y sur de la cuenca bordeando el cauce del Arroyo Grande, a nivel general son texturas muy finas dato que confirma los resultados presentados en el capítulo 2, donde la Morfometría muestra texturas muy finas. Los valores de C se concentran en los márgenes del centro de la cuenca.

Tabla 18. Grupos Hidrológicos del suelo en la cuenca AGS.

Grupo Hidrológico	Textura	Área (ha)	Porcentaje (%)
A	Arenoso	7.509,2	10,65%
C	Arcillo-Arenoso	11.573,9	16,41%
D	Arcillosa	48.520,5	68,78%
No Aplica GHS	Cuerpo de agua	1.033,5	1,47%
No Aplica GHS	Zona Urbana	1.903,4	2,70%
Total general	-	70.540,5	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Distribución espacial del NC

Para la cuenca AGS se realizó el procesamiento de la información de los mapas de Grupos Hidrológicos del suelo (GHS) y de Cobertura del terreno, mediante la extensión ArcCN-Runff del software ArcGIS (Zhan et al., 2004), obteniendo los resultados de NC II, representativo de una condición antecedente de escorrentía tipo II que constituye condiciones medias de variabilidad del NC. Con este resultado se calcularon los valores del NC III para una condición extrema de humedad y NC I para

condiciones secas, representados en la tabla 19. Para la zona de estudio se realizarán los análisis del *NC I*, dado las condiciones del clima semiárido; análisis del *NC II* y *NC III*, los cuales son importantes para eventos de precipitación promedios y de alta humedad, condiciones propicias para generación de altas escorrentías.

Se definen 13 valores del Número de Curva en la cuenca de estudio. La figura 21 presenta la distribución espacial de los resultados para *NC II*, que se clasifican en ArcGIS según el método de Jenks (Método de Quiebres Naturales) en los siguientes rangos 36 – 39, 40 – 75, 76 – 82, 83 – 91, 92 – 98. Las variaciones espaciales del NC correspondientes a cada condición antecedente seca y húmeda, son las mismas para la cuenca de estudio y sus valores se representan en la tabla 18.

Los valores para *NC II* entre 36 y 39 corresponden al 10% del área de la cuenca y son representativos de los GHS tipo A con coberturas de bosques, pastos y vegetación secundaria; los valores de este rango representan zonas con una buena capacidad de infiltración. Este segmento se ubica en la zona norte de la cuenca, sobre la subregión Montes de María y en la zona representativa del suelo arenoso.

Entre los rangos 40 y 75, se ubica el 16% del área de la cuenca, la zona se compone por GHS tipo C en coberturas de bosques, pastos y vegetación secundaria; también se encuentra un área con GHS tipo A con cobertura corresponde a suelo desnudo; esta clasificación aporta unas características de moderada a baja capacidad de infiltración. Los valores de este rango se ubican en las zonas ubicadas en los márgenes del centro de la cuenca.

Los valores entre 76 y 82 representan la mayor parte de la cuenca con el 67% del área, la superficie en esta zona se compone por coberturas de pasto pobres y de GHS tipo D representativos de suelos arcillosos; la capacidad de infiltración es muy baja en esta zona.

Los rangos desde 83 a 91 y 92 a 98, corresponden a áreas del 2 y 4% respectivamente; dentro de estos rangos encontramos las categorías como Áreas urbanas, Cuerpos de agua y zonas inundables con capacidades de infiltración nulas o casi nulas, por lo tanto generan muy alto escurrimiento pues la precipitación que cae sobre estas superficies genera escorrentía de forma directa. Estas zonas están dispersas en el área de estudio.

Tabla 19. NC en la cuenca AGS.

Cobertura Terreno	HGS	Área (ha)	Porcentaje (%)	CN I	CN II	CN III
Bosque	A	157,3	0,22%	21	38	58
Bosque	C	28,7	0,04%	58	75	88
Bosque	D	1.528,9	2,17%	66	82	92
Cultivos	C	11,4	0,02%	80	91	97
Cultivos	D	209,6	0,30%	85	94	98
Pasto	A	6.728,8	9,54%	21	39	59
Pasto	C	11.129,9	15,78%	55	74	88
Pasto	D	45.516,3	64,53%	63	80	91
Vegetación secundaria	A	173,9	0,25%	19	36	56
Vegetación secundaria	C	240,4	0,34%	54	73	87
Vegetación secundaria	D	376,9	0,53%	62	79	91
Zona Urbana	-	5,3	0,01%	98	98	100
Zona Urbana	-	1.626,5	2,31%	98	98	100
Zona Urbana	-	271,6	0,39%	98	98	100
Zona Urbana	A	383,8	0,54%	76	89	96
Zona Urbana	C	130,3	0,18%	85	94	98
Zona Urbana	D	767,4	1,09%	87	95	98
Cuerpo de agua	-	325,6	0,46%	98	98	100
Cuerpo de agua	-	688,2	0,98%	98	98	100
Cuerpo de agua	-	19,8	0,03%	98	98	100
Zona Inundable	D	90,5	0,13%	98	98	100
Suelo desnudo	A	65,3	0,09%	48	68	84
Suelo desnudo	C	33,2	0,05%	72	86	94
Suelo desnudo	D	30,8	0,04%	76	89	96
Total general	-	70.540,5	100,00%	60	76	88
Ponderados				60	76	88

Los Números de Curvas ponderados de la cuenca AGS son 60, 76 y 88 respectivamente para NC I, II y III. Estos resultados se ubican dentro de los escenarios prácticos considerados por el método, $40 \leq NC \leq 98$ (NRCS, 1986). Los valores de la condición promedio y la condición de alta humedad le dan una propiedad elevada de generación de escorrentía superficial, favoreciendo la ocurrencia de procesos erosivos particularmente en suelos poco permeables como los arcillosos; además de generar pérdidas de productividad del suelo,

contaminación de recursos hídricos superficiales y subterráneos por el arrastre de contaminantes e inundaciones entre otros. El resultado para *NC I* representa una moderada capacidad de escorrentía, por tanto, mejores propiedades para la infiltración.

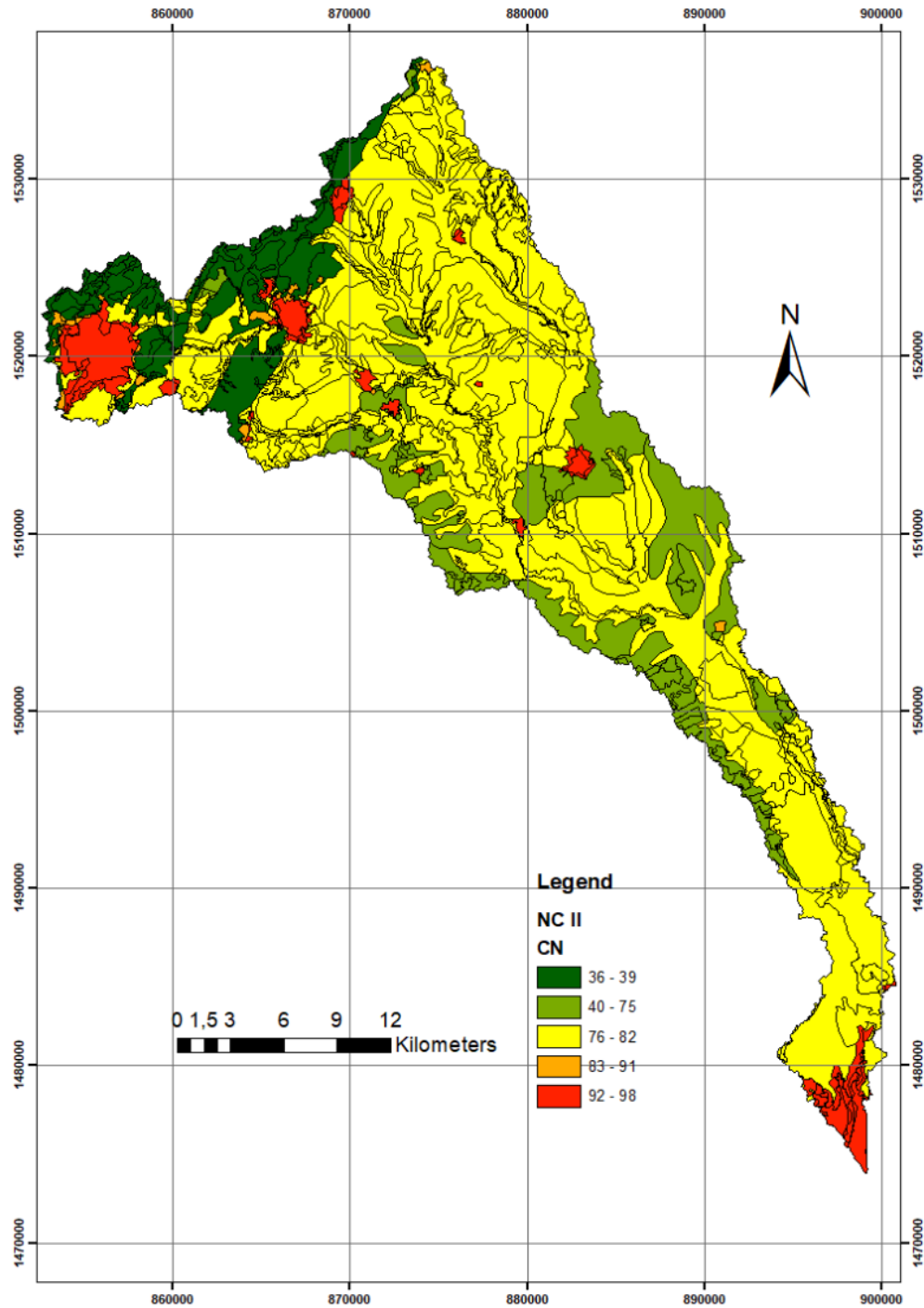


Figura 22. Mapa del Número de Curva de la cuenca AGS

Los Grupos Hidrológicos de los Suelos (GHS) generaron mayor influencia que las Coberturas de superficie en la obtención de los valores del Número de Curva para la zona de estudio. Analizando los mapas de las figuras 21 y 22, se puede apreciar que los cambios significativos en el valor del NC son respuestas a las distribuciones presentadas en los GHS, siendo el tipo A quien más aporta a las propiedades de infiltración.

Los planes de manejo y protección del recurso hídrico en la cuenca de estudio deben enfocarse en actividades que ayuden a mejorar la infiltración sobre las zonas con valores bajos del NC, correspondiente a áreas de alta capacidad de infiltración. Esta meta se logra mediante el mejoramiento de las condiciones de la cobertura del terreno con la aplicación de programas de reforestación con vegetación de la zona, también con la implementación de Obras Civiles y Agrícolas que ayuden a retener el agua en puntos estratégicos, aumentando los tiempos de contacto de agua - superficie, lo cual disminuye la escorrentía y los riesgos a inundaciones en las zonas bajas. Todas estas condiciones ayudarían a reducir el número de curva.

Es importante analizar los efectos que genera la pendiente sobre las respuestas hidrológicas de las cuencas, pues se sabe que a medida que la pendiente aumenta, la escorrentía aumenta y viceversa. El método calcula NC correspondiente a una pendiente de 5%. Estudios muestran errores de cero para pendientes de 5% en diferentes tipos de suelo; también se muestra que para pendientes mayores al 5% los ajustes del método generan mejores resultados (Ebrahimian et al., 2012; Mishra, Chaudhary, Shrestha, Pandey, & Lal, 2014). La cuenca AGS presenta una pendiente media de 4,02% (Tabla 10, capítulo 2); para lo cual se considera que los resultados que presenta están dentro del rango de aplicabilidad del método sin ajustes. Aun así, no se descarta que la aplicación del método NC ajustados para pendientes mayores a 5%, genere resultados más precisos si se adelanta un análisis de mayor enfoque en la zona norte de la cuenca, donde están los valores más bajos de NC y las pendientes más altas.

3.2.2. Estimación de Infiltración potencial

Los estudios experimentales realizados por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) sobre diferentes cuencas de análisis, permitieron relacionar el Potencial

máximo de retención S , con el parámetro de referencia NC. La ecuación muestra la dependencia inversamente proporcional de S , en función del NC.

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (mm)$$

En la tabla 20, se presentan los resultados de S en la cuenca AGS, para los NC en las diferentes condiciones de antecedentes de escorrentías.

Tabla 20. S , Potencial Máximo de Retención en la cuenca AGS.

Cobertura Terreno	HG S	Área (ha)	Porcentaje (%)	$S_{NC I}$ (mm)	$S_{NC II}$ (mm)	$S_{NC III}$ (mm)
Bosque	A	157,3	0,22%	955,52	414,42	183,93
Bosque	C	28,7	0,04%	183,93	84,67	34,64
Bosque	D	1.528,9	2,17%	130,85	55,76	22,09
Cultivos	C	11,4	0,02%	63,50	25,12	7,86
Cultivos	D	209,6	0,30%	44,82	16,21	5,18
Pasto	A	6.728,8	9,54%	955,52	397,28	176,51
Pasto	C	11.129,9	15,78%	207,82	89,24	34,64
Pasto	D	45.516,3	64,53%	149,17	63,50	25,12
Vegetación secundaria	A	173,9	0,25%	1082,84	451,56	199,57
Vegetación secundaria	C	240,4	0,34%	216,37	93,95	37,95
Vegetación secundaria	D	376,9	0,53%	155,68	67,52	25,12
Zona Urbana	-	5,3	0,01%	5,18	5,18	0,00
Zona Urbana	-	1.626,5	2,31%	5,18	5,18	0,00
Zona Urbana	-	271,6	0,39%	5,18	5,18	0,00
Zona Urbana	A	383,8	0,54%	80,21	31,39	10,58
Zona Urbana	C	130,3	0,18%	44,82	16,21	5,18
Zona Urbana	D	767,4	1,09%	37,95	13,37	5,18
Cuerpo de agua	-	325,6	0,46%	5,18	5,18	0,00
Cuerpo de agua	-	688,2	0,98%	5,18	5,18	0,00
Cuerpo de agua	-	19,8	0,03%	5,18	5,18	0,00
Zona Inundable	D	90,5	0,13%	5,18	5,18	0,00
Suelo desnudo	A	65,3	0,09%	275,17	119,53	48,38
Suelo desnudo	C	33,2	0,05%	98,78	41,35	16,21
Suelo desnudo	D	30,8	0,04%	80,21	31,39	10,58
Total general	-	70.540,5	100,00%	231	98	40
Ponderados						

Para un NC II, se reportan un rango de valores de S entre 5,18 mm hasta 451,55 mm que se representan en la figura 23 y se clasifican en ArcGIS según el método de Jenks (Método de Quiebres Naturales).

A nivel grafico se puede observar que la variación de S, es similar a la del NC. Los valores más altos se localizan al norte de la cuenca de estudio con rangos entre 119,53 mm hasta 451,55 mm; en esta zona los GHS son de tipo A y la cobertura vegetal se compone de pasto, el área que cobija es del 10% de la superficie total; Esta zona corresponde a la parte más alta de la cuenca de estudio, en la cual las pendientes son mayores generando alta influencia sobre la escorrentía y disminuyendo el tiempo de contacto del agua con la superficie, por tal razón se deben desarrollar obras y acciones que conlleven a disminuir el efecto que pueda generar los desniveles del terreno, potenciando la capacidad de infiltración existente.

Los valores de S comprendidos entre 67,52 mm y 119,52 corresponden al 16% del área total, se relacionan con los GHS tipo C y cobertura tipo vegetación secundaria. Datos menores a 67,52 mm representan el 74% de la cuenca siendo la zona con mayor presencia de GHS tipo D correspondientes a materiales arcillosos y vegetación tipo pasto pobre.

La Retención máxima potencial presenta valores ponderados de 231, 98 y 40 mm para las condiciones antecedentes secas, normales y húmedas, respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de los rangos prácticos utilizados por el método, 0 – 381 mm (NSCS, 1999c). En otras palabras, se estima que para condiciones secas se presentaran las mayores profundidades de infiltración y que en las condiciones húmedas la capacidad de infiltración potencial disminuye hasta en un 60% de su capacidad media.

Dado a que Sucre tiene un clima semiárido es importante analizar las condiciones secas; Los valores máximos presentados para S en condición seca, muestran profundidades de infiltración de 955 y 1082 mm para GHS tipo A; según la literatura relacionada con el método del NC, estos resultados se confirman si el suelo cumple las siguientes condiciones, que la capa impermeable más cercana y/o nivel freático existente, estén por debajo de 1000 mm; y que su conductividad hidráulica saturada a ese nivel sea por lo menos 36 mm/h, (NSCS, 2009). Estudios de suelos realizados en sitios puntuales del área de recarga, arrojan datos de permeabilidad y tasa de

infiltración hasta de 50 mm/h y estratos impermeables por debajo de los 1000 mm; por tal motivo los resultados obtenidos del máximo potencial de infiltración son válidos, (Jimenez & Rodriguez, 2008).

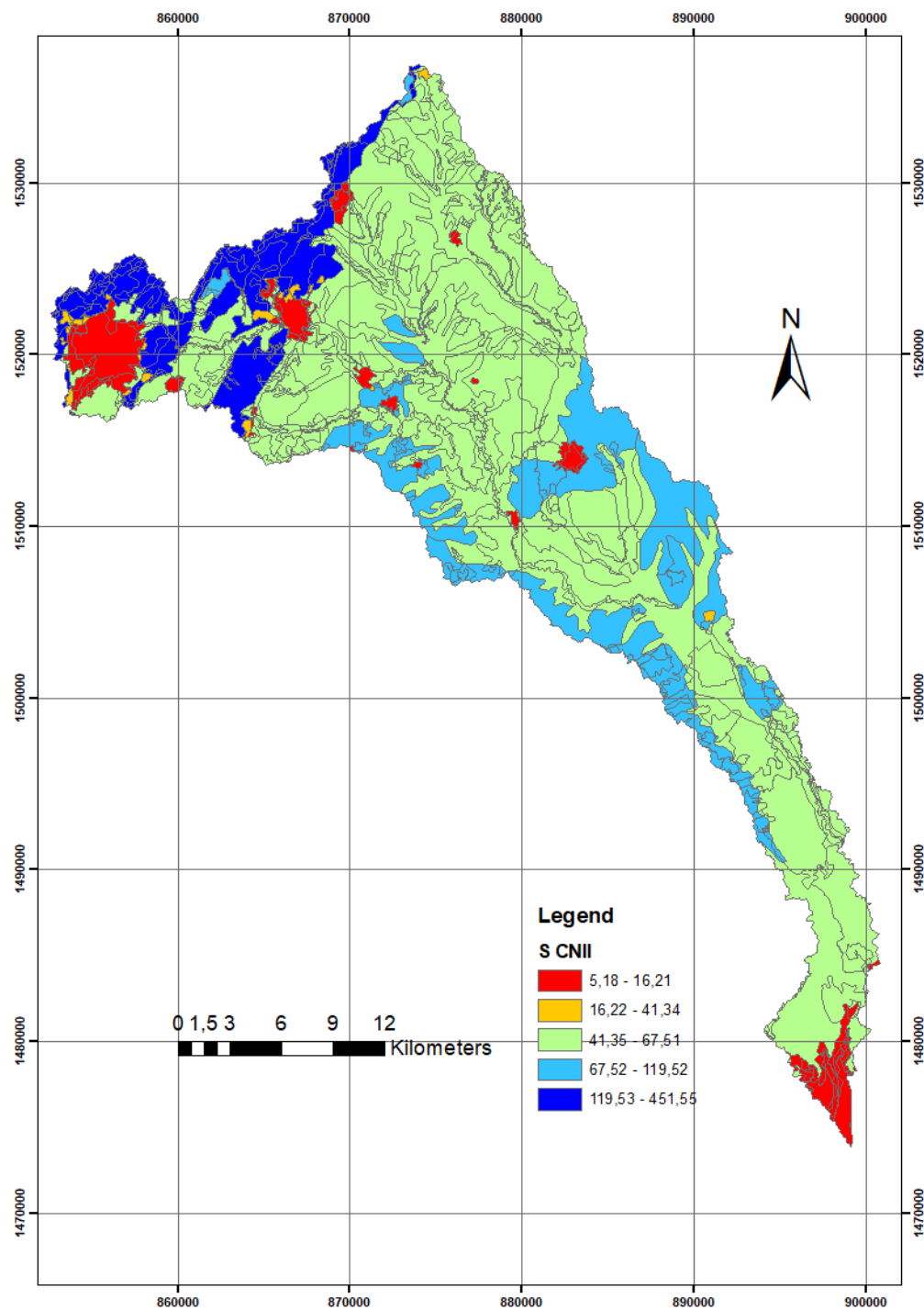


Figura 23. Mapa Retención Potencial Máxima S en la cuenca AGS

3.2.3. Estimación de Escorrentía

Para la cuenca AGS se estimó la escorrentía con base a los registros de precipitaciones totales mensuales multianuales y para los eventos de lluvia máxima en 24 horas, de 90,96 mm y 119,30 mm, correspondientes a los periodos de retorno de 5 y 25 años respectivamente, (ver capítulo 2). En la tabla 21 y en la Fig. 24, se presentan los resultados de los análisis mensuales, para lo cual se le asignó un valor de S promedio a cada mes, conforme a las condiciones antecedentes de escorrentías analizadas por las frecuencias media de días con reporte de lluvias mensuales y las precipitaciones medias. El valor obtenido de Q , se encuentra dentro de los valores medios anuales obtenidos por el IDEAM para la zona de estudio los cuales están en rangos entre 400 y 800 mm (IDEAM, 2014).

Tabla 21. Escorrentía potencial mensual en la cuenca AGS.

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
No. días Prec. Mes	2	2	3	8	12	11	11	12	11	12	9	4	97
P - Precipitación mes (mm)	15	21	34	84	135	140	128	138	131	126	87	33	1071
S Retención máx. Potencial	231	231	231	98	40	40	40	40	40	40	98	231	-
Q - Escorrentía mes (mm)	5	3	1	25	97	101	90	99	93	88	28	1	630

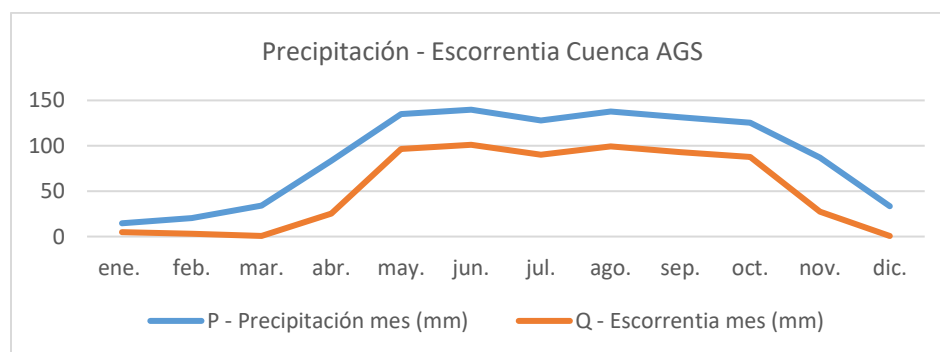


Figura 24. Precipitación - Escorrentía Mes multianual cuenca AGS

4. CUANTIFICACIÓN DE LA RECARGA AL ACUIFERO MORROA SOBRE LA CUENCA ARROYO GRANDE DE LA SABANA

4.1. Introducción

La recarga se define como la entrada de agua infiltrada hacia la zona saturada del suelo, donde comienza a ser parte de las reservas subterráneas. Este proceso se da por la fuerza de gravedad y las mismas condiciones hidráulicas de las capas del perfil, (M. V. Vélez & Vásquez, 2004).

Las formas de recarga natural a los acuíferos son por agua lluvia, por aguas superficiales y por transferencias en acuíferos. Dentro de las recargas naturales se distingue dos tipos, Directa (local o difusa), que corresponde al agua que se une a las reservas subterráneas por medio de percolación vertical directa de la precipitación a través de la zona no saturada; e Indirecta (localizada y preferencial), que es el resultado de la percolación hasta la superficie freática de la escorrentía superficial y de la localizada en depresiones topográficas como zonas estancadas, lagunas, entre otras (Ruiz et al., 2003). Este proceso se muestra de manera esquemática en la fig. 25.

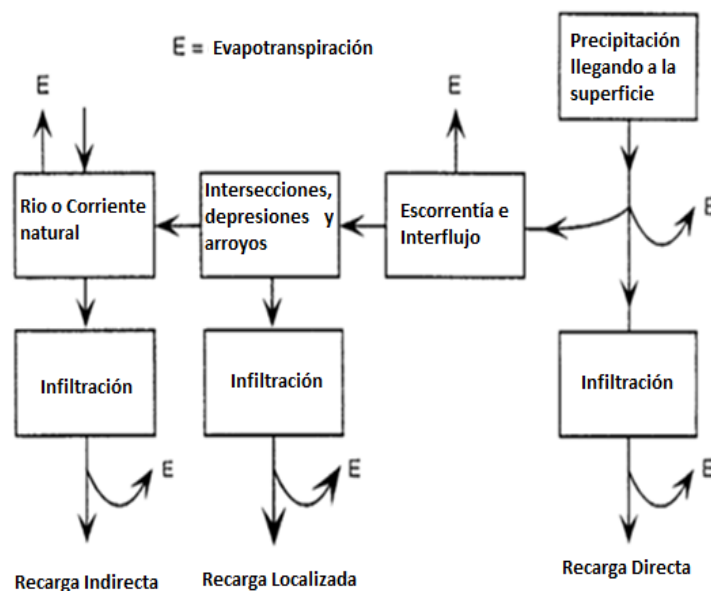


Figura 25. Los diferentes mecanismos de recarga en áreas áridas y semiáridas. Adaptado de Lerner 1997- (Vries & Simmers, 2002).

La interacción del clima, geología, morfología, condiciones del suelo y vegetación determinan los procesos de recarga, siendo ésta en áreas semiáridas, mucho más susceptible a las condiciones próximas a la superficie que en las zonas húmedas (Ruiz et al., 2003).

Es importante conocer la cantidad de agua que llega a los acuíferos, su calidad y procedencia a fin de lograr una buena administración de los recursos hídricos disponibles, y más considerando que las reservas de aguas subterráneas pueden ser la única fuente disponible para importantes centros poblados y en regiones áridas y semiáridas. El conocimiento de las áreas de recarga y descarga en una cuenca, es vital para el manejo sostenible de los acuíferos (M. V. Vélez & Vásquez, 2004), lo cual ayuda a una planeación hídrica y territorial acorde a los sistemas de soporte, dándole mejor tratamiento a las zonas vulnerables a la contaminación.

En el siguiente capítulo se cuantifica la recarga natural para el acuífero Morroa en las áreas de mayor infiltración potencial sobre la cuenca del AGS. Se aplicó el balance de masas de cloruro en zona no saturada (ZNS) y mediante los datos del agua freática. Para lo cual se definen las concentraciones de Cl en el agua lluvia de la zona y las concentraciones de Cl en suelo para varios puntos de muestreo sobre el área de recarga, también se definirán las concentraciones en agua de pozos profundos, mediante revisiones bibliográfica. Dentro de este capítulo se realizarán cálculos de las mezclas de aguas del Arroyo Grande de la Sabana (AGS) con agua de las primeras capas del acuífero.

Estimación de la recarga de acuíferos

Las técnicas existentes para estimar las recargas no cuantifican el valor real, sino que estiman la recarga potencial, referido al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático. Los métodos se clasifican como de Medida Directa y Empíricos.

Dentro de las Medidas Directas están los métodos de Balance de Agua, Técnicas de Darcy y la Técnica de Trazadores. Cada uno presenta ventajas y limitaciones en sus aplicaciones, para lo cual se recomienda que en una zona específica se apliquen dos o más técnicas a fin de poder comparar los resultados. Previo a la implementación del método de estimación de recarga, se debe realizar un análisis de la aplicabilidad del mismo en la zona de interés, considerado una buena

elaboración del modelo conceptual, de las hipótesis y simplificaciones asumidas (M. V. Vélez & Vásquez, 2004).

Si la determinación de la recarga se busca para un estudio de recursos hídricos, debe evitarse el uso de técnicas que arrojen valores puntuales, a no ser que los datos proporcionados por ellas se utilicen para calibración o validación de otros métodos (M. V. Vélez & Vásquez, 2004).

Método de Trazadores

El método de trazadores para la estimación de la recarga utiliza sustancias que se encuentren en el agua y se puedan detectar por medios visuales o analíticos. Sirve para definir caminos preferenciales de flujo, identificar mecanismos responsables de generación de flujo, identificar fuentes de soluto y sistemas de contaminación, determinar fuentes de recarga, etc. El principio del método es el balance de masa del trazador, en el cual se asume que el agua y el trazador son transportados a la misma tasa. La aplicación consiste en inyectar un trazador y rastrearlo en un área determinada (M. V. Vélez & Vásquez, 2004).

Dentro de las principales ventajas del método están que su movimiento es gobernado por el flujo del agua que conduce la recarga al suelo, no son necesarias continuas visitas a la zona de estudio, da posibilidad de estimar flujos más pequeños que los otros métodos, además, que ayuda a tener una representación del sistema de la zona no saturada – acuífero; Otra ventaja es la integración de la información obtenida con otras técnicas como SIG y Teledetección para obtener información de la recarga a escala regional.

En sus limitaciones están que solo ofrecen una medida indirecta de la recarga, pero esta se puede superar con la utilización de múltiples trazadores. Para disminuir las incertidumbres que se presentan con su aplicación y análisis se recomienda tener en cuenta las variaciones espaciales de la recarga (Factores geomorfológicos), variaciones temporales de la recarga (efectos por cambio climático y cambios de uso del suelo) y existencia de recarga preferencial, (Ruiz et al., 2003; M. V. Vélez & Vásquez, 2004).

Este método arroja resultados confiables para estudios puntuales en regiones áridas o semiáridas, a la vez es importante que los resultados obtenidos sean interpretados

y analizados en área con flujo multimodal en la zona no saturada (Ruiz et al., 2003; M. V. Vélez & Vásquez, 2004).

Los trazadores para la aplicación del método pueden ser de tipo natural o antrópico. Entre ellos se destacan los isotopos, nitratos, bromuro, los colorantes y la temperatura.

Existen tres técnicas que se utilizan para estimar la tasa de recarga de los perfiles de trazador en la zona no saturada, por la posición del pico de trazador, por la forma del perfil de trazador y por la cantidad total de trazador almacenado en el perfil (Allison & Hughes, 1978; Ruiz et al., 2003).

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1. Balance del ion Cloruro

El Cloruro es el trazador natural más importante que se ha usado para estimar y valorar las tasas de recarga subterránea bajo un amplio rango de condiciones climatológicas, geológicas y del suelo (M. V. Vélez & Vásquez, 2004), En especial en regiones semiáridas (Edmunds, Fellman, Goni, & Prudhomme, 2002). Su importancia radica en la simplicidad, economía y excelentes resultados en otros estudios similares. El Ion Cloruro presenta ventajas al ser altamente soluble, no es absorbido por la vegetación, es químicamente conservativo y fácilmente medible (Ruiz et al., 2003).

Su fundamento permite establecer el porcentaje de precipitaciones que alcanza el acuífero, mediante el contraste de cloruro en agua subterránea respecto a la lluvia (Alvarez, Hernández, Trovatto, & González, 2013). En este caso la Recarga (R) se determina mediante el balance de Cloruro en la concentración de la lluvia (Cp) y en la capa freática (Cr):

$$R = \frac{Cp*(P-Es)}{Cr} \quad (7)$$

Donde Es, es el escurrimiento superficial directo cuya concentración en cloruro se asume igual al de la lluvia, (Carrica & Lexow, 2004).

Existen modificaciones a la ecuación para utilizar el método en la zona no saturada, (Carrica & Lexow, 2004). El flujo de agua por debajo de la zona de las raíces (R_d), se puede estimar en base al grado de enriquecimiento de Cloruro en el agua de los poros en relación con su concentración en la precipitación. Con la aplicación de la ecuación de continuidad al transporte de Cloruro a través de la zona no saturada se tiene, (Ruiz et al., 2003):

$$R_d = \frac{P \cdot C_p}{C_s} \quad (8)$$

Donde C_s , concentración de Cloruro en el agua de los poros. La concentración media de Cloruro en el agua del suelo del perfil de estudio puede establecerse de la siguiente manera:

$$C_s = \frac{\sum_i \rho_b \cdot M_i \cdot d_i}{\sum_i d_i \cdot \theta_i} \quad (9)$$

Donde: ρ_b es la densidad seca aparente del suelo o “bulk density” en kg/m³; M_i es el contenido de cloruro en mg/Kg del suelo seco; d_i es el intervalo de profundidad en metros y θ_i es el contenido volumétrico de agua.

El tiempo de residencia t (o la edad del agua del suelo que es equivalente al tiempo que necesita el agua para percolar hasta esa profundidad) representado por el cloruro a una profundidad z se puede evaluar dividiendo la masa total acumulada de Cl^- desde la superficie hasta esa profundidad por el flujo anual de deposición de cloruro (Ruiz et al., 2003):

$$t = \frac{\sum \theta_i \cdot C_s \cdot d_i}{P \cdot C_p} = \frac{\sum \rho_b \cdot M_i \cdot d_i}{P \cdot C_p} \quad (10)$$

O bien,

$$t = \frac{1}{P \cdot C_p} \int_0^Z \rho_b(z) M_i(z) dz \quad (11)$$

Las principales suposiciones del método de balance de masas de Cloruro son el Flujo de pistón vertical descendente unidimensional y flujo de deposición de Cloruro constante en el periodo considerado (Scanlon, Langford, & Goldsmith, 1999).

El método más común para presentar los datos obtenidos en los perfiles y determinar la concentración media (C_s) es dibujar el contenido de agua acumulada frente al Cloruro acumulado. El agua acumulada representa un parámetro estrechamente relacionado con la cantidad total de recarga (a una cierta profundidad) y proporciona una manera de comparar los perfiles con diferente composición estructural. El Cloruro acumulado se puede interpretar como una aproximación de tiempo si se asume un flujo constante de Cloruro en la precipitación a lo largo del tiempo.

4.2.2. Marco Hidrogeológico

Concentración de Cloruro en el Agua del Acuífero de Morroa

Trabajos previos realizados sobre el acuífero de Morroa, han adelantado muestreos y caracterizaciones de aguas subterránea a 49 pozos de operación y 4 piezómetros de control en diferentes puntos de la zona de recarga y bajo distintas profundidades. Los resultados de las muestras de los pozos reflejan contenidos de Cloruro por debajo del rango de 250 mg/L. Los valores promedios de cloruro varían entre 9,4 mg/L para el pozo 44-IV-D-PP-19 de Corozal y 290,7 mg/L para el pozo 44-IV-C-PP-10 de Morroa (HELMUTH et al., 2002) (CARSUCRE, 2005). Los resultados promedios de estos estudios se presentan en la tabla 22, de forma gráfica se representa en la figura 26 los datos ubicados dentro de la cuenca AGS.

Los resultados de Cl^- en los piezómetros de control se presentan en la tabla 23. En el multipiezómetro Bremen a orillas del Arroyo Grande de la Sabana se identificaron los valores más altos, por esta razón es importante analizar las concentraciones de cloruro en el agua de las corrientes del arroyo, así como en el perfil de suelo cerca del mismo, a fin de confirmar su infiltración hacia la formación acuífera superficial.

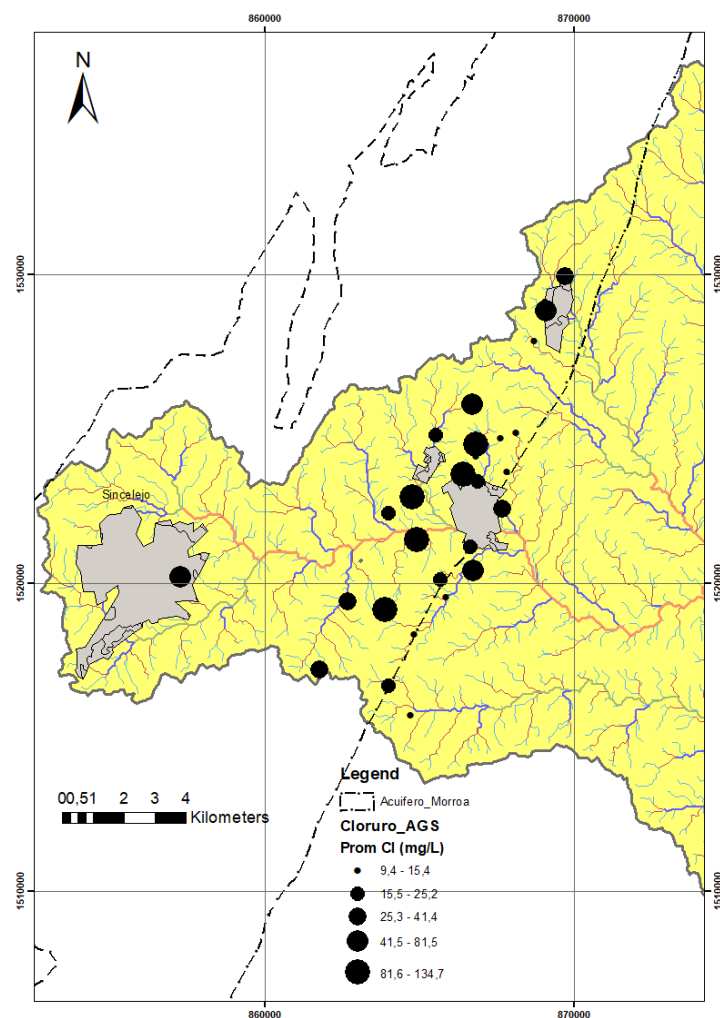


Figura 26. Concentraciones de Cloruro en agua de pozos profundos de la zona norte de la cuenca AGS

Tabla 22. Valores de Cloruro en Piezómetros. (CARSUCRE, 2005, 2018; HELMUTH et al., 2002)

Coord. x	Coord. y	Código Pozo	Prof. (m)	Cl ⁻ (mg/L)		Municipio
				2005	2018	
860987	1520901	44-IV-C-Pz-01A	15	102,0	166,0	Bremen A
860987	1520901	44-IV-C-Pz-01B	65	59,2	98,8	Bremen B
865420	1519320	52-II-B-Pz-01	62	17,2	73,4	Antiguo Basurero
867450	1522700	44-IV-D-Pz-17	72	29,6	-	Pz Finca La Rosita

Concentración de Cloruro en el Agua del Arroyo Grande de la Sabana

Según información y estudios previos realizados por la Corporación Autónoma Regional (CARSUCRE) sobre el agua del Arroyo grande, se identificó que los valores

promedios de Cloruro son de 112 mg/L (CARSUCRE, 2018), siendo los puntos con mayores valores los que están sobre la zona de recarga de acuífero de Morroa. El resumen de los datos se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores de Cloruro en el Arroyo Grande de la Sabana. (CARSUCRE, 2018)

Arroyo Grande: Estaciones	CLORUROS (mg/L)	pH	T °C
Puente relleno sanitario	114.10	7.55	27.8
Puente vía Las Palmas	147.66	7.64	27.5
Puente San Miguel	154.37	7.58	26.9
Puente Bremen	117.46	7.63	27.7
Puente vía Corozal-Sincelejo	177.86	7.65	26.7
Puente Corozal-Betulia	120.81	7.79	28.9
Puente Villa López	117.46	7.81	28.4
Puente Cayo de Palma	67.12	7.62	29.3
Puente Vía Valencia	57.05	7.42	28.5
Puente vía Santiago Apóstol	53.69	7.56	28.6

4.2.3. Metodología

La valoración de la recarga natural directa al acuífero Morroa sobre la cuenca de estudio, se aplicó el método trazador Balance de Ion Cloruro sobre la zona no saturada (ZNS) para recarga puntual; y sobre el agua freática subterránea; para evaluación de datos regionales. La investigación es de tipo exploratoria con muestreos de tipo no probabilísticos. Los muestreos se concentran en la zona norte de la cuenca donde intercepta a la formación acuífera de estudio.

Como información primaria se obtuvieron muestras de lluvia y muestras de suelos en ZNS; datos secundarios fueron los datos de cloruros en aguas subterráneas, obtenidos mediante revisiones bibliográficas. Este ion es conservativo por lo que se considera un marcador eficaz, por su elevada solubilidad, estabilidad, por ser un excelente trazador natural del movimiento del agua, por no ser absorbido por las plantas, además que es fácilmente medible por métodos analíticos, y no es volátil

por lo que no se producen pérdidas por la evaporación (Carrica & Lexow, 2004; Ruiz et al., 2003; M. V. Vélez & Vásquez, 2004).

Las muestras de lluvia se tomaron en diferentes eventos entre los meses de mayo y agosto, donde según los registros hidrológicos se presentan altos valores de precipitaciones promedios anuales (Capítulo 2). Los cinco puntos de muestreos se ubicaron en la ciudad de Sincelejo, Corozal y Morroa, escogidos por accesibilidad, la ubicación espacial se presenta en la figura 27. Las botellas colectoras se colocaban en la superficie del terreno de cada punto de toma, se colectaban las muestras inmediatamente después de terminada la lluvia evitando pérdidas por evaporación instantánea u efectos externos. Las muestras individuales fueron combinadas por sitios para los diferentes meses del análisis y enviadas a un laboratorio acreditado por el IDEAM para los ensayos. El cloruro se obtuvo mediante el método analítico de Tiocianato de Mercurio por Espectrofotometría⁵, que tiene como fundamento la absorción y transmisión de luz (longitud de onda determinada) que poseen determinados elementos, en una muestra.

Las muestras en la zona no saturada fueron tomadas utilizando un taladro manual helicoidal de 90 mm de diámetro. Las muestras se recolectaron a intervalos de 0,50 cm para un rango de profundidades entre 1,8 – 5,0 metros y fueron almacenadas de forma inmediata en bolsas auto cierre de polipropileno evitando pérdida de humedad. Las muestras obtenidas fueron llevadas al laboratorio de suelos donde se determinaron las concentraciones de cloruro siguiendo el método IGAC 6^{ta} edición 2006, el contenido volumétrico de humedad se obtuvo mediante el método gravimétrico y se calculó el porcentaje de saturación de las muestras. Dos de los puntos de muestreos de la zona no saturada fueron seleccionados dentro de la U.H.3, para los niveles A y B del acuífero (PM2 y PM1, respectivamente). Un punto de muestreo (PM3) se ubicó a orilla del Arroyo Grande a la altura del corregimiento de Bremen, con el fin de realizar el perfil de cloruro y evidenciar el avance de las concentraciones hacia la zona profunda. Este último perfil no aporta información de la recarga por existir una fuente de cloruro externo a la ambiental, pero aporta excelentes datos para identificar la dinámica de flujo en el subsuelo.

⁵ Método Hach 8113. Espectrofotométrico. Tiocianato-Ion Férrico. Edición 8, 2005



Ilustración 1. Punto de muestreo 1. Perfil de suelo en ZNS (PM1), sector Sabanas de Cali - Morroa



Ilustración 2. Punto de muestreo 2. Perfil de suelo en ZNS (PM2), sector Pileta – Corozal



Ilustración 3. Punto de muestreo 3. Perfil de suelo en ZNS (PM3), sector Pileta – Corozal.

Los datos de cloruro en agua subterráneas se tomaron de los trabajos de caracterizaciones Hidro geoquímica realizados sobre el acuífero a 49 pozos y 4 piezómetros (HELMUTH et al., 2002) (CARSUCRE, 2005), los resultados obtenidos se acotaron sobre el área de estudio de la cuenca AGS y así obtener un valor de referencia y variación espacial de la recarga y las concentraciones. Las escalas temporales que puede revisar el método van desde décadas hasta miles de años (Scanlon, Healy, & Cook, 2002), por tal motivo se procede a utilizar datos de periodos anteriores.

Para calcular las mezclas de agua subterránea con el agua superficial del AGS, se realiza relación de las proporciones del contenido de cloruro en las aguas de los piezómetros de control en Bremen y del Arroyo. Los porcentajes entre las aguas mezcladas se relacionaron mediante el siguiente balance de masas:

$Clm = xCls + (1 - x)Cld$, Operando y despejando tenemos que:

$$x = \frac{Clm - Cld}{Cls - Cld} \quad (11)$$

Donde x , proporción de agua de arroyo mezclada con agua freática (%); $1 - x$, porción de agua freática en la mezcla (%); Cl_m , concentración de cloruro en el agua mezclada; Cl_s , concentración de cloruro en el agua del arroyo; Cl_d , concentración de cloruro en el agua freática.

4.3. Resultados y Discusión

4.3.1. Caracterización del contenido de Cloruro en la Precipitación

La cantidad de Precipitación y su composición química son datos importantes para la medición de la recarga de los acuíferos mediante el método del balance de masas de Cloruro. Los resultados de las muestras evaluadas se presentan en la tabla 24. Estudios parciales han mostrado que existe una relación lineal entre Cl y el aumento de la lluvia, por lo que datos parciales de cualquier año pueden usarse para derivar la deposición de Cl (Edmunds et al., 2002).

Los resultados muestran que el valor promedio obtenido es de 2,65 mg/L, con reportes de valores máximos de 3,15 mg/L en la zona San Vicente en Sincelejo y El Parquécito Corozal. La deposición atmosférica es la única fuente de ingreso del Cloruro en el agua lluvia en la zona de estudio (aireación por vientos marinos), el terreno lo aporta en cantidades muy mínimas casi despreciables (HELMUTH et al., 2002).

Tabla 24. Valores medios de Cloruro en Precipitación zona de estudio.

Ubicación			Cl (mg/L)	Desviación	Coef. Variación
Latitud	Longitud	Lugar			
9°18'44.59"N	75°23'48.40"O	Versalles Calle 8A - 19	2,50	0,9	34%
9°17'42.17"N	75°23'49.30"O	Majagual Diagonal 28 -16	2,88	0,6	19%
9°17'25.69"N	75°23'46.65"O	San Vicente Carrera 14B - 32	3,15	1,0	32%
9°19'11.65"N	75°17'26.28"O	Corozal - El Parquécito	3,15	0,4	11%
9°19'54.76"N	75°18'24.28"O	Morroa	1,55	0,1	5%
Promedio Zona			2,65	0,8	30%

4.3.2. Recarga del Acuífero Morroa

Balance de masas entre Agua lluvia y Zona no Saturada (ZNS)

Se aplicó el método del balance de masas de cloruro en la zona no saturada. Conforme a las ecuaciones modificadas de balance entre precipitación y agua freática (Allison & Hughes, 1978). Se obtuvieron un total de tres perfiles de los sitios mostrados en la figura 27, las muestras fueron obtenidas en el mes de agosto donde se registran altas precipitaciones por ser temporada de lluvia. Los detalles de las profundidades y los valores de obtenidos se presentan en las tablas 25, 26 y 27. Estos sitios son seleccionados en la zona norte de la cuenca de estudio, sobre la formación acuífera Morroa en los niveles A y B. Los suelos de esta área lo conforman areniscas poco consolidadas y sedimentos finos; las estimaciones de la infiltración potencial son los más elevados de la cuenca de estudio según el método del NC.

La valoración de la Recarga se realizó con base en la ecuación (7), con la información de los puntos PM1 y PM2, el valor promedio regional de la precipitación de 1.071 mm/año el cual se trató en el capítulo 2. La química de la precipitación se presentó en el punto 4.3.1 de este capítulo y se asume un valor fijo de 2,65 mg/L. Los perfiles se construyen a partir de muestras obtenidas a cada 0,50 metros en un rango de profundidades de 1,8 – 5,0 metros.

En las figuras 28, 29 y 30 se presentan los contenidos de humedad y las concentraciones de Cloruro, para cada punto de muestreo hasta las profundidades respectivas. En el PM1 se llegó hasta 1,8 metros, debido a que en esta profundidad se encontró un material rocoso y no fue posible la perforación por método manual. Para el PM2 se llegó a una profundidad de 4 metros y en el PM3 se perforo hasta 5 metros. Los contenidos de Humedad son en promedio de 7, 23 y 31%, para PM1, PM2 Y PM3, respectivamente. El contenido de agua en los suelos puede usarse para inferir la textura del perfil (Scanlon et al., 1999), se tiene que bajos contenidos de humedad se relacionan con suelos gruesos como arenas de granos finos y medios; Los suelos con mayores rangos de humedad indican mayor presencia de arcillas.

El perfil del PM1 presenta alta concentración de Cloruros en todos los niveles de profundidad. Para ser un suelo con buenas condiciones de drenaje se esperaría datos de concentraciones bajas. En su primer metro de profundidad se evidencia el punto más alto de concentración con un valor de 127 mg/L. Algunas razones para esta condición se presente pueden obedecer a procesos de mineralización del suelo, donde los solutos de cloruro son retenidos en los espacios vacíos (Edmunds et al., 2002), este proceso depende en gran medida de la textura y estructura de los suelos, siendo los suelos arenosos quienes presentan mayores velocidades de mineralización, debido a que a mejor aireación se facilita la actuación de la flora responsable de que se presente; las zona de clima cálidos y secos presentan mayor condiciones para estas situaciones. Otra posibilidad obedece a mayor contenido de arcillas en esta área del perfil, pero se pone a consideración por el bajo contenido de humedad el cual es un indicador de suelos gruesos. También existen indicios de que estas situaciones se pueden presentar por procesos de evapotranspiración que afectan la superficie del terreno y generen una separación entre los solutos y la humedad del suelo en los primeros metros, situación que se normaliza a mayor profundidad donde los solutos y la humedad pueden formar un sistema conjunto y recargar aguas subterráneas, (Cook, Edmunds, & Gaye, 1992; Edmunds et al., 2002). La recarga promedio calculada en el perfil PM1 es de 37 mm/año, con valores en los rangos entre 22 y 48 mm/año.

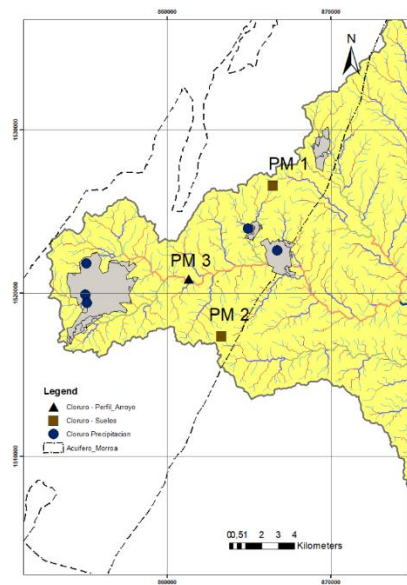


Figura 27. Puntos de muestreo del Cloruro en agua de precipitación y en perfiles de suelo en la zona norte de la cuenca AGS.

Tabla 25. Perfil de cloruro en suelo PM1 Sabanas de Cali.

Perfil	Tipo de suelos	Profundidad (m)	Precipitación (mm)	Cl suelo (mg/L)	Humedad (%)	Recarga (mm/año)
Sabanas de Cali (PM1)	Areniscas calcáreas y/o calizas	0,5	1.071	96	7,79	30
		1,0	1.071	127	7,05	22
		1,5	1.071	60	6,01	47
		1,8	1.071	59	8,33	48
Recarga Media anual						37

Tabla 26. Perfil de cloruro en suelo PM2 Pileta.

Perfil	Tipo de suelos	Profundidad (m)	Precipitación (mm)	Cl suelo (mg/L)	Humedad (%)	Recarga (mm/año)
Pileta (PM2)	Areniscas calcáreas poco consolidadas	0,5	1.071	26	21,88	109
		1,0	1.071	27	23,59	105
		1,5	1.071	14	22,91	203
		2,0	1.071	32	22,56	89
		2,5	1.071	18	23,88	158
		3,0	1.071	26	25,78	109
		3,5	1.071	23	24,64	123
		4,0	1.071	15	21,45	189
Recarga Media anual						136

Tabla 27. Perfil de cloruro en suelo PM3 Bremen.

Perfil	Tipo de suelos	Prof.	Precipitación (mm)	Cl suelo (mg/L)	Humedad (%)
Bremen (PM3)	Aluvión mixto y Arcilla Carbonatadas	0,5	1.071	122	22,94
		1,0	1.071	282	27,99
		1,5	1.071	466	30,27
		2,0	1.071	504	26,66
		2,5	1.071	496	35,37
		3,0	1.071	460	32,83
		3,5	1.071	494	31,12
		4,0	1.071	386	31,91
		4,5	1.071	340	30,17
		5,0	1.071	348	30,38

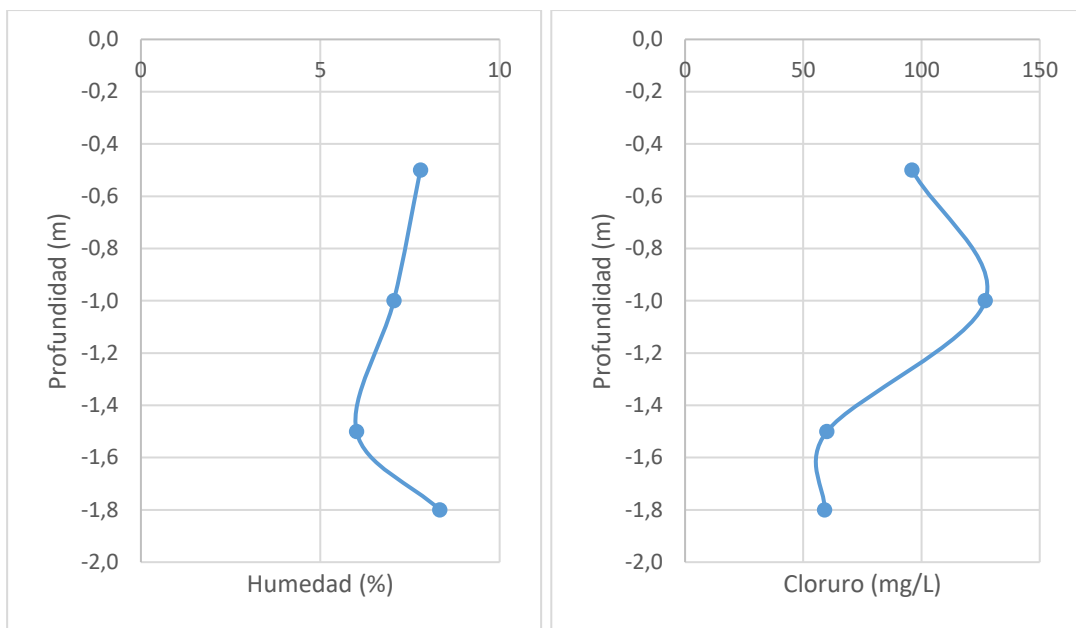


Figura 28. Perfil de zona no saturada, Humedad y concentraciones de Cloruro para el sitio PM1 (Sabanas de Cali - Corozal)

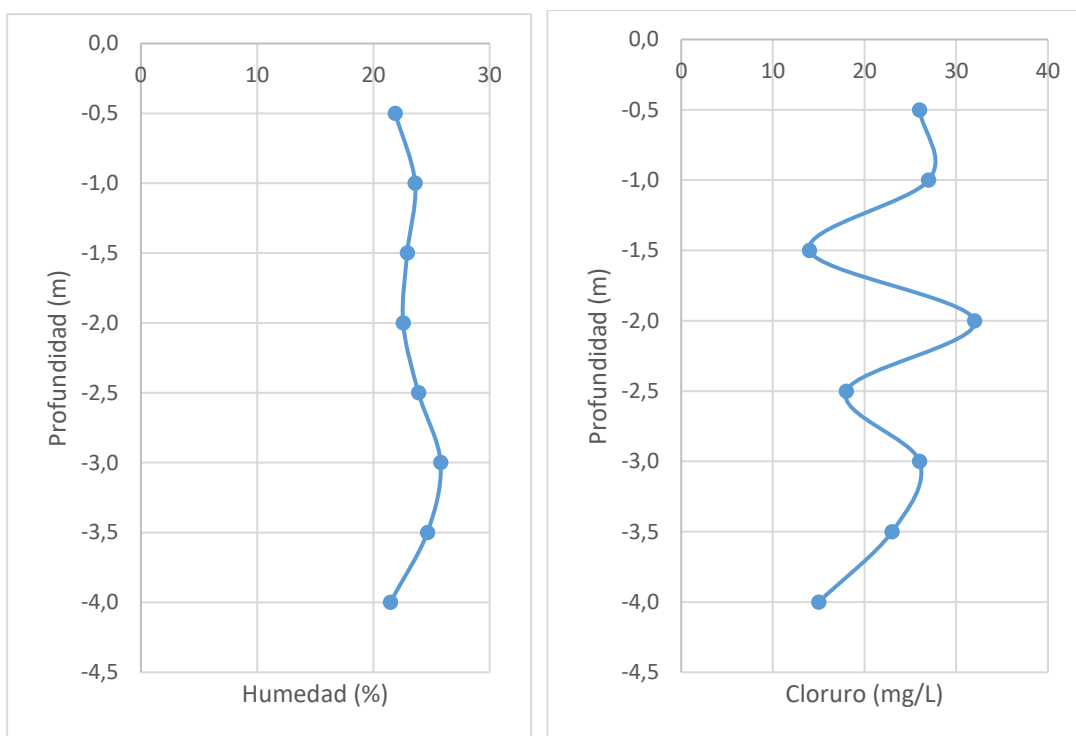


Figura 29. Perfil de zona no saturada, Humedad y concentraciones de Cloruro para el sitio PM2 (Piletas - Corozal).

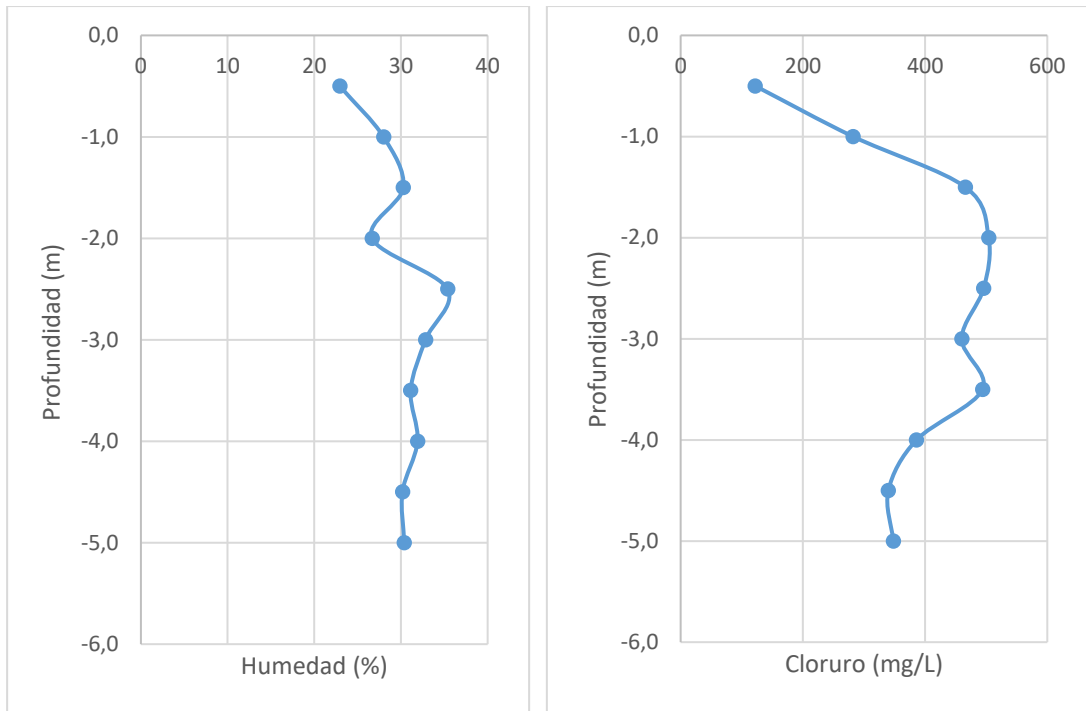


Figura 30. Perfil de zona no saturada, Humedad y concentraciones de Cloruro para el sitio PM3 (Bremen - Morroa).

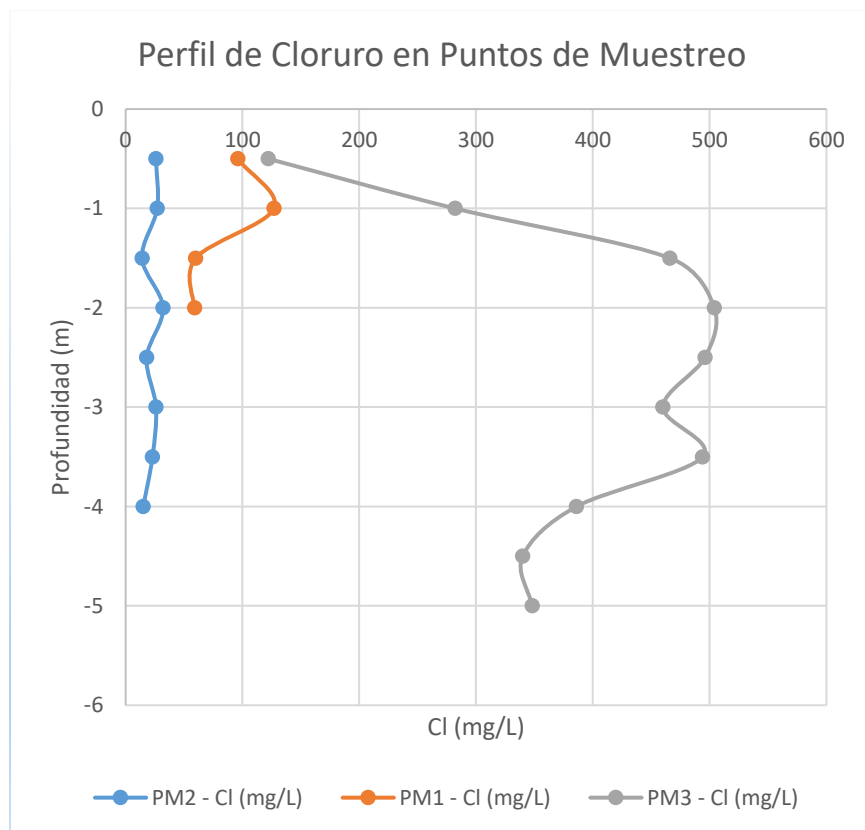


Figura 31. Perfil de Cloruro en los diferentes puntos de muestreo.

En el perfil del PM2 las concentraciones de cloruro varían entre 14 y 32 mg/L. Estas bajas concentraciones indican que existe un alto flujo de agua que favorece la recarga. Utilizando el balance de masas de cloruro de los perfiles de suelo se calculan tasas de recarga directa de 89 y 203 mm, con un promedio de 136 mm/año, correspondiente a un 13% de los eventos de precipitación en la zona. Las escorrentías superficiales en este sitio se consideran despreciable según las estimaciones con el método del NC. Se observan variaciones marcadas del cloruro con la profundidad, que se relacionan principalmente con oscilaciones climáticas. Para los análisis de estas dinámicas es importante contar con la densidad del suelo y hacer las estimaciones de las variaciones temporales de las recargas y los efectos en las concentraciones de cloruro.

Para el PM3, es importante tener en cuenta que los valores de cloruro se ven afectados por una fuente externa que en este caso es el Arroyo Grande de la Sabana. Con esta condición el método de masas no determinaría la recarga directa. A la vez, si presenta los avances y/o concentraciones del cloruro como un trazador del flujo del agua superficial hacia el subsuelo. El contenido de humedad promedio en este punto es el más alto que se obtuvo con un promedio de 31%. Las concentraciones cloruro presentan un rango de 122 y 504 mg/L. Estas altas concentraciones, sumado al contenido de humedad de las muestras pueden atribuirse a altos contenidos de arcillas, típicos de los fondos de estas corrientes. Los datos de cloruro representan los flujos netos de agua a largo plazo y su valor elevado representa que los flujos de agua fueron más altos en algún momento pasado, con respecto al perfil del PM3 podemos evidenciar que el mayor valor de Cl se encuentra a 2 metros, manteniendo concentraciones hasta los 3,5 metros. Luego de esta profundidad se estabiliza en 340 mg/L.

La figura 31 presenta una comparación entre los resultados obtenidos en los diferentes puntos de muestreo de la zona no saturada. Es importante destacar la considerable diferencia en los contenidos de cloruro en por fuentes naturales contra los contenidos de cloruro por fuentes de aguas servidas en los diferentes niveles de profundidad. El flujo vertical tipo pistón está presente en los tres puntos analizados, con acentuación importante en el PM1 y PM3, sobre todo después del 1 metro de profundidad.

Balance de masas entre Agua lluvia y Agua freática

La química de las aguas subterráneas en el nivel freático es representativa de los flujos y dinámicas de las recargas directas a los acuíferos. Generalmente los datos que se utilizan para hacer estos cálculos suelen ser de acuíferos no confinados. Para la zona de estudio existe un amplio campo de pozos con información hidro química disponible y con una amplia gama de profundidades donde intercepta varias capas confinadas y semiconfinadas; realizar los balances de masas de cloruro ayuda a evidenciar las variaciones espaciales de las recargas en lo correspondiente a la cuenca de estudio. De igual forma con la combinación del método en ZNS y con agua de niveles freáticos se puede ajustar los resultados ayudando así a tener un valor más efectivo de la recarga en los puntos analizados.

Como primera suposición dentro del método se plantea que los solutos provienen de la lluvia. La escorrentía para la zona se obtiene mediante el método del NC tratado en el capítulo 3, se toma el valor más crítico para la zona norte de la cuenca de 630 mm/año. La figura 26 muestra la distribución promedios de cloruros en el agua subterránea en la zona de estudio, para los diferentes pozos. Se aprecia que la distribución de los valores de Cloruros no es uniforme, los rangos obtenidos sobre la zona norte de la cuenca AGS están en el rango de 9,4 mg/L y 134,7 mg/L, lo que muestra una variación considerable producto de los distintos tipos y profundidad de suelo, el tipo de vegetación y la cobertura, así como también de las variaciones de las pendientes. Los valores más bajos de cloruro reflejan las rutas de infiltración preferenciales que aportan a la recarga, según el método de Balance de ion cloruro. Los valores altos probablemente se relacionan con perfiles de capas impermeables las cuales aporten poca recarga al acuífero.

En la tabla 28 se presentan la cuantificación de las recargas para cada pozo profundo. Los valores están en los rangos de 8 hasta 124 mm/año, correspondiente a rangos del 1 hasta 11,5% de la precipitación anual, con una tasa de recarga promedio de 54,6 mm/año. Se considera un valor bajo para una región que depende totalmente del abastecimiento desde formaciones acuíferas. A la vez hay que considerar que la profundidad promedio de las muestras obtenidas es de 160 metros, por lo cual las muestras analizadas corresponden a aguas de capas semiconfinados y confinadas, donde por la misma estructura geológica de la formación acuífera restringe el almacenamiento.

Tabla 28. Cloruro en agua freática de pozos y estimación de la Recarga. Fuente Propia.

Coord. X	Coord. y	Código Pozo	Profundidad (m)	Prom. Cl ⁻ (mg/L)	Municipio	Recarga Prom. Anual (mm/año)
868120	1524880	44-IV-D-PP-36	177	9,7	Corozal	120,5
866880	1523280	44-IV-D-PP-38	159	19,6	Corozal	59,6
867800	1523620	44-IV-D-PP-31	160	12,3	Corozal	95,0
866800	1524100	44-IV-D-PP-25	171	11,8	Corozal	99,0
866640	1521160	44-IV-D-PP-34	148	20,5	Corozal	57,1
865830	1519540	52-II-B-PP-01	145	15	Corozal	77,9
864800	1518360	52-II-A-PP-11	172	13,8	Corozal	84,7
862660	1519400	52-II-A-PP-08	172	31,7	Corozal	36,9
864000	1522250	44-IV-C-PP-09	161	24,2	Corozal	48,3
865660	1520100	44-IV-D-PP-35	160	22	Corozal	53,1
864700	1515720	52-II-A-PP-09	171	15,5	Corozal	75,6
867670	1522400	44-IV-D-PP-24	146	33,1	Corozal	35,4
867600	1524700	44-IV-D-PP-19	105	9,4	Corozal	124,3
862970	1511030	52-II-A-PP-07	131	57	Corozal	20,5
863980	1516680	52-II-A-PP-10	-	25,2	Corozal	46,4
865525	1524800	44-IV-D-PP-39	175	21,7	Morroa	53,9
866690	1525800	44-IV-D-PP-30	189	63,6	Morroa	18,4
868710	1527840	44-IV-D-PP-32	181	10,2	Palmitos	114,6
875160	1538420	44-IV-B-PP-01	250	10,4	Palmitos	112,4
869710	1529940	44-IV-D-PP-33	195	41,4	Palmitos	28,2
869090	1528810	44-IV-D-PP-28	183	63,2	Palmitos	18,5
857140	1506230	52-II-C-PP-18	153	21,2	Sampués	55,1
858800	1509100	52-II-C-PP-12	123	35,8	Sampués	32,6
858330	1508800	52-II-C-PP-19	126	30,1	Sampués	38,8
859370	1509480	52-II-C-PP-11	120	26,6	Sampués	43,9
855150	1505970	52-II-C-PP-17	154	30,7	Sampués	38,1
860820	1506420	52-II-C-PP-06	127	22,4	Sampués	52,2
849370	1514200	52-I-B-PP-02	106	134	Sampués	8,7
857060	1512470	52-II-A-PP-01	140	147	Sampués	8,0
862650	1515420	52-II-A-PP-16	177	13,5	Sincelejo	86,6
861270	1514390	52-II-A-PP-13	163	24,5	Sincelejo	47,7
861740	1517210	52-II-A-PP-19	200	36	Sincelejo	32,5
861400	1515320	52-II-A-PP-14	175	61,4	Sincelejo	19,0
857260	1520185	44-IV-C-PP-04	146	80,5	Sincelejo	14,5

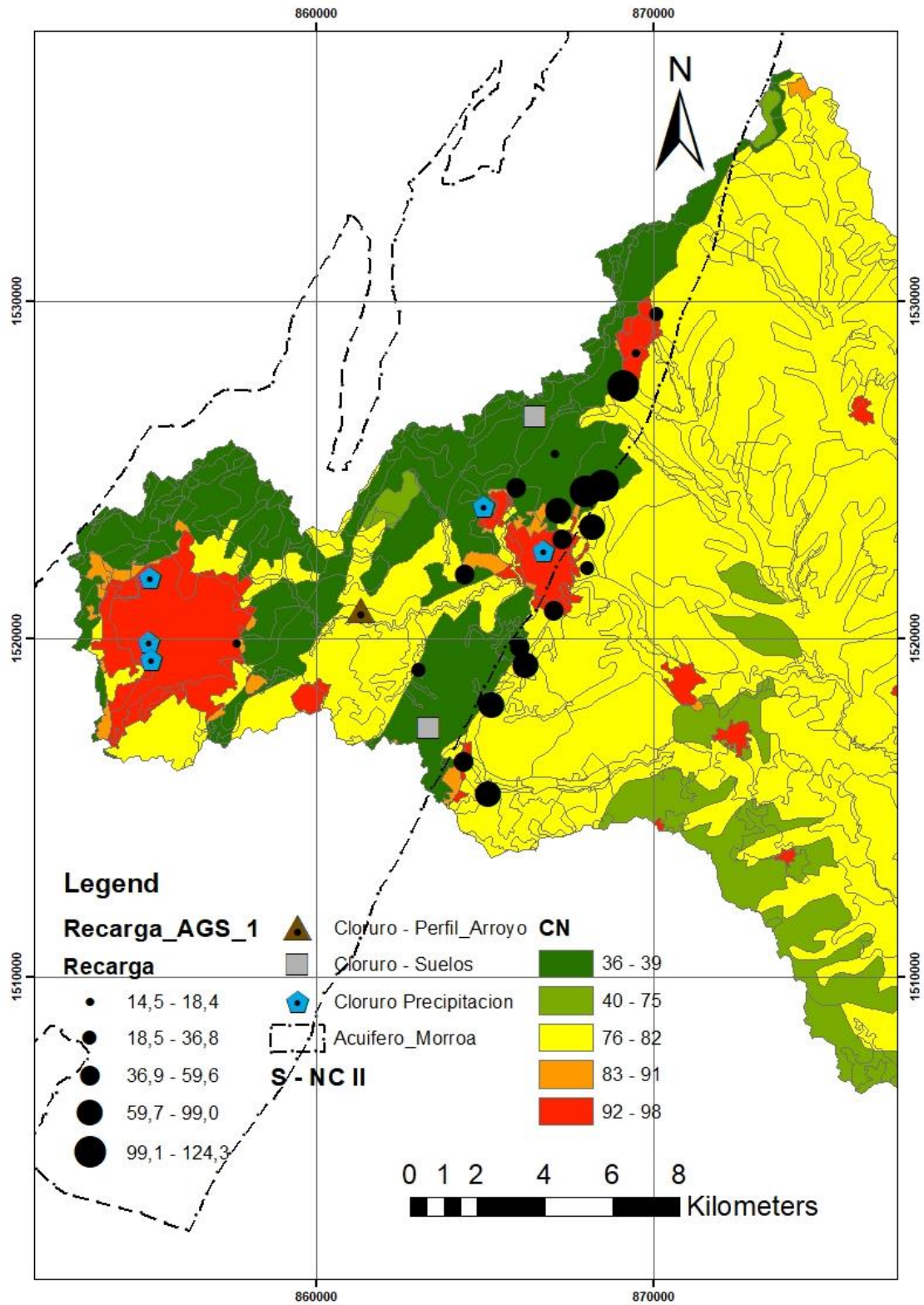


Figura 32. Recarga estimada con agua freática sobre la zona de mayor Infiltración potencial de la cuenca AGS

Los resultados obtenidos brindan una oportunidad importante para comparar los valores obtenidos de las recargas llevadas a cabo mediante el método hidro geoquímico de balances de masas, con las estimaciones realizadas en diferentes estudios mediante balance de agua y modelos hidrogeológicos. Las recargas obtenidas en estudios previos muestra para la zona muestran valores del orden 39 y 70 mm/año, también para la formación Morroa se obtienen infiltraciones efectivas con rangos entre 15 – 81 mm, como también tasas de recargas hasta de 270 mm/año (CARSUCRE, 2005; MOLANO, CIFUENTES, & PUENTES, 2016). Estos rangos de valores presentan similitudes considerables con los resultados mostrados en el presente estudio.

La figura 32 presenta la distribución espacial de los valores de recarga estimada entre el agua lluvia y el agua freática en la zona de mejores condiciones de infiltración. Los valores de recarga más elevados se muestran en la franja baja correspondiente al nivel A de la formación Morroa. Es importante mencionar que los métodos del NC, para el cálculo de la Infiltración máxima potencial y el Balance de masas de Cloruro son aplicables para la zona de estudio y además presentan resultados que son complementarios y aportan de manera poderosa para tener un excelente análisis de las condiciones hidrológicas de las cuencas de estudio.

Mezcla de aguas del Arroyo Grande con el Acuífero de Morroa

El proceso de mezcla entre aguas de distintas fuentes produce una alteración en el agua resultante, generando procesos modificadores de las condiciones iniciales de las mismas. Para la evaluación del carácter conservador del elemento en la mezcla y valorar los procesos modificadores producidos, los deltas iónicos son muy importantes. Mediante el análisis de elementos conservativos como el ion Cloruro, es posible identificar la porción de las mezclas de las aguas. Mediante la aplicación de fases para una mezcla binaria de aguas se obtiene la concentración de mezclas de cloruro con la ecuación 11.

Según los datos obtenidos por revisiones literarias tenemos que el C_{lm} , concentración de cloruro en el agua mezclada (Piezómetro) presenta un valor de 166 mg/L; La concentración de cloruro en el agua del arroyo C_{ls} , en la estación Bremen tiene valores de 117 mg/L; La concentración de cloruro en el agua freática (Cloruro freático en pozos cercanos) C_{ld} es de 43 mg/L. Luego, aplicando la

ecuación 11, se obtiene que la proporción de agua de arroyo mezclada con agua freática (%) es de 165%.

Este valor de mezcla indica que existe un volumen considerable del agua superficial con las aguas subterráneas de las primeras capas acuíferas. Los resultados de la mezcla indican que existe una marcada diferencia en la entrada y salida de agua de la formación acuífera, lo cual puede ser producto de un escaso flujo lateral subsuperficial; como también puede indicar que el flujo vertical de percolación se vio restringido por capas impermeables que generen concentraciones de agua y formen una especie de barrera natural sobre los niveles más profundos en las formaciones (semi) confinadas. Esta posibilidad se puede analizar bajo el comportamiento del perfil de cloruro mostrado en la Fig. 30, donde se evidencia una concentración de cloruros en las capas menores a 3,5 metros.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Mediante el análisis de la Morfometría se concluye que a nivel general la cuenca AGS presenta una moderada a baja permeabilidad, con dinámicas diferentes entre la zona norte, donde se evidencia mejores características litológicas y alto potencial de aguas subterráneas y pendientes pronunciadas; y la zona centro-sur de la cuenca, donde se evidencian texturas suelos finos que potencian los procesos de drenaje. La cuenca presenta un estado maduro y equilibrado, con características de bajo proceso de erosión, una alta tasa de evapotranspiración y vegetación escasa, buena respuesta ante las avenidas gobernada por una red de drenaje de sexto orden indicando bajo riesgo a inundaciones.

Los valores del NC y S muestran que el 10,01% del total de la cuenca presentan buenas condiciones de Infiltración, específicamente en la zona norte de la cuenca, que intercepta el acuífero Morroa. La retención potencial en esta área se da en mayor medida, por las características hidrológicas de los suelos que su mayoría están compuestos por areniscas calcáreas y/o calizas consolidadas y poco consolidadas. El 73,74% de la cuenca tienen un potencial de Infiltración moderado a bajo, donde prevalecen más la generación de escorrentía superficial. La cobertura vegetal es escasa a nivel general, por lo cual es importante fomentar las actividades de preservación y reforestación mediante el aumento de coberturas tipo bosques que permitan incrementar la retención inicial del agua, dándole mejores tiempos de respuesta a las condiciones de infiltración y así aprovechar al máximo los eventos de precipitación, además de proteger la superficie del terreno de procesos erosivos generados por las escorrentías.

La cuantificación de la recarga al acuífero Morroa en la zona de mayor infiltración de la cuenca AGS, usando el método del balance de cloruro en dos perfiles en la zona no saturada presento resultados promedios de 37 y 136 mm/año, equivalente al 3 y 13% de la precipitación media anual, respectivamente. La valoración de la recarga regional utilizando cloruro en agua de pozos profundos presento resultados en los

rangos entre 8 y 124 mm/año, correspondiente a 1 – 12% de la precipitación anual. Con estos resultados se concluye que la recarga en la zona norte de la cuenca correspondiente al área que intercepta al acuífero Morroa, es baja aun estando en la zona de mejores condiciones de infiltración potencial. Con lo cual se infiere que el proceso actual no es sostenible, lo que puede incrementar los riegos a disminución en los niveles de disponibilidad del agua.

Las mejores condiciones de Infiltración potencial en la cuenca presentan rangos entre 119 y 451 mm de retención de láminas de agua disponible, estas condiciones están generando un aporte a la recarga anual en rangos de 8 hasta 124 mm, según las valoraciones del método del balance de cloruro. La recarga puede presentar mejores escenarios en función de las intensidades de lluvia presentadas y mejoras en las coberturas naturales.

El cloruro encontrado en el perfil de suelos arenosos (PM1) muestra concentraciones hasta de 48 veces más alto que las presentadas en la precipitación. Esta situación puede ser producto de procesos naturales como la mineralización de suelos y/o la evapotranspiración que puede separar los solutos de la humedad en los primeros metros de profundidad. Para el punto de muestreo PM2 se evidencio una baja concentración de cloruros hasta de 5 veces el presentado en los eventos de lluvia, obedeciendo a rutas de infiltración preferencial que aportan a las recargas.

Se evidencia una variación espacial no uniforme en el contenido de cloruro del agua freática. Aun así, se presentaron los valores más bajos en la franja inferior de la zona de mayor infiltración, correspondiente al nivel A del acuífero Morroa. Con lo cual se puede concluir que esta zona presentan los mayores aportes de recarga natural. La variación puede ser producto de distintos tipos y profundidad de suelo, de vegetación, de cobertura del terreno y pendientes.

Según las concentraciones de cloruro encontrados en PM3 y mediante el cálculo de mezcla entre agua superficial y subterránea, se concluye que en ese punto existe una combinación considerable del agua del arroyo con el agua del acuífero, generando alto riesgo de contaminación en la U.H.1. Mediante el análisis del perfil se evidencia un avance lento del agua producto de las arcillas existentes en el suelo.

Los métodos del CN, para el cálculo de la Infiltración máxima potencial y el Balance de masas de Cloruro son aplicables para la zona de estudio y además presentan

resultados que son complementarios y aportan de manera poderosa para tener un excelente análisis de las condiciones hidrológicas de las cuencas de estudio.

Los métodos del CN y del balance de Cloruro, con apoyo de las herramientas SIG, son eficientes y complementarios para realizar análisis hidrológicos con alcance subsuperficial en zonas con formaciones acuíferas de condiciones áridas y semiáridas. Las estimaciones de las recargas potencial y la infiltración potencial obtenidas presentan similitudes a las realizadas para la zona por distintos métodos, con una ventaja de que son más rápidos y económicos, además de mostrar resultados de manera espacial y temporal más exactos lo que ayuda de manera importante a la gestión de cuencas y a la planificación territorial.

5.2. Recomendaciones

Se deben potenciar esfuerzos a fin de que los usos de agua en todos los niveles sociales sean más eficientes, además de realizar campañas de reforestación como primer proceso para mejoramiento de los acuíferos y el aprovechamiento de la lluvia como principal aporte de agua y recarga a las reservas subterráneas. Como segundo paso adelantar obras civiles y de ingeniería que permitan retener el agua en las zonas de altas pendientes para aumentar los tiempos de contacto agua y perfil de suelo para mejorar las condiciones en el proceso de infiltración.

Se recomienda seguir con la aplicación de estos métodos para todas las cuencas que hacen parte de la formación Morroa y así poder realizar una estimación regional global del mismo. De igual manera, extender este estudio a las formaciones Betulia y el Roble, que hacen parte de la cuenca y se surten con agua subterránea.

Se recomienda realizar perfiles de cloruro más profundos en todos los niveles acuíferos de la formación Morroa y revisar su variación temporal y espacial conforme a la Unidades hidrológicas que lo componen. De igual forma, se deben realizar más perforaciones exploratorias alrededor de las corrientes del Arroyo Grande de la Sabana para identificar los puntos de mayor infiltración en el agua subterránea, con esta información se definirá la necesidad de planes de tratamiento de contaminantes

o se le dará una proyección de uso distinto al agua que sea captada en esa formación.

Se recomienda realizar las estimaciones de la variación temporal de la recarga como también la comparación de los registros de lluvias de la zona las variaciones de cloruro en la zona no saturada, para calcular los tiempos en los cuales se logra recargar las formaciones acuíferas someras.

Para el presente estudio se tomó un valor de Cloruro para el agua lluvia en cinco puntos para un periodo de tiempo de cuatro meses. Es recomendable extender el análisis de la hidroquímica de la lluvia a nivel espacial en la cuenca entendiendo que la zona sur de la misma presenta mayores precipitaciones que la zona norte. También se recomienda tener registro con mayor rango de tiempo a fin de mejorar la exactitud de los datos.

Es recomendable, realizar análisis temporales de las coberturas del suelo mediante imágenes satelitales y teledetección, pues este es uno de los factores con mayores tendencias a cambio, tanto naturales como antrópicos. Con estos análisis se puede tener una información más exacta de las dinámicas mensuales y su efecto sobre la retención y escurrimiento.

Para mejorar los resultados obtenidos es importante realizar una interpretación de los mapas bajo imágenes satelitales donde se logre interceptar las corrientes reales generadas en el área de estudio junto a las proyectadas por la valoración del archivo DEM así ajustar las dinámicas hidrológicas de respuesta. De igual manera, es importante aplicar el análisis Morfométrico cuantitativo y cualitativo a las cuencas que conforman la macro cuenca San Jorge en el departamento de Sucre y las cuencas que conforman la superficie del acuífero de Morroa.

ANEXO A. Resultados de Análisis de Cloruros en agua de precipitación para los diferentes puntos de muestreo.

Resultados Muestras mayo 2018



1902-18 MUESTRA
AGUA LLUVIA VERSA



1904-18 AGUA
LLUVIA BARRIO MAJ



1903-18 AGUA
LLUVIA SAN VICENTE

Resultados Muestras junio 2018



2326-18 AGUA
LLUVIA COD DG 28



2327-18 AGUA
LLUVIA CALLE 14 B B

Resultados Muestras julio 2018



2958-18 AGUA
LLUVIA BARRIO VER



2957-18 AGUA
LLUVIA BARRIO MAJ



2956-18 AGUA
LLUVIA BARRIO SAN



2959-18 AGUA
LLUVIA COROZAL EL

Resultados Muestras agosto 2018



3347-18 AGUA
LLUVIA MORROA MILL



3346-18 AGUA
LLUVIA MORROA 29



3345-18 AGUA
LLUVIA PARQUESITO



3344-18 AGUA
LLUVIA BARRIO VER



3343-18 AGUA
LLUVIA BARRIO MAJ



3342-18 AGUA
LLUVIA SAN VICENTE

ANEXO B. Resultados de Análisis de Cloruros en perfil de suelos para los diferentes puntos de muestreo.



Perfiles sobre
Acuífero de Morroa.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilera Diaz, M. (2005). La Economia Del Departamento De Sucre : Ganadería Y Sector Público. *Banco de La Republica*, 1–129.
- Allison, G. B., & Hughes, M. W. (1978). The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Australian Journal of Soil Research*, 16(2), 181–195. <https://doi.org/10.1071/SR9780181>
- Alvarez, M. del P., Hernández, M. A., Trovatto, M. M., & González, N. (2013). Estimación de la recarga en zonas áridas según distintos métodos . Área medanosa del Sur de Península Valdés. *Agua Subterránea Recurso Estratégico*, 15–22.
- Brune, G. M., Dosch, E. F., Fonner, R. F., Geiger, A. F., Griswold, D. H., Heller, F. K., ... Scherer, O. J. (1968). SECTION 18 GROUND WATER. In *SCS NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK* (p. 227).
- Carrica, J. C., & Lexow, C. (2004). Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. *Revista de La Asociacion Geologica Argentina*, 59(2), 281–290.
- CARSUCRE. (2005). Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas (PPIAS). *Revista PPIAS*, 8–19.
- CARSUCRE. POLITICA PÚBLICA - SANEAMIENTO AMBIENTAL DE LA MICROCUENCA ARROYO GRANDE DE LAS SABANAS (2016).
- CARSUCRE. (2018). *Perfil de Cloruros en la microcuenca del arroyo Grande de Corozal*.
- CARSUCRE, orporación A. R. de S. (2016b). *Plan de Acción INSTITUCIONAL 2016-2019*.
- Chow, V. Te. (1951). A GENERAL FORMULA FOR HYDROLOGIC FREQUENCY ANALYSIS. *American Geophysical Union*, 2(2), 7.
- Cook, P. G., Edmunds, W. M., & Gaye, C. B. (1992). Estimating Palcorecharge and Palcoclimate From Unsaturated Zone Profiles, 28(10), 2721–2731.
- DIAZ CARVAJAL, A. D. (2015). *ESTIMACION DEL NÚMERO DE CURVA Y DE LA ESCORRENTÍA EN LA SUBCUENCA DE BETANCÍ MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICA*.
- Ebrahimian, M., Nuruddin, a. a. B., Amin, M., Soom, B. M., Sood, a. M., & Neng, L. J.

- (2012). Runoff Estimation in Steep Slope Watershed with Standard and Slope-Adjusted Curve Number Methods. *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(5), 1191–1202.
- Edmunds, W. M., Fellman, E., Goni, I. B., & Prudhomme, C. (2002). Spatial and temporal distribution of groundwater recharge in northern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 205–215. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0179-z>
- Ferré, T. P. A., & Warrick, A. W. (2005). Infiltration. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, (1977), 254–260. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00382-9>
- Ferrér, M., Rodríguez, J., & Estrela, T. (1995). Generación Automática Del Número De Curva Con Sistemas De Información Geográfica. *Ingeniería Del Agua*, 2(4), 43–58. <https://doi.org/10.4995/ia.1995.2686>
- García, M. C., Botero, A. P., Bernal, Q. F. A., & Ardila, R. E. (2012). Variabilidad climática , cambio climático y el recurso hídrico en Colombia, 60–64.
- Gumbel, E. . J. . (1941). The Return Period of Flood Flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(2), 163–190.
- HELMUTH, V. A., GUBERNEY, B. R., & RODRIGUEZ, S. N. (2002). CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA Y BACTERIOLÓGICA DEL ACUÍFERO MORROA EN LOS MUNICIPIOS DE SAMPUÉS, SINCELEJO, MORROA, COROZAL Y LOS PALMITOS EN EL DEPARTAMNTO DE SUCRE.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945). Geological Society of America Bulletin EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS ; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua. Estudio Nacional del Agua 2014.*
- IDEAM. (2018). Atlas Interactivo - Climatológico - IDEAM. Retrieved June 3, 2018, from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- INGEOMINAS. (2001). *GEOLOGÍA DE LAS PLANCHAS 44 SINCELEJO Y 52 SAHAGÚN.*
- INGEOMINAS. (2015). *MEMORIA EXPLICATIVA DE LA PLANCHA 45 SAN PEDRO DEPARTAMENTOS DE SUCRE Y BOLÍVAR Escala 1:100.000.*
- INVEMAR, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “Jose Benito Vives De Andrés,”

- CARSUCRE- Corporación Autónoma Regional de Sucre, CVS-Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú - Río San Jorge, IAVH- Instituto Alexander von Humboldt, CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, & UAESPNN- Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales. (2007). Formulación del Plan de Manejo Integrado de la UAC Estuarina Río Sinú - Golfo de Morrosquillo, Caribe. Informe técnico, Fase I. Caracterización y Diagnostico, 472. Retrieved from <http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/uacmorrosquillo.pdf>
- Jimenez, I., & Rodriguez, L. (2008). Diagnóstico de la infiltración y permeabilidad en los suelos de la zona de recarga del acuífero de Morroa en el área Sincelejo, Corozal y Morroa.
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2011). Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of Western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India: A GIS approach. *Environmental Earth Sciences*, 64(2), 373–381. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0860-4>
- Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Jini, K. V. (2012). GIS based morphometric evaluation of Chimmini and Mupily watersheds, parts of Western Ghats, Thrissur District, Kerala, India. *Earth Science Informatics*, 5(2), 111–121. <https://doi.org/10.1007/s12145-012-0101-3>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución Numero 865, Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones § (2004). Retrieved from https://www.cvc.gov.co/cvc/RecursoHidrico/aplicativos/ie_mejorado/documentos/Resolucion865-04.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. Guía Técnica para la formulación de los POMCAS (2014).
- Mishra, S. K., Chaudhary, A., Shrestha, R. K., Pandey, A., & Lal, M. (2014). Experimental verification of the effect of slope and land use on scs runoff curve number. *Water Resources Management*, 28(11), 3407–3416. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0582-6>
- MOLANO, C. C., CIFUENTES, G., & PUENTES, C. (2016). *ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LOS MUNICIPIOS ABASTECIDOS POR LA FORMACIÓN MORROA*.

- Mongil, J., & Navarro, J. (2012). Infiltración y grupos hidrológicos de suelos en las laderas de los páramos (Valladolid). *Cuadernos de Investigacion Geografica*, 38(1), 131–153.
- Mora, V. B., Pissarra, T. C. T., & Galbiatti, J. A. (2009). Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño - Colombia, 29(3), 97–101.
- NRCS, N. R. C. S. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55. *USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55*, 164. [https://doi.org/Technical Release 55](https://doi.org/Technical%20Release%2055)
- NSCS, N. R. C. S. (1999a). Hydrology Training Series. *Runoff Concepts, Module 103*.
- NSCS, N. R. C. S. (1999b). Hydrology Training Series. *Runoff Curve Numbers, Module 204*.
- NSCS, N. R. C. S. (1999c). SCS Runoff Equation - Module 205. *Engineering Hydrology Training Series, United Sta.*
- NSCS, N. R. C. S. (2002). Land Use and Treatment. *National Engineering Handbook Chapter 8 - Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*.
- NSCS, N. R. C. S. (2004). National Engineering Handbook Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *Part 630 Hydrology*, 79.
- NSCS, N. R. C. S. (2009). Hydrologic Soil Groups. *National Engineering Handbook Chapter 7*.
- OMM. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas Volumen I. Manual*. [https://doi.org/OMM-Nº 168](https://doi.org/OMM-Nº168)
- Rebollo, F. L. F., & Loeches, G. M. M. (2007). DIEZ PREGUNTAS ELEMENTALES SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 240–249.
- Ruiz, J. M., Álvarez, B. J., & Marinero, P. (2003). Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI . *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, VI(1994), 137–142.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>
- Scanlon, B. R., Langford, R. P., & Goldsmith, R. S. (1999). Relationship between geomorphic settings and unsaturated flow in an arid setting. *Water Resources Research*, 35(4), 983–999. <https://doi.org/10.1029/98WR02769>
- Shadeed, S., & Almasri, M. (2010). Application of GIS-based SCS-CN method in. *Water Science and Engineering*, 3(1), 1–13. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674->

- Singh, P., Thakur, J. K., & Singh, U. C. (2013). Morphometric analysis of Morar River Basin, Madhya Pradesh, India, using remote sensing and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 68(7), 1967–1977. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1884-8>
- Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*. <https://doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (Area - Altitude) Analysis of Erosional Topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63)
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- USGS. (2016). Watersheds and drainage basins, USGS Water Science School. Retrieved May 20, 2018, from <https://water.usgs.gov/edu/watershed.html>
- Vélez, M. V., & Vásquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología*, 20. <https://doi.org/bdigital.unal.edu.co/4442/>
- Vélez, U. J. J., & Botero, G. A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales (Estimation of the time of concentration and the lag time at San Luis creek basin, Manizales). *Dyna*, 165(165), 59.
- Vincenti, R. D. (2016). Author (s): Rita Delfina Vincenti Published by : Pan American Institute of Geography and History Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/40996679> Accessed : 22-06-2016 16 : 55 UTC La incidencia de los factores litológicos en el escurrimiento fluvial, 135(135), 63–78.
- Vries, J. J. De, & Simmers, I. (2002). Groundwater recharge : an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 5–7. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>
- Zhan, X., Huang, M., & Ave, C. (2004). ArcCN-Runoff : an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps, 19, 875–879. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.03.001>