

**Análisis multicriterio para la determinación de zonas de  
recarga potencial en la microcuenca La Angula, municipio  
de Lebrija, Santander**

**Laura Camila Ríos Vásquez**

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesor (a):

Ph.D. Mario Andres Giraldo Fadul

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, Año 2024

## Resumen

La determinación de zonas de recarga potencial de acuíferos mediante el uso de sistemas de información geográfica se convierte en una herramienta fundamental en la planificación del territorio debido a la importancia de conservar estos sectores bajo sus condiciones de coberturas vegetales originales. La microcuenca de la quebrada La Angula es considerada la fuente de agua superficial principal que abastece a la población de Lebrija, en el departamento de Santander. La zona se encuentra severamente afectada por fenómenos de erosión intensos, pérdida de bosque nativo debido al reemplazo y adecuación de zonas agrícolas, avícolas y ganaderas en continuo crecimiento. El poco conocimiento en hidrogeología del sector y el potencial que representa la complejidad geológica estructural del área para la formación de acuíferos con porosidad secundaria, apoya la necesidad de evaluar las condiciones óptimas del terreno para la captación, infiltración y recarga de los sistemas acuíferos usando datos históricos de precipitación y temperatura. Los resultados obtenidos bajo la aplicación del modelo de superposición cartográfica permitieron la delimitación de dos áreas de importancia alta en la microcuenca La Angula donde se reportan valores de recarga potencial hasta de 300 mm/año.

**Palabras clave:** Hidrogeología, recarga, suelos, infiltración, aguas subterráneas, porosidad.

## Abstract

The determination of potential aquifer recharge zones through the use of geographic information systems becomes a fundamental tool in land planning due to the importance of preserving these sectors under their original vegetation cover conditions. The micro-basin of the La Angula stream is considered the main source of surface water that supplies the population of Lebrija, in the department of Santander. The area is severely affected by intense erosion phenomena, loss of native forest due to the replacement and adaptation of agricultural, poultry and livestock areas in continuous growth. The limited knowledge of hydrogeology in the sector and the potential that the structural geological complexity of the area represents for the formation of aquifers with secondary porosity, supports the need to evaluate the optimal conditions of the terrain for the capture, infiltration and recharge of the aquifer systems using historical precipitation and temperature data. The results obtained from the application of the cartographic overlay model allowed the delimitation of two areas of high importance in the La Angula micro-basin where potential recharge values of up to 300 mm/year are reported.

**Keywords:** Hydrogeology, recharge, soils, infiltration, groundwater, porosity.

# Contenido

1.	Planteamiento del problema de investigación y su justificación .....	8
1.1	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	8
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	10
1.3	JUSTIFICACIÓN.....	11
2.	Objetivos.....	12
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
3.	Antecedentes.....	14
4.	Referente normativo y legal.....	23
5.	Referente teórico.....	24
5.1	CÁLCULO DE LA RETENCIÓN DE LLUVIA POR FOLLAJE .....	25
5.2	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR TEXTURA DE SUELO KFC.....	26
5.3	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN DEL SUELO.....	26
5.4	ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL .....	27
5.5	ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL SEGÚN THORNWAITE 28	
5.6	ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL SEGÚN BUDYKO.....	30
5.7	ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL EL ACUÍFERO.....	30
6.	Metodología.....	32
6.1	ENFOQUE METODOLÓGICO .....	32
6.2	TIPO DE ESTUDIO .....	32
6.3	PROCEDIMIENTO.....	32
6.3.1	fase i: georeferenciación y delimitación de la zona de trabajo.....	33
6.3.2	fase ii: definición de las coberturas terrestres en la microcuenca .....	34
6.3.3	fase iii: creación de un mapa de pendientes topográficas .....	39
6.3.4	fase iv: identificación de la tipología y textura de los suelos y las unidades litológicas existentes .....	40
6.3.5	fase v: obtención y tratamiento de datos climatológicos .....	44
7.	Resultados.....	49
8.	Discusión .....	70
9.	Conclusiones.....	71
10.	Recomendaciones .....	73
11.	Referencias .....	75

---

## Lista de figuras

Figura 1.....	9
Figura 2.....	33
Figura 3.....	34
Figura 4.....	36
Figura 5.....	37
Figura 6.....	38
Figura 7.....	41
Figura 8.....	42
Figura 9.....	45
Figura 10.....	46
Figura 11.....	48
Figura 12.....	49
Figura 13.....	51
Figura 14.....	52
Figura 15.....	53
Figura 16.....	54
Figura 17.....	56
Figura 18.....	58
Figura 19.....	59
Figura 20.....	61
Figura 21.....	62
Figura 22.....	66
Figura 23.....	67
Figura 24.....	68
Figura 25.....	69

---

## Lista de tablas

Tabla 1 .....	24
Tabla 2 .....	27
Tabla 3 .....	29
Tabla 4 .....	39
Tabla 5 .....	39
Tabla 6 .....	40
Tabla 7 .....	43
Tabla 8 .....	57
Tabla 9 .....	60
Tabla 10 .....	63
Tabla 11 .....	64
Tabla 12 .....	65

---

# Lista de símbolos y abreviaturas

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>CTM12</i>	Conforme Transversa Mercator, sistema de coordenadas único nacional
<i>CDMB</i>	Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga
<i>CVC</i>	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
<i>DEM</i>	Modelo digital de elevación
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<i>POMCA</i>	Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
<i>SIG</i>	Sistemas de Información Geográfica

# 1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

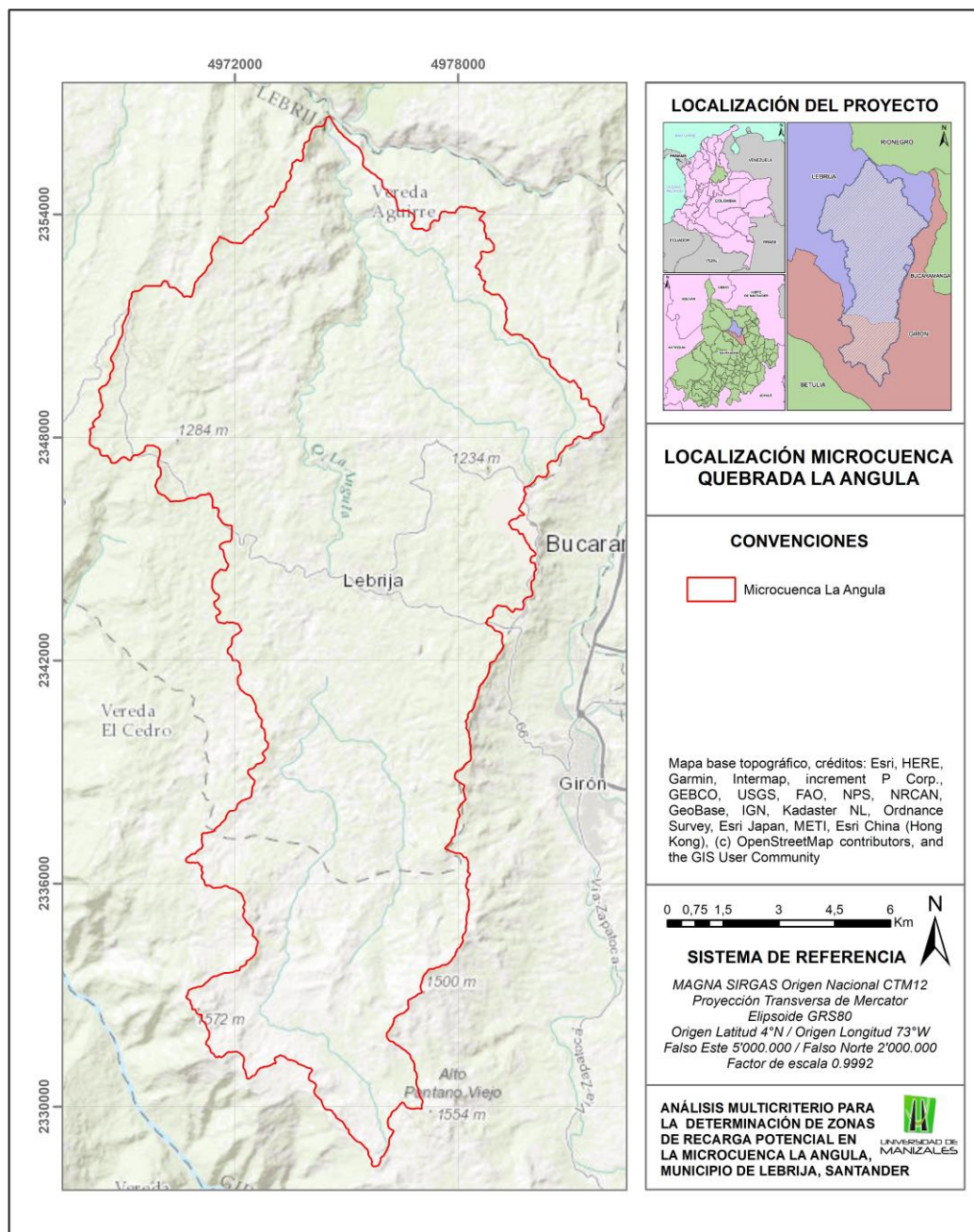
## 1.1 Descripción del área problemática

Lebrija es un municipio localizado a 15 kilómetros de Bucaramanga, capital de departamento de Santander, sobre la cuenca del río Lebrija, uno de los principales sistemas hidrográficos del departamento. La microcuenca La Angula nace en la vereda El Pantano, al suroccidente de la cuenca superior del río Lebrija, y abastece al acueducto de este municipio. Las aguas de los afluentes primarios y secundarios de la quebrada La Angula son captadas para riego y avicultura (Camargo y León, 2008). Por esta razón, la microcuenca se convierte en un área estratégica para el abastecimiento de la población urbana y rural de Lebrija influyendo en el desarrollo de las diferentes actividades agropecuarias que abastecen a municipios aledaños. Así mismo, diferentes estudios indican que este territorio cuenta con un potencial hídrico para la formación de acuíferos por el alto grado de fracturamiento de las rocas que genera una condición de porosidad secundaria (Bohórquez, 2019).

La zona de estudio abarca un área aproximada de 18718 hectáreas (Ver Figura 1), y se encuentra delimitada en las coordenadas Magna Sirgas CTM12  $X_i=4968086$  m,  $X_f=4981923$  m,  $Y_i=2328388$  m,  $Y_f=2356626$  m.

**Figura 1**

*Localización de la microcuenca La Angula, municipio de Lebrija, Santander*



---

## 1.2 Formulación del problema

El desabastecimiento de agua ha sido una problemática continua para el municipio de Lebrija. La mesa de Lebrija, especialmente la parte alta de la microcuenca La Angula, se encuentra severamente afectada por procesos erosivos debido a los reemplazos de las coberturas naturales por cultivos de piña y limón Tahití y los extensos periodos de sequía que sufre esta región (Centro de estudios regionales, 2010). La deficiencia en el control de la extensión geográfica de actividades antrópicas en la microcuenca La Angula, pese a que existan actualmente reglamentaciones emitidas por la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB sobre la protección, distribución y uso eficiente del recurso hídrico de la fuente quebrada La Angula (Resolución 1089 de 2014), ha llevado al ecosistema a un estado de criticidad por el alto grado de erosión de los suelos y la pérdida de vegetación autóctona, condición que supone una alteración del ciclo hidrológico en la cuenca y por ende, la afectación de las condiciones de recarga potencial en el sistema acuífero.

Bajo estas premisas, se plantea la aplicación de una metodología de análisis multicriterio para la generación de un insumo cartográfico actualizado que permita la zonificación de zonas potenciales de recarga en la microcuenca La Angula.

### **1.3 Justificación**

El avance de los fenómenos de erosión sobre la microcuenca La Angula en el municipio de Lebrija debido a la pérdida de cobertura vegetal ha incrementado la necesidad de evaluar la expansión actual de las actividades económicas en el territorio, y el grado de impacto que dichas actividades han generado en la dinámica hídrica superficial y subterránea de la microcuenca.

El manejo de herramientas SIG constituye un insumo fundamental en la evaluación y tratamiento de información espacial de los elementos que componen una cuenca hidrográfica. La delimitación de las zonas con importancia hidrogeológica para el fenómeno de recarga potencial en la microcuenca, se convierte en un soporte para entidades como la CDMB y la Secretaría de Planeación del municipio de Lebrija en la actualización de los planes de ordenación y manejo de la microcuenca de la quebrada La Angula. De esta manera, se proyecta la implementación de este tipo de metodologías en la evaluación del estado actual de otras cuencas hidrográficas con el fin de unir esfuerzos y articular políticas de conservación que beneficien a las comunidades aledañas que hacen uso del recurso hídrico.

La novedad del proyecto viene íntimamente relacionada con la calidad de los datos a emplear para la obtención del mapa de zonificación, pues se pretende una recopilación y tratamiento exhaustivo de información climatológica, imágenes satelitales, entre otros insumos, que permitan el desarrollo y aplicación del modelo seleccionado con mayor exactitud y confiabilidad.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Realizar un análisis multicriterio mediante la aplicación de una metodología de superposición cartográfica para la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca La Angula, en el municipio de Lebrija, Santander, con el fin de identificar los sectores que requieren un manejo especial de preservación.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Determinar las coberturas de la tierra en la microcuenca La Angula por medio de procesamiento digital de imágenes satelitales para la detección de cambios de las condiciones medioambientales autóctonas en el territorio.
2. Generar un mapa de pendientes topográficas empleando un modelo digital de elevación DEM que permita definir las diferencias del relieve en zonas estratégicas.
3. Identificar la tipología y textura de los suelos como medida de la capacidad de infiltración hacia los acuíferos por medio de información secundaria.

4. Calcular la evapotranspiración, retención por follaje e infiltración pluvial mensual en la microcuenca mediante la obtención y tratamiento de información climatológica en el área de influencia.

5. Calcular y delimitar espacialmente la recarga potencial anual en la microcuenca La Angula usando herramientas SIG para el reconocimiento de zonas de interés hidrogeológico.

### 3. Antecedentes

La recarga de aguas subterráneas se define como la infiltración de agua desde la superficie del suelo hasta el nivel freático en un sistema acuífero, es un proceso esencial para el estudio hidrogeológico de una región pues permite evaluar el potencial de las aguas subterráneas en periodos secos y depende de diversos parámetros geológicos e hidrogeológicos (Simsek *et al.*, 2020). La recarga puede determinarse por varios métodos, una de los más difundidos es el balance hídrico, en donde se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance. Los balances de humedad del suelo, y el método de fluctuaciones del nivel freático hacen parte de este grupo (Vélez y Vásquez, 2004).

Las entidades ambientales en Colombia adelantan estudios para la identificación y delimitación de zonas de recarga potencial de acuíferos, como medidas de protección y preservación (IDEAM, 2018). Con la iniciativa de Planes de Ordenamiento y manejo de Acuíferos, se pretende desarrollar mapeos de zonas de importancia hidrogeológica como zonas de recarga, tránsito, sistemas lénticos y lóxicos asociados al recurso subterráneo, perímetros de protección de pozos de abastecimiento humano, zonas vulnerables a la contaminación, entre otras variables (CVC, 2008). A continuación, se presenta una revisión sistemática de antecedentes sobre los métodos de estimación de recarga potencial integrando sistemas de información geográfica en diferentes regiones del mundo.

Batelaan y De Smedt (2007) desarrolla un modelo de balance hídrico distribuido espacialmente para simular el impacto a largo plazo en cuencas y subcuencas de Bélgica y los Países Bajos. El modelo Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere

---

(WetSpass), compila variables geográficas, geológicas, geomorfológicas, climáticas, usos del suelo y simula una recarga iterativamente conectada a una fuente de agua subterránea para estudiar la influencia de los efectos a largo plazo de la cobertura del suelo y los cambios en el régimen hídrico de una cuenca.

Ghorbani *et al.* (2017) en su estudio enfocado en la producción de un mapa del potencial de agua subterránea en la llanura de Azna, provincia de Lorestan, Irán, indica que dicho potencial está controlado principalmente por un conjunto de factores condicionantes: altitud, litología, ángulo de la pendiente, la distancia al río, la densidad del drenaje y el uso del suelo. En este estudio, los modelos de elevación digitales DEM son un insumo fundamental para la generación de factores topográficos. El mapa de pendientes, obtenido a partir del procesamiento del DEM, juega un papel importante en el análisis de escorrentía, la recarga de acuíferos y el movimiento de agua superficial, pues las áreas con topografía plana presentan una tasa de infiltración relativamente alta. La litología también se considera un factor crítico en la estimación de la recarga, pues la porosidad y permeabilidad de los materiales que conforman el subsuelo influyen en la capacidad de recarga hacia los acuíferos. Finalmente, se concluye que otro de los factores a evaluar detalladamente en el modelo es la cobertura y el uso del suelo, pues la tierra cubierta por bosque regula el flujo continuo de agua y contribuye a la infiltración de agua hacia el acuífero de manera regular, caso contrario de la tierra cultivada que modifica las condiciones naturales del suelo, aumentando, en muchos casos, la saturación del agua y contribuyendo a la inestabilidad de las pendientes (Devkota *et al.*, 2014 en Ghorbani *et al.*, 2017).

Balamurugan *et al.* (2017) realizó una delimitación de las zonas potenciales de agua subterránea en el valle de Leh, Jammu y Cachemira, India, mediante la adopción de un modelo de relación-frecuencia (FR). Este modelo es un enfoque estadístico bivariado que relaciona los

---

pozos artificiales para recolectar agua de manantial (variable dependiente), con el uso y la cobertura del suelo, la hidrogeomorfología, la pendiente, la geología, la densidad de lineamientos, la densidad de drenaje, la ubicación de los manantiales y el nivel del agua subterránea (variables independientes). Estas capas temáticas fueron creadas en un SIG y almacenadas en una geodatabase. Posteriormente fueron convertidas de formato vectorial a ráster con una celda de cuadrícula de 10 m para un análisis de integración adicional utilizando el modelo FR.

Sallway *et. al* (2019) realiza un análisis de idoneidad de zonas para la recarga gestionada de acuíferos (MAR), el cual involucra procesos muy similares a la estimación de zonas de recarga natural de las aguas subterráneas. Este estudio propone un enfoque holístico para la selección de dichos sitios combinando análisis de decisión multicriterio y sistemas de información geográfica, a través de la clasificación de capas temáticas, estandarización y ponderación de criterios y superposición de capas, y basándose en factores intrínsecos que controlan el proceso de recarga de aguas subterráneas como la hidrogeología, topografía, tipo de suelo, uso de la tierra y el clima.

Sánchez-Farfán (2018) integró una metodología múltiple en la cuenca del Estero Yerba Loca, ubicada en la subcuenca del río Mapocho Alto, Chile Central, que permitió, por un lado, la identificación de zonas potenciales de recarga utilizando información de sensores remotos y geoprocusamientos en un SIG y, posteriormente, obtener los valores medios de la recarga potencial para el periodo analizado, por medio de un método químico ambiental basado en el balance del ión cloruro con datos de concentración de cloruro del agua de los poros del suelo y del agua de la precipitación (lluvia y/o nieve). Para la elaboración del mapa de zonas potenciales de recarga, se crearon las siguientes capas temáticas en formato ráster: pendientes, geología,

---

densidad de lineamientos, vegetación y densidad de drenaje. Estos mapas fueron reclasificados teniendo en cuenta el potencial de recarga, adoptando valores reportados por Dar *et al.* (2010) en su estudio “Remote sensing technology and geographic information system modeling: an integrated approach towards the mapping of groundwater potential zones in hardrock terrain, Mamundiyyar basin”. Finalmente, las capas fueron integradas en una única salida ráster utilizando la función lógica SI.

Simsek *et al.* (2020) aplica un método de fluctuación del nivel freático para estimar la recarga subterránea en el acuífero aluvial Alaşehir en Anatolia occidental, Turquía, a través del monitoreo de 16 pozos perforados en el área de investigación del acuífero. Este método, integrado en un sistema de información geográfica, es útil para la evaluación de la recarga y descarga en acuíferos libres. La medición de los niveles freáticos y las pruebas de bombeo permitieron construir mapas mensuales de niveles freáticos y mapas de diferencias de nivel entre meses consecutivos usando técnicas de interpolación ponderada (IDW) para un periodo hidrológico, así como un mapa de distribución del almacenamiento del acuífero; variables que fueron compiladas en un análisis espacial tridimensional mediante un SIG, arrojando el cálculo de los volúmenes de los cambios del nivel freático y con ello, la recarga de aguas subterráneas en la cuenca. Pese a que es un método con resultados confiables, requiere exclusivamente datos obtenidos a partir de mediciones directas en campo, lo que aumenta los costos de realización.

Moeck *et al.* (2020) integra un conjunto de datos a escala global sobre tasas de recarga natural directa de aguas subterráneas. Con este estudio, estima que las tasas de precipitación y la estacionalidad de la temperatura y la precipitación son las variables más importantes para predecir la recarga, aunque influye considerablemente la vegetación y a tipología del suelo.

---

Pérez-Pardo (2021) realiza un estudio en la microcuenca del río Botello, afluente de la cuenca media del río Bogotá, principal fuente de abastecimiento de agua en el municipio de Facatativá, Cundinamarca. Los procesos de expansión de la frontera agrícola en este sector han contribuido a la necesidad de identificar y delimitar las zonas potenciales de recarga y así trabajar en su restauración y conservación. Para este fin implementa el modelo propuesto por Matus *et al.* (2009), en su guía para la identificación participativa de zonas de recarga hídrica a través de la superposición de capas temáticas y ponderación de variables usando sistemas de información geográfica. Estos mapas fueron creados a través del tratamiento de información secundaria, con la obtención de mapas geológicos y edafológicos a nivel departamental y nacional, adquisición de imágenes satelitales para la identificación e interpretación de coberturas de suelo a partir de las diferentes combinaciones de banda y tratamiento de un modelo de elevación del terreno con resolución 12.5 metros de la misión Alos Palsar, para la creación del mapa de pendientes de la zona. La asignación de pesos relativos a cada elemento de acuerdo a Matus *et al.* (2009) se hace en función de la importancia de ese elemento en el proceso de infiltración del agua; para el área de estudio de Pérez-Pardo (2021), en particular, la cobertura natural y el uso del suelo son las variables más sensibles y que presentan mayor dinámica dentro del área, por lo que influyen en mayor medida sobre el potencial de recarga. Esta metodología es aplicada en zonas donde no se cuenta con gran disponibilidad de datos, y mejora su confiabilidad a medida que los productos cartográficos sean generados a una escala más detallada.

Maghribi *et al.* (2022) en su revisión sistemática de antecedentes sobre análisis de decisiones multicriterio para la determinación del potencial de recarga de aguas subterráneas usando sistemas de información geográfica, indica que los avances actuales en el procesamiento de imágenes digitales, combinados con mapas topográficos y análisis multicriterio del entorno

---

geoespacial que integra datos como geología, topografía, cobertura terrestre, tipo de suelo, densidad de lineamientos geológicos, densidad de drenaje, pendiente y precipitaciones, entre otros, ha mejorado considerablemente la identificación de las áreas potenciales de recarga en diferentes partes del mundo donde se han adoptado estas metodologías. El análisis multicriterio, como un método de toma de decisiones, determina cuál es la mejor alternativa de acuerdo a los objetivos de la investigación y en función de los criterios específicos. Los estudios recopilados en esta revisión integran diferentes combinaciones de criterios para determinar el potencial de recarga de aguas subterráneas.

Garzón y Salcedo (2022) realizan la estimación de la recarga mensual en zona de acuíferos de la Formación Geológica Los Santos, en la Mesa de Los Santos, Santander, utilizando el código del modelo numérico Soil Water Balance SWB, el cual requiere el cálculo de la evapotranspiración potencial, texturas del suelo, usos del suelo, grupos hidrológicos del suelo, dirección de flujo y capacidad de agua disponible. La evapotranspiración es considerada una salida muy importante del balance hídrico en el suelo, en este caso utilizando el programa SWB se pudo aplicar dos métodos para estimar la evapotranspiración potencial mensual de acuerdo a la información climática disponible y seleccionar el más adecuado dependiendo de las características de la región en estudio.

Schosinsky y Losilla (2000) y Schosinsky (2006) proponen un modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Este método es ampliamente aceptado y utilizado en la estimación de la recarga potencial de acuíferos partiendo de la obtención de las variables requeridas a través de diferentes métodos directos en campo, o por medio de recopilación y tratamiento de información secundaria. A continuación, se resumen algunos casos

---

de estudio en Latinoamérica donde se ha hecho uso de esta metodología, aplicada en la presente investigación.

Ramirez-Granados (2013) aplica la metodología de Schosinsky (2006) y Schosinsky y Losilla (2000) para aproximar la recarga potencial en la cuenca del río Frío, en la zona norte de Costa Rica, utilizando las técnicas del modelado de datos hidrogeológicos y sistemas de información geográfica. Para este método, se hace necesaria la recopilación y tratamiento de información para la consolidación de diversos parámetros: información climática correspondiente a precipitación y temperatura para el cálculo de la evapotranspiración potencial a través de registros históricos de estaciones, fotografías aéreas para la clasificación del uso de la tierra; por otro lado, las propiedades morfométricas del terreno se obtuvieron a partir de curvas de nivel topográficas vectorizadas a escala 1:50.000, insumo que permitió la construcción de un modelo numérico del terreno a través de triangulación y con ello, la generación de un mapa de pendientes en porcentaje. Para la definición de las propiedades hidrogeológicas de los suelos se llevó a cabo una etapa de muestreo y posteriormente la determinación de los estados de retención de agua y densidad aparente en laboratorio, así como ensayos de infiltración in situ para la caracterización de la velocidad de infiltración del suelo. La información meteorológica, las propiedades del terreno y las características hidrológicas de los suelos anteriormente mencionadas, fueron espacializadas a partir de un método de interpolación con el propósito de construir once zonas las que fueron la base para aplicar el cómputo del balance hídrico de suelo, de acuerdo a la metodología de Schosinsky y Losilla (2000) y de Schosinsky (2006) y con ello, determinar la recarga potencial hacia los acuíferos en la cuenca del río Frío. Un sistema de información geográfica permitió la integración y modelación de los datos muestreados, la elaboración de las zonas de balance hídrico y la segmentación de la cuenca en dichas zonas. Los

---

resultados de la aplicación del modelo de recarga potencial de acuíferos a partir del cálculo de la infiltración basado en la lluvia mensual, demuestran variaciones de los rangos de recarga que varían de acuerdo a la zona de la cuenca, principalmente asociadas a los cambios de cobertura vegetal y usos del suelo y a las propiedades hidrológicas de éstos (Arias, 2011, en Ramírez-Granados, 2012).

A partir de la metodología propuesta por Schosinsky, Perdomo y Rojas (2017) realizó un estudio enfocado en la determinación de la potencialidad de recarga de agua a los acuíferos en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá, Boyacá. Los datos de pluviosidad abarcando series de 30 años fueron obtenidos de estaciones del IDEAM. Para la consolidación del mapa de pluviosidad anual se realizó el análisis de las precipitaciones o isoyetas mensuales a partir de los datos mensuales multianuales. El mapa de textura del suelo y el mapa de cobertura vegetal fueron generados a partir de información secundaria del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Finalmente, el mapa de pendientes se obtuvo a partir de un modelo digital de elevaciones.

Así mismo, la metodología Schosinsky y Losilla (2000) fue aplicada para el cálculo de la recarga potencial del acuífero superficial ubicado en la Isla de Méndez, en el Salvador, por Alvarado-Batres (2020). Para ello se utilizó información secundaria y registros de la estación climatológica más cercana del área de investigación. Adicionalmente, se realizaron muestreos in situ: pruebas de infiltración, inventario de pozos excavados y análisis de variables físico-químicas en el campo con el fin de caracterizar la dinámica del flujo y comparar la calidad del agua con base en sus propiedades físico-químicas.

Finalmente, el método de Schosinsky (2006) fue aplicado en la estimación del volumen de recarga anual en el sistema acuífero de Santa Marta, Colombia, por el investigador Iguarán-

Hernández (2022). A través de este estudio, se obtuvieron mapas mensuales aplicando operaciones matemáticas entre archivos ráster, obteniendo como producto final un mapa de recarga potencial anual que expone las áreas con mayor potencial de recarga.

## **4. Referente normativo y legal**

Resolución 1089 de 2014 / Diario Oficial N° 49359 de 8 de diciembre de 2014:

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA. Por medio de la cual se dictan unas disposiciones de carácter general en materia de concesión de aguas y de reglamentación, distribución y uso eficiente del recurso hídrico en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB).

## 5. Referente teórico

El potencial de aguas subterráneas en un acuífero se define como la máxima cantidad de agua a extraer del acuífero, sin que sea sobreexplotado. Schosinsky y Losilla (2000) plantean un modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual, variable necesaria para determinar la recarga potencial de los acuíferos. La metodología correlaciona los valores de infiltración potencial mensual, la infiltración básica del suelo y la precipitación mensual. La variable es calculada y ajustada teniendo en consideración las diferencias de relieve, la cobertura vegetal y la interceptación de lluvia por follaje. La metodología tiene como punto de partida el Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos realizado por las Naciones Unidas en 1972, con colaboración de los gobiernos de El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá y Costa Rica. En este estudio, se evalúan y ponderan los componentes que conforman el coeficiente de infiltración aparente (Ver Tabla 1), que corresponde a la fracción de lluvia que aparentemente se infiltra, cuyo resultado se obtiene de la sumatoria de la fracción que infiltra por efecto de la pendiente, la fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal, y la fracción que infiltra por textura del suelo.

**Tabla 1**

*Componentes del coeficiente de Infiltración*

<b>Por textura de suelo</b>	<b>K<sub>fc</sub></b>
Arcilla compacta impermeable	0.10
Combinación de limo y arcilla	0.20
Suelo limo arenoso no muy compacto	0.40
<b>Por pendiente</b>	<b>K<sub>p</sub></b>
Plana (0.02% - 0.06%)	0.30
Moderada (0.3% - 0.4%)	0.20

Colinas 3% - 4%	0.10
<b>Por cobertura vegetal</b>	<b>Kv</b>
Terrenos cultivados	0.10
Bosques	0.20

Fuente: (ONU, 1974 en Schosinsky y Losilla, 2000)

Posteriormente, Schosinsky (2006) refina el modelo del coeficiente de infiltración propuesto por Schosinsky y Losilla (2000) y plantea una metodología del cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos, considerando las siguientes variables: Precipitación mensual, retención pluvial, capacidad de infiltración de los suelos, cobertura vegetal, profundidad de las raíces, evapotranspiración real, uso del suelo y la pendiente del terreno. El balance de suelos se basa en el principio de conservación de la materia, en donde la entrada de agua al sistema es debido a la infiltración del suelo y la salida se debe a los fenómenos de evapotranspiración y descarga de los acuíferos.

Para la determinación de la recarga del acuífero, se debe calcular inicialmente la fracción de lluvia que intercepta el follaje. Con este valor, y el cálculo del coeficiente de infiltración definido por las variables de precipitación mensual, tipo de suelo, pendientes y cobertura vegetal, se estima la infiltración pluvial mensual. Por último, se realiza el balance de suelo que involucra el cálculo de la pérdida de agua por evapotranspiración, para así determinar la fracción de agua que drena del suelo hasta el acuífero. A continuación, se detallan las ecuaciones propuestas por Schosinsky (2006) para el cálculo de las variables en mención.

### 5.1 Cálculo de la retención de lluvia por follaje

$$\text{Si } P \leq 5 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}, \text{ Ret} = P$$

$$\text{Si } (P)(Cfo) \geq 5 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}, \text{ Ret} = (P)(Cfo) \quad (1)$$

$$\text{Si } P > 5 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} \text{ y } (P)(Cfo) < 5, \text{Ret} = 5$$

Donde:

P= Precipitación mensual del mes [mm/mes].

Ret= Retención de lluvia en el follaje [mm/mes].

Cfo= Coeficiente de retención del follaje, definido como el porcentaje de la lluvia mensual retenido por la cobertura vegetal. Para bosques muy densos Cfo= 0.20, otras coberturas Cfo= 0.12 [adimensional].

## 5.2 Cálculo del coeficiente de infiltración por textura de suelo Kfc

$$Kfc = 0.267 \ln(fc) - 0.000154(fc) - 0.723 \quad (2)$$

Donde:

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

fc = Infiltración básica del suelo [mm/día]. El valor de fc corresponde a la permeabilidad del suelo saturado en los primeros 30 centímetros de profundidad, pues se considera que este nivel del suelo entra en contacto directo con el agua de lluvia.

## 5.3 Cálculo del coeficiente de infiltración del suelo

$$\text{Si } Kp + Kv + Kfc > 1, Ci = 1$$

$$\text{Si } Kp + Kv + Kfc \leq 1, Ci = Kp + Kv + Kfc \quad (3)$$

Donde:

$C_i$ = Coeficiente de infiltración [adimensional].

$K_p$ = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional].

$K_v$ = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional].

$K_{fc}$ = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional].

El coeficiente de infiltración es el factor por el cual se multiplica la precipitación mensual para obtener la fracción de agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. Los valores sugeridos de estos componentes, se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Componentes del coeficiente de Infiltración ajustados en Schosinsky (2006)*

<b>Por pendiente</b>	<b><math>K_p</math></b>
Muy plana (0.02%-0.06%)	0.30
Plana (0.3%-0.4%)	0.20
Algo plana (1%-2%)	0.15
Promedio (2%-7%)	0.10
Fuerte (Mayor de 7%)	0.06
<b>Por cobertura vegetal</b>	<b><math>K_v</math></b>
Cobertura con zacate menos del 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más del 75%	0.21

Fuente: (Schosinsky y Losilla, 2000 y Schosinsky, 2006)

#### 5.4 Ecuación para el cálculo de la infiltración pluvial mensual

$$P_i = (C_i)(P - Ret) \quad (4)$$

Donde:

$P_i$ = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo [mm/mes]

$C_i$ = Coeficiente de infiltración [adimensional]

$P$ = Precipitación mensual (dato meteorológico) [mm/mes]

$Ret$ = Retención de lluvia mensual por follaje [mm/mes]

La capacidad de campo es la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo no saturado luego de ocurrir la precipitación. Luego, las raíces de las plantas toman el agua que se encuentra en los poros del suelo en el proceso conocido como evapotranspiración. La evapotranspiración potencial (ETP) se calcula en condiciones de humedad del suelo y cobertura vegetal óptimas. Por su parte, la evapotranspiración real (ETR) depende de los diferentes gradientes de humedad y condiciones existentes de cobertura. En este estudio se contempla el cálculo teórico de evapotranspiración potencial en mm/mes por el método de Thornwaite, y el cálculo teórico de evapotranspiración real por el método de Budyko.

### 5.5 Ecuaciones para el cálculo de la evapotranspiración potencial según Thornwaite

Índice de calor mensual ( $i$ ) a partir de la temperatura media mensual ( $t$ )

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad (5)$$

Índice de calor anual ( $I$ )

$$I = \sum i \quad (6)$$

ETP mensual sin corregir (ETP<sub>sc</sub>)

$$ETP_{sc} = 16\left(\frac{10*t}{I}\right)^a \quad (7)$$

Donde:

ETP<sub>sc</sub> = Evapotranspiración potencial mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas)

t = temperatura media mensual en °C

I = Índice de calor anual

$$a = (675 * 10^{-9} * I^3) - (771 * 10^{-7} * I^2) + (1792 * 10^{-5} * I) + 0.49239 \quad (8)$$

ETP mensual corregida (ETP)

$$ETP = ETP_{sc} * \frac{N}{12} * \frac{d}{30} \quad (9)$$

Donde:

ETP= Evapotranspiración potencial mensual corregida

N= Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud (Ver Tabla 3)

d= Número de días del mes

**Tabla 3**

*Número máximo de horas de sol para Colombia*

Latitud (N)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov	Dic.
12	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3
10	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4
8	11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12	11.8	11.6	11.5
6	11.7	11.8	12	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12	11.9	11.7	11.7
4	11.8	11.9	12	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12	11.9	11.8	11.8

Fuente: (Adaptado de Allen et al., 1998 en Sanchez, Javier, S.F)

### 5.6 Ecuación para el cálculo de la evapotranspiración real según Budyko

La ecuación de Budyko se basa en los datos de evapotranspiración potencial (ETP) y precipitación mensual para el cálculo de la evapotranspiración real, así:

$$ETR = [(ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right)) (1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right))]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Finalmente, la recarga potencial tiene lugar si la cantidad de agua es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo (máxima acumulación) y satisfacer la evapotranspiración de las plantas (Schosinsky, 2006). El cálculo de la recarga potencial viene dado por la siguiente expresión:

### 5.7 Ecuación para el cálculo de la recarga potencial el acuífero

$$Rp = Pi + Hsi + Hsf - ETR \quad (11)$$

Donde:

Rp= Recarga potencial mensual [mm/mes]

Pi= Precipitación que infiltra en mm/mes

Hsf= Humedad del suelo al final del mes [mm]

ETR= Evapotranspiración real [mm/mes]

En este estudio se contempla como entrada al sistema la precipitación que infiltra en mm/mes, calculada con los parámetros de follaje, pendientes, coberturas del suelo y textura del

suelo (Ecuación 4). Como salida del sistema se evalúa la evapotranspiración real teórica, determinada por el método de Budyko (Ecuación 10).

---

## 6. Metodología

### 6.1 Enfoque metodológico

Clase de investigación: Aplicada (Resuelve problemas específicos o desarrolla nuevos productos, procesos o técnicas).

Tipo de investigación aplicada: Fundamental (Generación de conocimientos en forma de teoría o métodos).

Enfoque: Cuantitativo (Parte de la observación, comprobación y experiencia).

### 6.2 Tipo de estudio

Correlacional (Determina la variación en unos factores en relación con otros).

### 6.3 Procedimiento

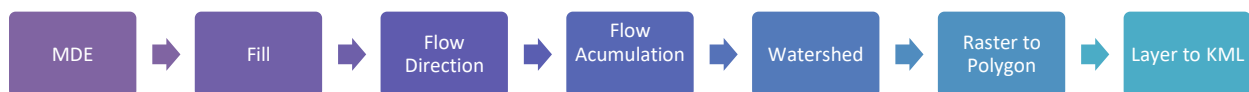
El método para estimar de las zonas de recarga potencial en la microcuenca comprendió, en primera medida, el reconocimiento del problema a través de la consulta, recopilación y organización de información de la temática a estudiar para establecer los fundamentos y el estado del conocimiento en la materia y su posterior tratamiento, discusión y síntesis de resultados. El alcance del proyecto se enmarca en la creación de un mapa resultante que zonifique las zonas óptimas para el proceso de recarga natural del sistema acuífero en estudio, a partir de la superposición de diferentes capas temáticas. A continuación, se presenta una síntesis de las etapas metodológicas desarrolladas en la investigación y sus actividades relacionadas.

### 6.3.1 Fase I: Georeferenciación y delimitación de la zona de trabajo

Inicialmente, se recopilaron diversos estudios que evalúan el contexto geográfico de la microcuenca La Angula. Luego, se obtuvo un modelo digital de elevación (MDE) del área con resolución de 12.5 metros por píxel. Empleando herramientas de hidrología sobre el ráster, alojadas en la caja de herramientas de Spatial Analyst Tools del Software SIG ArcMap v.10.8.2 (Figura 2), se realizó la delimitación de la cuenca. El ráster resultante fue convertido a formato vectorial y a formato Keyhole Markup Language (KML) con el fin de validar los límites de la cuenca y ajustar los vértices del polígono gracias a la visualización del relieve que ofrece la interfaz de Google Earth. Con este proceso, se obtuvo un área final de estudio de la microcuenca La Angula de aproximadamente 18.718 hectáreas (Figura 3). El archivo vectorial fue reproyectado al sistema de referencia MAGNA SIRGAS – Origen Nacional CTM12, origen de coordenadas seleccionado para la salida gráfica de todos los productos cartográficos resultantes de la investigación. La escala de trabajo de los mapas (1:50.000) fue definida con base en la calidad y resolución espacial de los insumos obtenidos para el desarrollo del estudio.

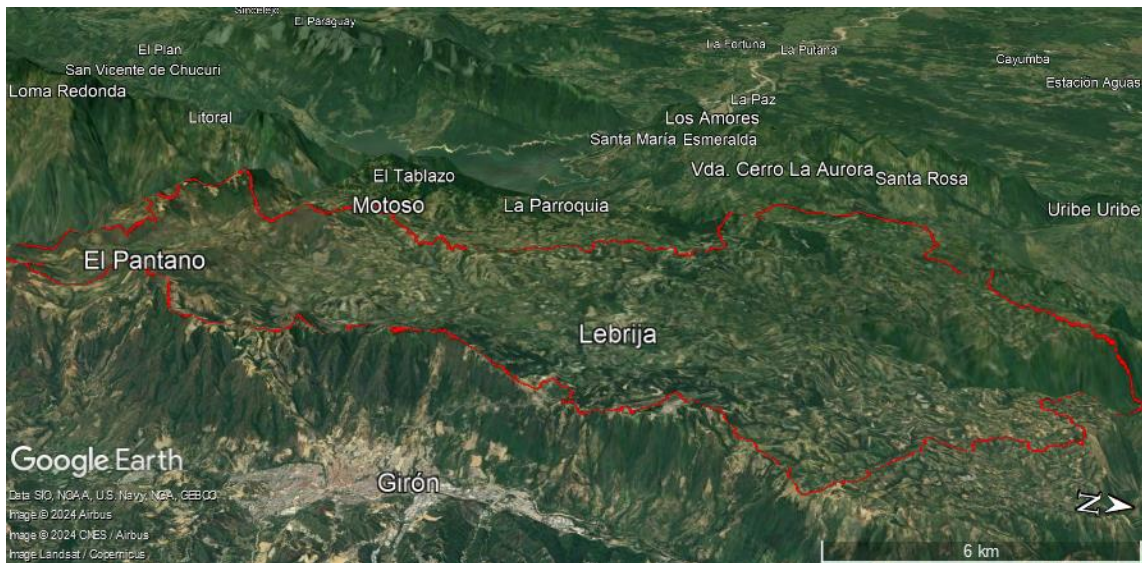
#### Figura 2

*Procedimiento para la delimitación de la microcuenca empleando un modelo digital de elevación*



**Figura 3**

*Visualización del área de la microcuenca en la plataforma Google Earth*



Fuente: Elaboración propia.

**6.3.2 Fase II: Definición de las coberturas terrestres en la microcuenca**

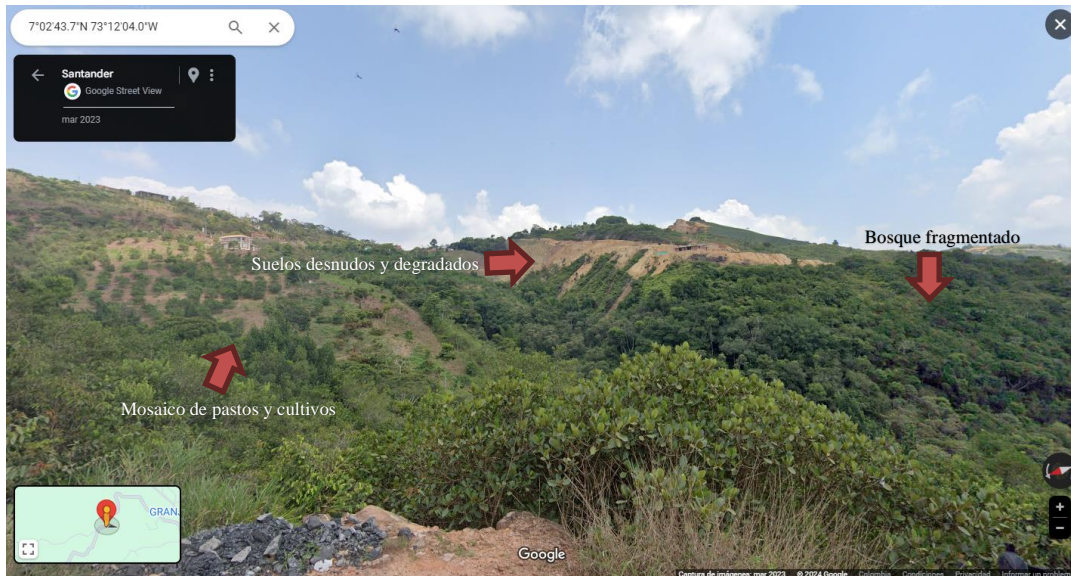
Actualmente es posible acceder a una gran variedad de plataformas para la descarga gratuita de imágenes de satélite. Estos insumos cuentan con diferentes resoluciones espaciales, radiométricas, espectrales y temporales. Para efectos de la investigación, se realizó el registro, búsqueda y descarga de una imagen satelital de 8 bandas con resolución espacial de 3 metros y resolución radiométrica de 16 bits en la plataforma PlanetScope de la empresa Planet Labs. La imagen fue capturada el 27 de enero del año 2023 y es apta para el análisis de coberturas en el área de la microcuenca puesto que tiene 0% de nubosidad. Con base en la combinación de bandas de la imagen satelital Planet en falso color (8-5-4), estudios previos de clasificación de coberturas terrestres y usos del suelo en la zona, la visualización de algunos sectores estratégicos por medio de la herramienta Google Street View (Figura 4) y tomando como guía la

clasificación de coberturas de la Tierra Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010), se identificaron 5 tipologías de coberturas existentes en la microcuenca La Angula, así:

1. Territorios artificializados: Bajo esta clasificación se incluye el casco urbano del municipio de Lebrija, la vía nacional Bucaramanga-Barrancabermeja, el Aeropuerto Internacional Palonegro, sectores que cuentan con tejido urbano disperso, y granjas avícolas de importante extensión que son diferenciables en la imagen satelital por la agrupación y extensión de los galpones que las conforman.
2. Suelos desnudos y degradados con poca vegetación: Comprende las zonas donde se evidencia una pérdida total o casi total de la vegetación autóctona debido a expansión agrícola y urbana, generando superficies altamente erosionables y secas. Estas áreas se distribuyen sobre toda la microcuenca alterando las condiciones del paisaje.
3. Cuerpos de agua: Incluye una porción del río Sogamoso en la parte alta de la microcuenca, pozos de agua artificiales y algunos cursos de agua menores que atraviesan el área.
4. Bosque fragmentado: Esta cobertura comprende territorios cubiertos por bosques naturales densos o abiertos que han sufrido intervención humana por la integración de coberturas como pastos, cultivos o vegetación en transición (IDEAM, 2010). En la microcuenca, se identifican zonas de bosque con una afectación entre el 20% y el 30% del área total de la unidad debido al reemplazo por mosaicos de pastos y cultivos y zonas deforestadas con baja recuperación.
5. Mosaico de pastos y cultivos: Bajo esta clasificación se delimita un área importante de la microcuenca, pues la variedad de cultivos, predominantemente frutales (limón Tahití, naranja, piña, etc) combinados con áreas de pastizales representan en la imagen satelital arreglos geométricos con una amplia gama de tonos debido a los diferentes estados en los que se encuentra el cultivo que facilitan su identificación e interpretación (IDEAM, 2010).

**Figura 4**

*Coberturas presentes en el área de estudio vista Google Maps año 2023*



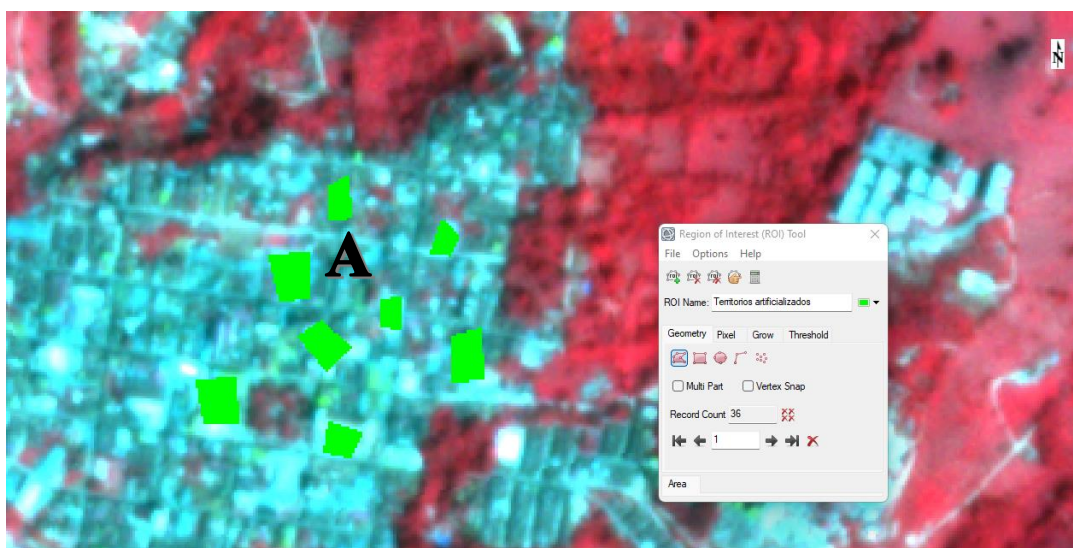
Fuente: (Google Street View)

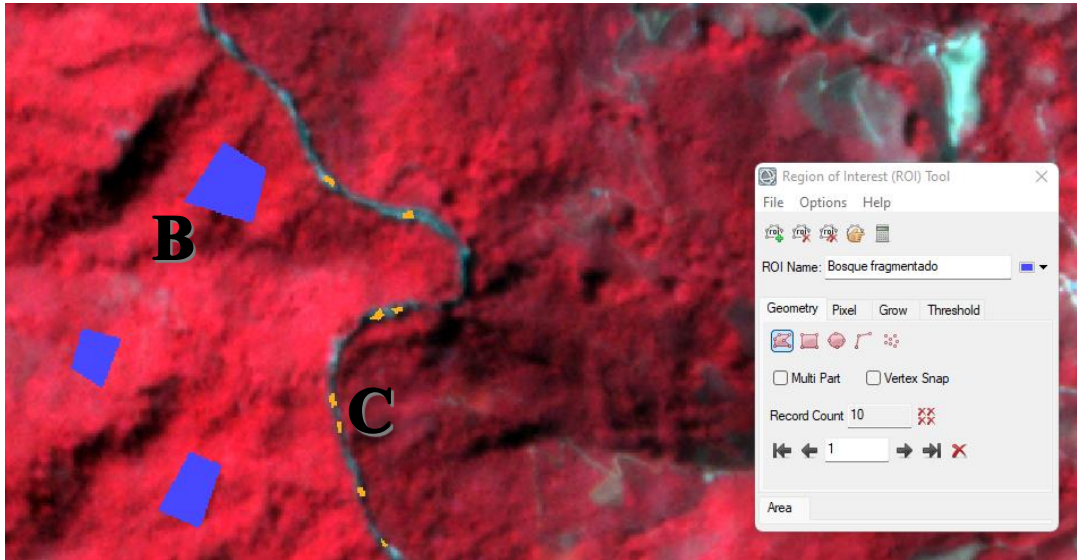
Luego de la detección visual de los tipos de coberturas presentes el territorio, se empleó el método de clasificación supervisada de coberturas en el software ENVI v.5.3. El algoritmo calcula la probabilidad de que cada pixel pertenezca a una de las clases utilizando las firmas espectrales de las regiones de interés (ROI). Se digitalizaron en promedio 200 polígonos de entrenamiento por cada clase sobre la imagen satelital Planet en falso color (Ver Figura 5). Esta combinación de bandas es favorable para la detección de cambios de coberturas vegetales por poseer una buena sensibilidad a la vegetación densa (tonos rojos intensos), vegetación menos desarrollada como pastos, cultivos arbustivos y arbóreos (tonos rosados y verdes fríos), agua (tonos azules oscuros) y zonas con escasa o nula vegetación (tonos cian y blanco). El Informe de Separabilidad de Regiones de Interés “ROI Separability Report” calculado por el software luego

de establecer las áreas de entrenamiento indica que los territorios artificializados y los suelos degradados presentan el menor índice de separabilidad espectral (índice de 1.4), debido a la similitud de tonalidades que presentan sobre la imagen en falso color. Por otro lado, el índice de separabilidad espectral entre el resto de clases es superior a 1.8, lo que valida la creación de las regiones de interés para ejecutar el algoritmo de clasificación.

### Figura 5

*Creación de ROI por clase (A) Territorios artificializados (B) Bosque fragmentado (C) Cuerpos de agua*

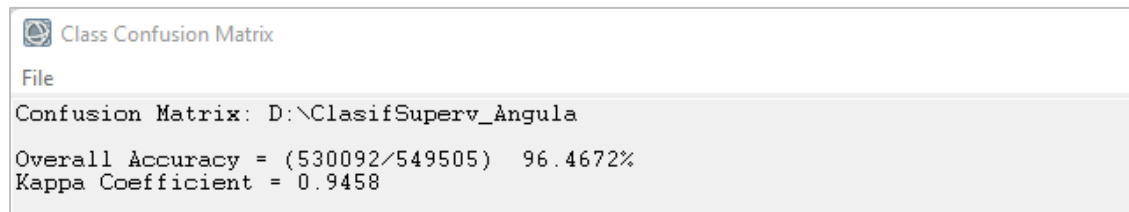




Finalmente se valida el resultado del índice Kappa como medida para determinar la exactitud de la clasificación supervisada, obteniendo un valor muy cercano a 1 (0.9458) lo que indica un alto grado de concordancia y aceptación del modelo (Ver Figura 6).

### Figura 6

*Índice Kappa obtenido en el método de clasificación en el software ENVI*



Tomando como base la clasificación propuesta en la Tabla 2, se asigna la siguiente ponderación a las coberturas de tierra presentes en la microcuenca (Tabla 4):

**Tabla 4**

*Ponderación coeficiente Kv en la microcuenca*

<b>Cobertura</b>	<b>Kv</b>
Terrenos artificializados, suelos desnudos y degradados y cuerpos de agua	0.09
Mosaico de pastos y cultivos	0.14
Bosque fragmentado	02.0

### 6.3.3 Fase III: Creación de un mapa de pendientes topográficas

Con base en el modelo digital de elevación (MDE) del área con resolución de 12.5 metros por pixel, se genera un mapa de pendientes topográficas en grados (°) usando la herramienta *Slope* de la caja de herramientas Spatial Analyst Tools en el Software ArcMap v.10.8.2.

En el documento oficial del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Río Alto Lebrija (POMCA Río Alto Lebrija), se plantea un modelo de clasificación de las pendientes del terreno en grados, así: (Ver Tabla 5)

**Tabla 5**

*Clasificación de pendientes en grados*

<b>Intervalo (%)</b>	<b>Intervalo(°)</b>	<b>Tipo de terreno</b>
0-3%	0.000-1.70°	Plano
3-7%	1.7°-4°	Ligeramente Plano
7-12%	4.00°-6.84°	Ligeramente inclinado
12-25%	6.84°-14.04°	Inclinado
25-50%	14.04°-26.46°	Ondulado
50-57%	26.56°-29.68°	Fuertemente ondulado
57-75%	29.68°-36.87°	Escarpado
75-100%	36.87°-45°	Fuertemente escarpado
Mayor a 100%	>45°	Extremadamente escarpado

Fuente: CDMB (2014).

Tomando como base la clasificación propuesta en la Tabla 2 y Tabla 5, se asigna la siguiente ponderación a las pendientes calculadas sobre la microcuenca (Tabla 6):

**Tabla 6**

*Ponderación coeficiente  $K_p$  en la microcuenca*

<b>Pendiente en (°)</b>	<b><math>K_p</math></b>
< 5°	0.30
5 – 10°	0.20
10.001 – 15°	0.15
15.001 – 20°	0.10
>20.001°	0..06

#### **6.3.4 Fase IV: Identificación de la tipología y textura de los suelos y las unidades litológicas existentes**

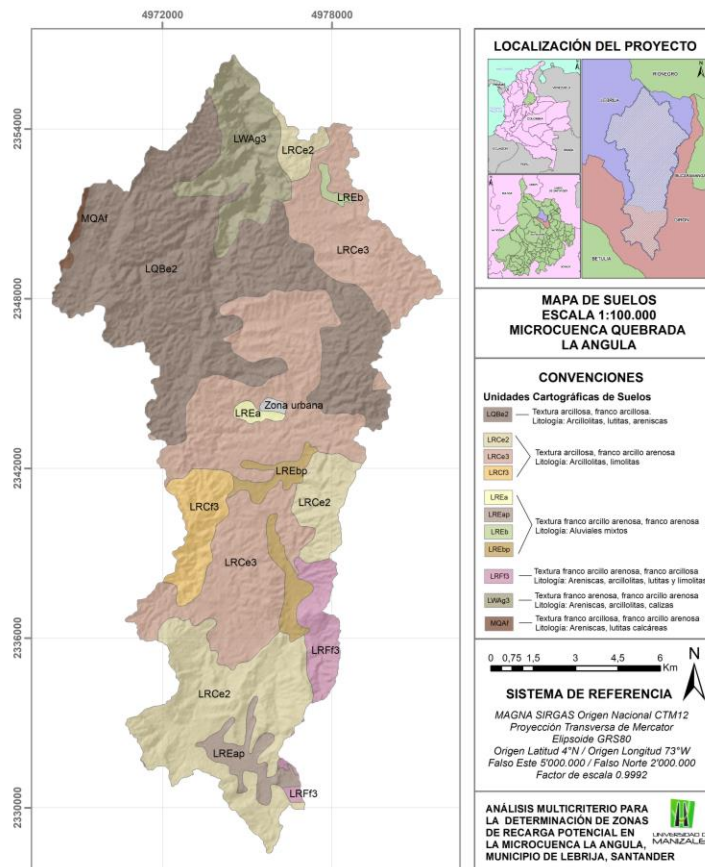
Se realizó la búsqueda de estudios edafológicos y geológicos del área en diferentes plataformas públicas, bases de datos, Geo-visores, etc, con el fin de consolidar un mapa de suelos de la microcuenca La Angula a partir información secundaria. A través de la plataforma *Colombia en Mapas* se obtuvo el mapa de suelos de Santander a escala 1:100.000 publicado en el año 2002 por la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. El mapa suministra información importante del recurso suelo describiendo características morfológicas y mineralógicas de los suelos, potenciales productivos, entre otros aspectos (Ver Figura 7) .

En adición, se realizó la descarga de las planchas geológicas 109-Rionegro y 120-Bucaramanga a escala 1:100.000 en la plataforma *Estado de la Cartografía Geológica* del Servicio Geológico Colombiano, con intención de identificar la distribución espacial de unidades

y estructuras geológicas en el área y establecer relaciones entre la textura de los suelos y los materiales geológicos parentales (Ver Figura 8).

**Figura 7**

*Mapa de suelos escala 1:100.000 Microcuenca La Angula*



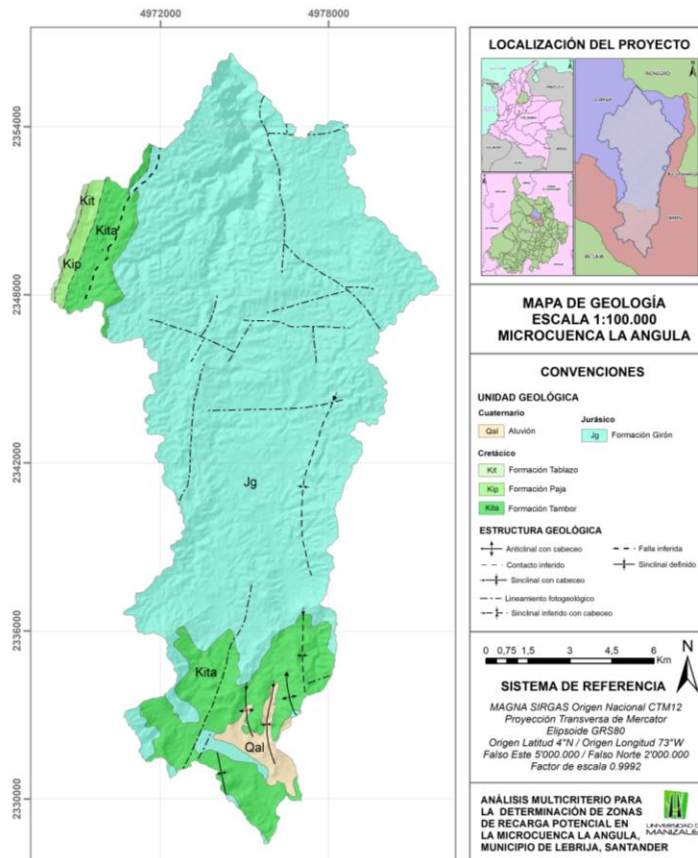
Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2002)

El área de estudio está constituida por rocas sedimentarias que datan edades desde el Jurásico hasta el Cretácico. La Formación Girón cubre aproximadamente 70% de la microcuenca, y se compone de areniscas conglomeráticas y limolitas. En la zona alta de la

microcuenca se identifican una serie de plegamientos (sinclinales y anticlinales) favorables para la generación de superficies de fractura y porosidad secundaria en las rocas existentes.

**Figura 8**

*Mapa geológico escala 1:100.000 Microcuenca La Angula*



Fuente: (INGEOMINAS, 1977)

Posteriormente, se realizó una solicitud de información en el centro de documentación ambiental de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, con el objetivo de acceder al documento y material cartográfico a escala 1:50.000 del

Estudio semidetallado de suelos de la subcuenca de la quebrada La Angula, elaborado por el Centro de Estudios para el Desarrollo Territorial de La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria en el año 1997. En esta investigación se detalla el patrón de distribución geográfica de los suelos, con subdivisiones de acuerdo su carácter textural, gradiente de la pendiente, grado de erosión, etc. El mapa en formato físico fue integrado al SIG por medio de herramientas de digitalización y georeferenciación al sistema de coordenadas establecido para el proyecto. Con este insumo, se generó el mapa de suelos para el área de estudio a escala 1:50.000.

Para la ponderación de Kfc en el mapa de suelos de la microcuenca, Schosinsky y Losilla (2000) en SGC (2016), definen valores de Kfc teóricos en función de múltiples pruebas de campo. Estos valores se reportan en la Tabla 7.

### **Tabla 7**

#### *Ponderación coeficiente Kfc en la microcuenca*

<b>Textura de suelo</b>	<b>Kfc</b>
Arcilla compacta impermeable	0.10
Suelo de textura fina	0.15
Combinación de limo y arcilla	0.20
Suelos con texturas finas a medias	0.25
Suelo de textura media	0.30
Suelo limo arenoso no muy compacto	0.40
Suelo con roca fractuada	0.50

Fuente: (SGC, 2016)

Los mapas de pendientes, coberturas terrestres y textura de suelos sin reclasificar y reclasificados de acuerdo a los parámetros establecidos en el modelo para el cálculo de recarga potencial del acuífero se muestran en la sección de resultados.

### 6.3.5 Fase V: Obtención y tratamiento de datos climatológicos

Para la definición de un número importante de variables requeridas en el modelo de recarga potencial es necesario contar con un análisis de precipitación total mensual y temperatura media mensual. Se realizó una búsqueda de información climatológica del área de influencia en diferentes plataformas públicas y documentos oficiales de interés como Planes de Ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas POMCA del Río Alto Lebrija y Planes de Ordenamiento Territorial del municipio de Lebrija.

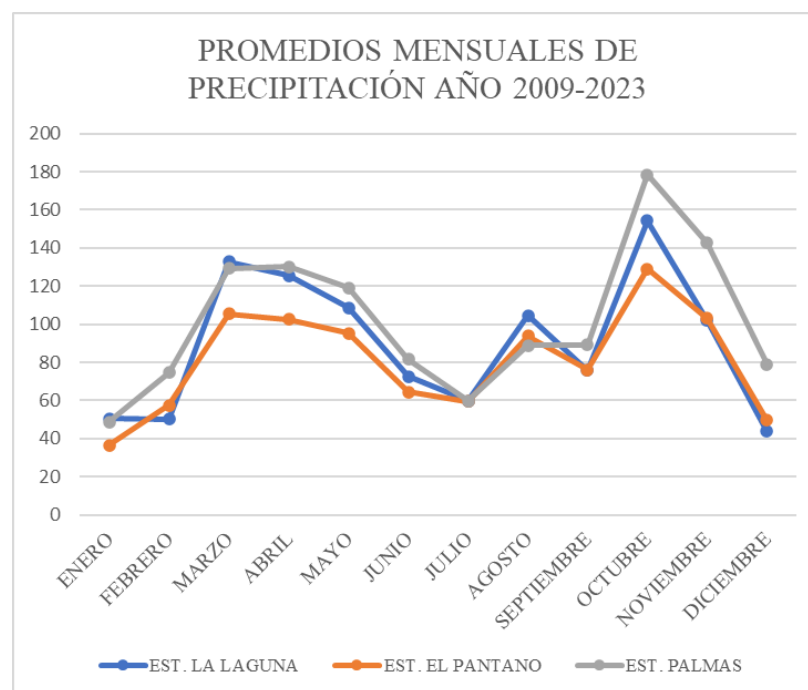
A través del Sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME) del IDEAM del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, se localizaron 3 estaciones de pluviométricas a saber: El Pantano [23190600] a una altura de 1280 m.s.n.m, Estación La Laguna [23190260] a una altura de 1150 m.s.n.m, y Palmas [23190380] a una altura de 855 m.s.n.m. Se obtuvieron los valores de precipitación total diaria por el periodo comprendido entre 2009 y 2023, completando la series de precipitación faltantes a través de un modelo regresión lineal simple entre estaciones cercanas interpretando la proporción de ajuste que ha alcanzado el modelo como una correlación fuerte, con  $R^2 > 0.5$ . Con la serie de datos completa, se calcula la precipitación total mensual de los 12 meses de cada uno de los años incluidos dentro del análisis y posteriore a esto, se calcula el valor promedio mensual de precipitación en el lapso de 14 años. La tendencia por cada estación es mostrada en la Figura 9.

Realizando un análisis general del comportamiento de la precipitación en la microcuenca, se precisa una tendencia bimodal, con periodos secos y húmedos diferenciables debido a la época del año. Los meses de octubre y noviembre son los más lluviosos en la microcuenca. El periodo húmedo vuelve a manifestarse, esta vez con menor intensidad, en los meses de marzo y abril.

Entre estos intervalos se presentan periodos secos, los picos máximos de precipitación en los meses de octubre y noviembre presentan una caída abrupta en los meses de diciembre, enero y febrero donde se reportan los valores más bajos de precipitación mensual.

### Figura 9

*Promedios mensuales de precipitación año 2009-2023 microcuenca La Angula*

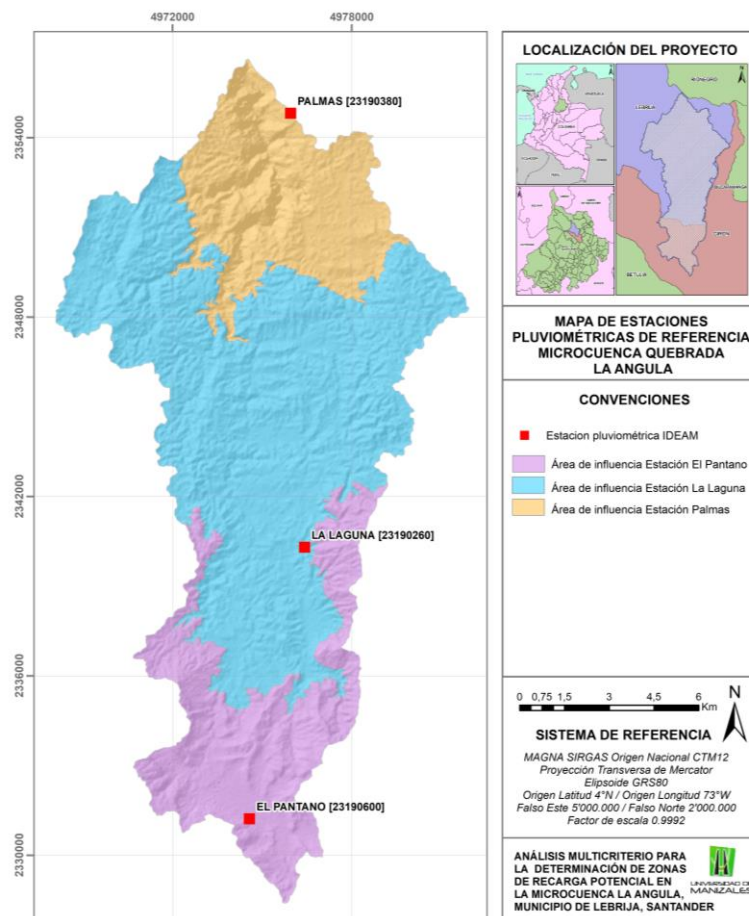


Con el objetivo de espacializar el área de influencia de cada estación pluviométrica y con ello asignar los datos de precipitación mensual necesarios para efectuar el análisis de recarga, se tiene en cuenta la altitud en sobre el nivel del mar de cada estación y las cotas de nivel en las que se localiza la microcuenca. Se realizó la construcción de curvas de nivel cada 20 metros por medio del tratamiento del modelo digital de elevación MDE en el software ArcMap (Herramienta Contour). Se precisa que la microcuenca presenta altitudes mínimas de 380 metros y máximas de 1560 metros. Bajo este rango, la zona alta de la microcuenca, con la influencia de

la Estación El Pantano, fue delimitada entre los 1180 y 1560 m.s.n.m. La zona media, con influencia de la Estación La Laguna, fue definida entre 1000 y 1160 m.s.n.m. Finalmente, la zona baja de la microcuenca, con la influencia de la Estación Palmas, fue delimitada entre 380 y 980 m.s.n.m. El resultado de la delimitación del área de influencia de las estaciones es mostrado en la Figura 10.

**Figura 10**

*Mapa de estaciones pluviométricas IDEAM*



Este insumo interviene en el cálculo de la retención mensual de la fracción de lluvia por efecto del follaje, la infiltración pluvial mensual y la evapotranspiración. Adicionalmente, para el cálculo de infiltración pluvial mensual se evaluaron tres escenarios climáticos diferentes: Año normal, año seco (Fenómeno del Niño) y año húmedo (Fenómeno de la Niña). A partir de la revisión histórica de la periodicidad de los eventos de La Niña y el Niño en Colombia entre los años 2009 y 2023 mediante reportes, noticias, informes de evaluación de la Unidad Nacional del Gestión del Riesgo, entre otras fuentes, fueron seleccionados los siguientes años para el análisis:

- Año Húmedo: Noviembre de 2010 a Octubre de 2011
- Año normal: Noviembre de 2013 a Octubre de 2014
- Año seco: Mayo de 2015 a Abril de 2016

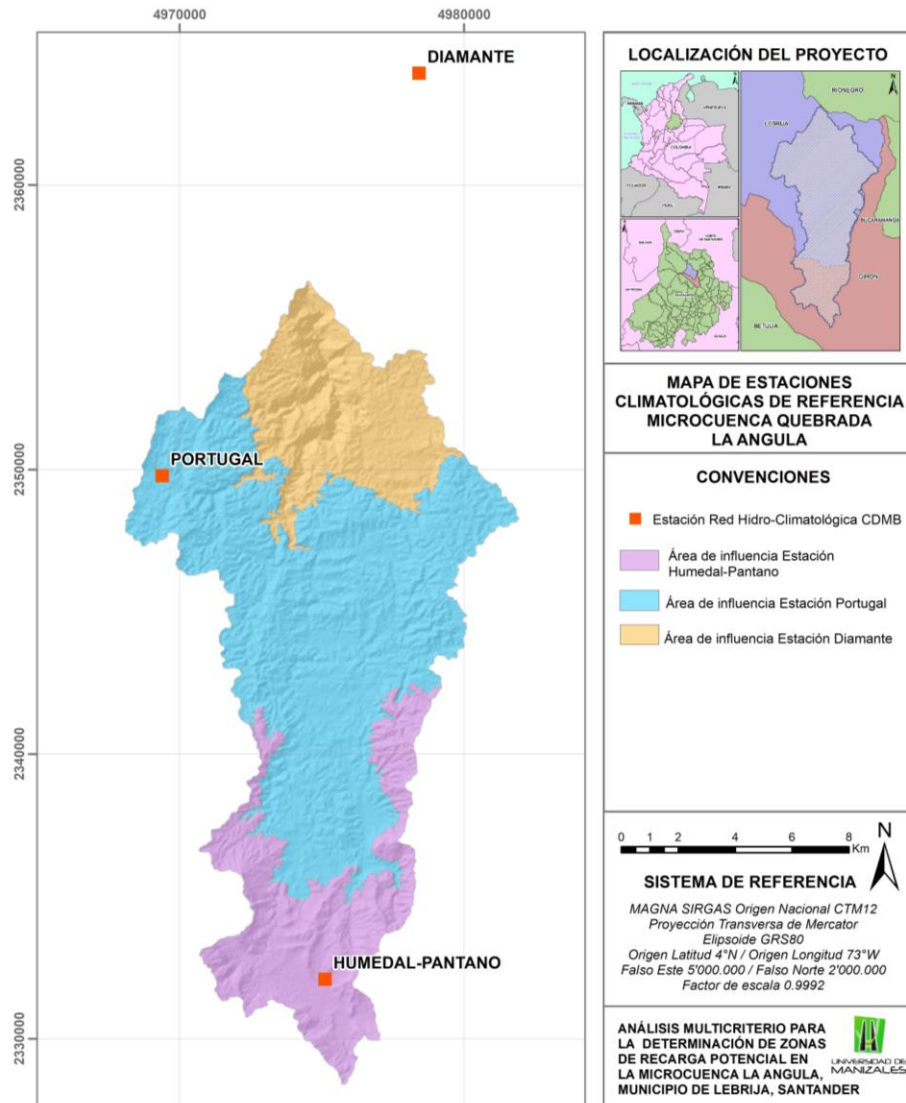
Con el fin de contrastar las diferencias en la estimación de la fracción de agua de precipitación que infiltra en condiciones hidrológicas normales, de extrema sequía y de extrema humedad, se evalúa el mes octubre de cada periodo, considerado como el mes más lluvioso de la zona.

La recarga potencial mensual se estimó en el escenario climático normal de la microcuenca. Para la definición de la variable evapotranspiración se empleó la información consignada en el repositorio de archivos de interés e informes periódicos de la red hidroclimatológica de la CDMB. Los informes de los años 2013 y 2014 recopilan los datos de temperatura promedio mensual en 3 estaciones de interés: Estación Humedal-Pantano, en la zona alta de la microcuenca a una altura de 1290 metros, Estación Portugal, sobre la zona media a una

altura de 1270 metros, y Estación Diamante, colinda con la zona baja de la microcuenca, y se ubica a una altura de 1054 metros. (Ver Figura 11).

**Figura 11**

*Mapa de estaciones climatológicas CDMB*

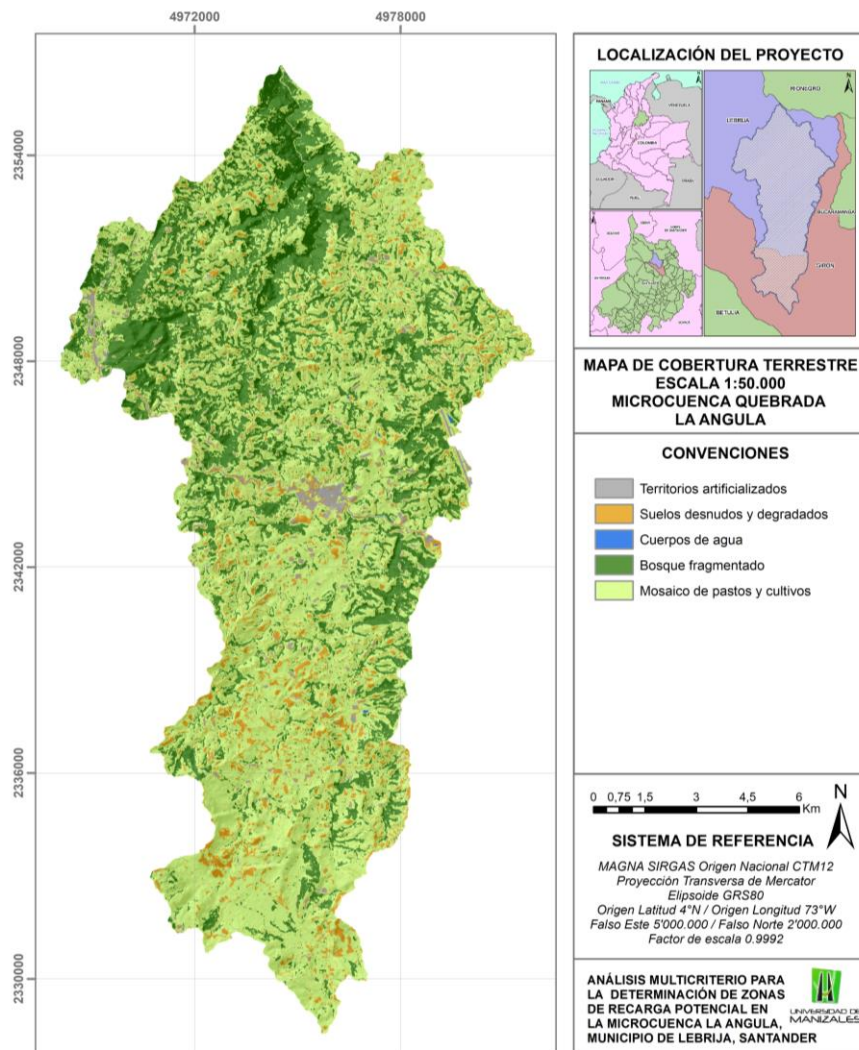


## 7. Resultados

A continuación se presentan los mapas obtenidos en el desarrollo de las diferentes fases metodológicas de la investigación y su análisis correspondiente.

**Figura 12**

*Mapa de cobertura terrestre microcuenca La Angula*

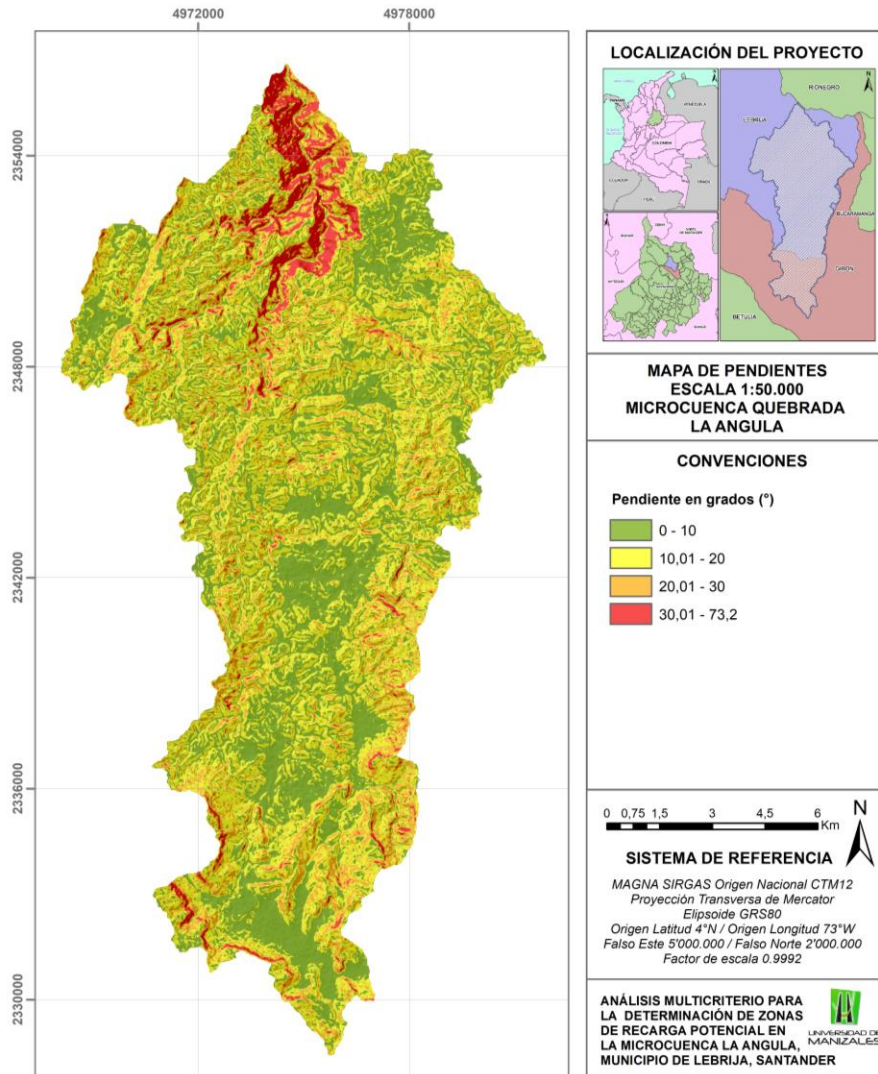


El mapa de coberturas de la tierra presentado en la Figura 12, señala un dominio de mosaicos de pastos y cultivos en la microcuenca, condición acorde al escenario actual del territorio según estudios recientes que afirman el reemplazo mayoritario de vegetación autóctona por adecuación e implementación de cultivos, principalmente frutales. Se identifican sectores en donde se conserva fragmentos de bosque, especialmente en la zona baja de la microcuenca. Asimismo, el caso urbano de Lebrija, la vía nacional Bucaramanga-Lebrija-Barrancabermeja, infraestructura avícola, entre otros territorios artificializados fueron delimitados correctamente en la clasificación supervisada. Por último, suelos degradados y altamente erosionados se distribuyen en pequeñas áreas sobre toda la cuenca y se asocian a la transformación del paisaje por la pérdida de vegetación a causa de intervención antrópica. Con base a los resultados de zonificación de coberturas de la tierra, se realiza la reclasificación del raster para asignar los valores definidos previamente en el cálculo de  $K_v$  o fracción de agua que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (Tabla 4). El mapa reclasificado es mostrado en la Figura 15.

La Figura 13 expone la variaciones del grado de pendiente de las laderas que conforman la microcuenca La Angula. De acuerdo a la clasificación de pendientes de la cuenca hidrográfica Río Alto Lebrija propuesta en la Tabla 5, el área de estudio presenta cierta homogeneidad en el relieve, con terrenos ligeramente inclinados a ondulados a excepción de la zona baja de la microcuenca que presenta geoformas con laderas fuertemente escarpadas y verticalizadas y pendientes hasta de  $73^\circ$ . Asimismo, se identifican laderas con pendientes escarpadas hacia los límites geográficos de la zona alta de la microcuenca. El mapa de pendientes es reclasificado de acuerdo a los índices definidos en la Tabla 6 para calcular la fracción de agua que infiltra por efecto de la pendiente  $K_p$  (Ver Figura 15).

**Figura 13**

*Mapa de pendientes microcuenca La Angula*

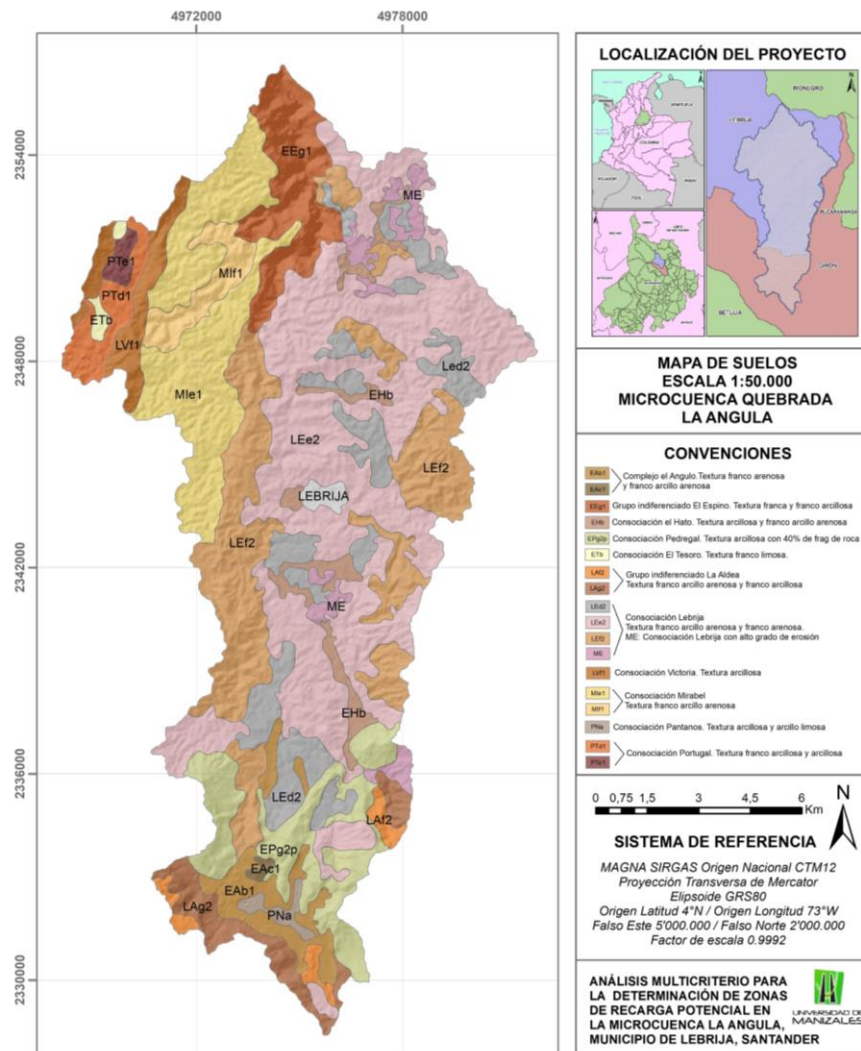


El mapa de zonificación de suelos en la microcuenca La Angula es mostrado en la Figura 14. Se relacionan 18 unidades cartográficas de suelos reunidas en 11 consociaciones o grupos. La unidad LEE2, perteneciente a la Consociación Lebrija abarca un área importante de la microcuenca y se define como suelos formados en relieve quebrado, sobre pendiente entre 25% y

50% y con erosión moderada. Los suelos Typic Troprothents, de textura franco arcillo arenosa y franco arenosa cubren el 80% de la unidad y provienen de areniscas de la Formación Girón, unidad geológica predominante en el área de estudio. Son suelos bien drenados y moderadamente profundos (CDMB, 1997)

**Figura 14**

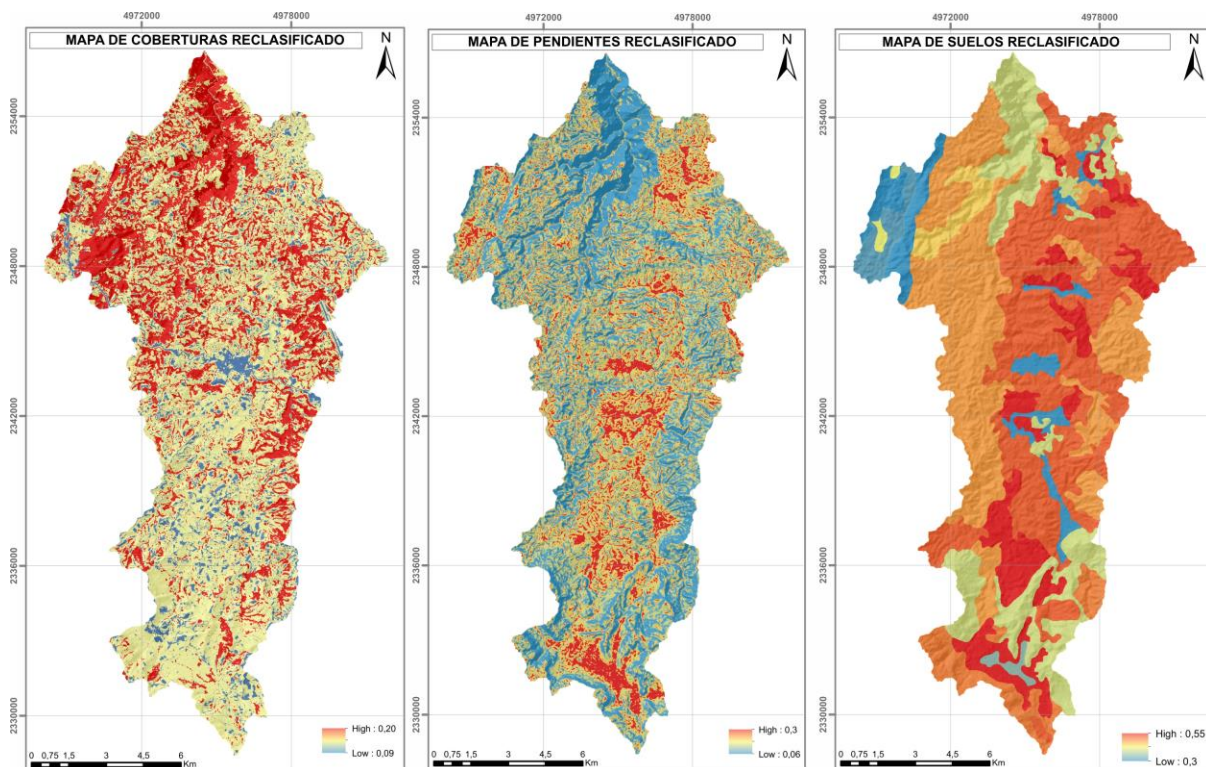
*Mapa de suelos microcuenca La Angula*



En términos generales, la distribución de suelos en la microcuenca es congruente con el contexto geológico del área, donde materiales parentales de origen sedimentario (areniscas, limolitas, lutitas, etc) originan perfiles de suelo con diferentes grados de erosión dispuestos sobre las pendientes. El mapa es reclasificado con los valores de  $K_{fc}$  teóricos definidos en la Tabla 7. Bajo esta clasificación, se delimita a fracción de agua que infiltra por la textura del suelo (Figura 15).

### Figura 15

*Insumos  $K_v$ ,  $K_p$  y  $K_{fc}$  reclasificados*

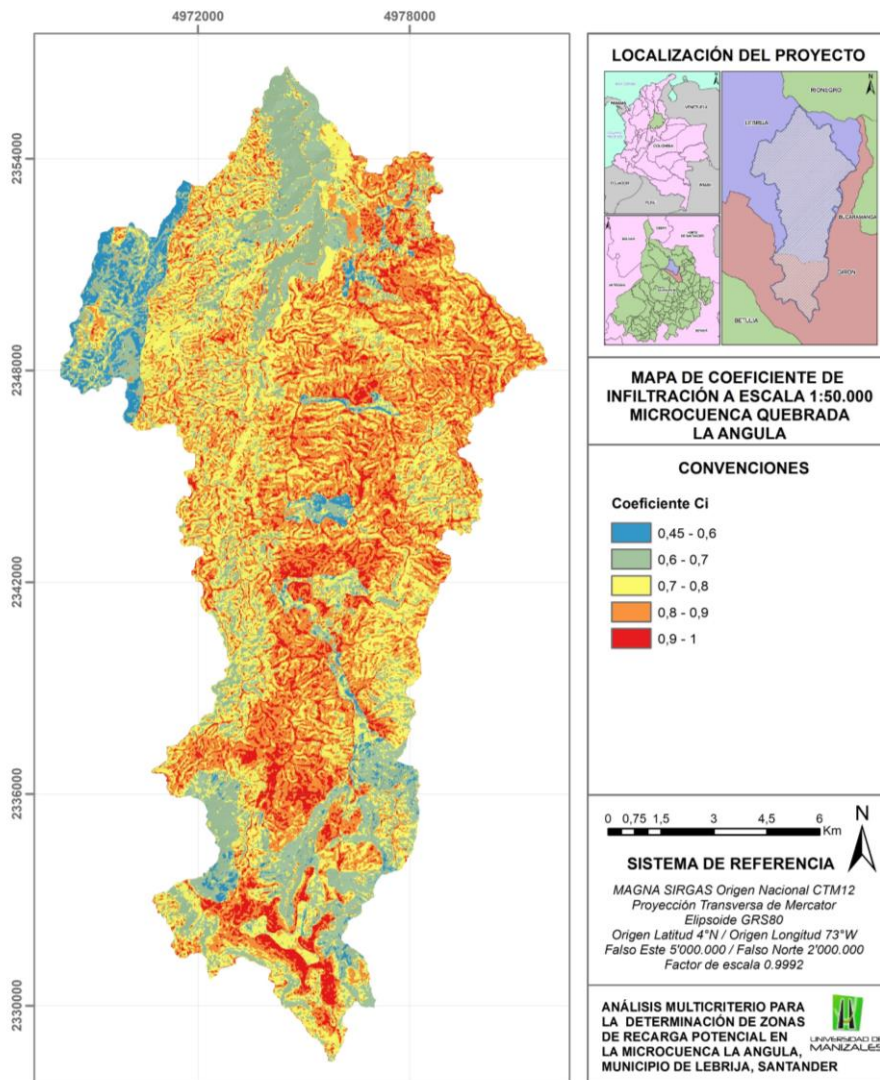


El mapa de coberturas reclasificado (índice  $K_v$ ) presenta una variación 0.09 a 0.20. Por su parte, el mapa de pendientes reclasificado (índice  $K_p$ ) propone una ponderación entre 0.06 y 0.3. Finalmente, el mapa de suelos reclasificado (índice  $K_{fc}$ ) varía en un rango de 0.3 a 0.55.

Por medio de la herramienta Raster Calculator alojada en la caja de herramientas Spatial Analyst Tools del software ArcMap 10.8.2, se realizó el álgebra de los mapas resultantes de índices  $K_v$ ,  $K_p$  y  $K_{fc}$  como se indica en la Ecuación 3, obteniendo un mapa de distribución del coeficiente de infiltración en la microcuenca (Figura 16) que varía en un rango de 0.45 a 1.

**Figura 16**

*Coefficiente de infiltración Microcuenca La Angula*



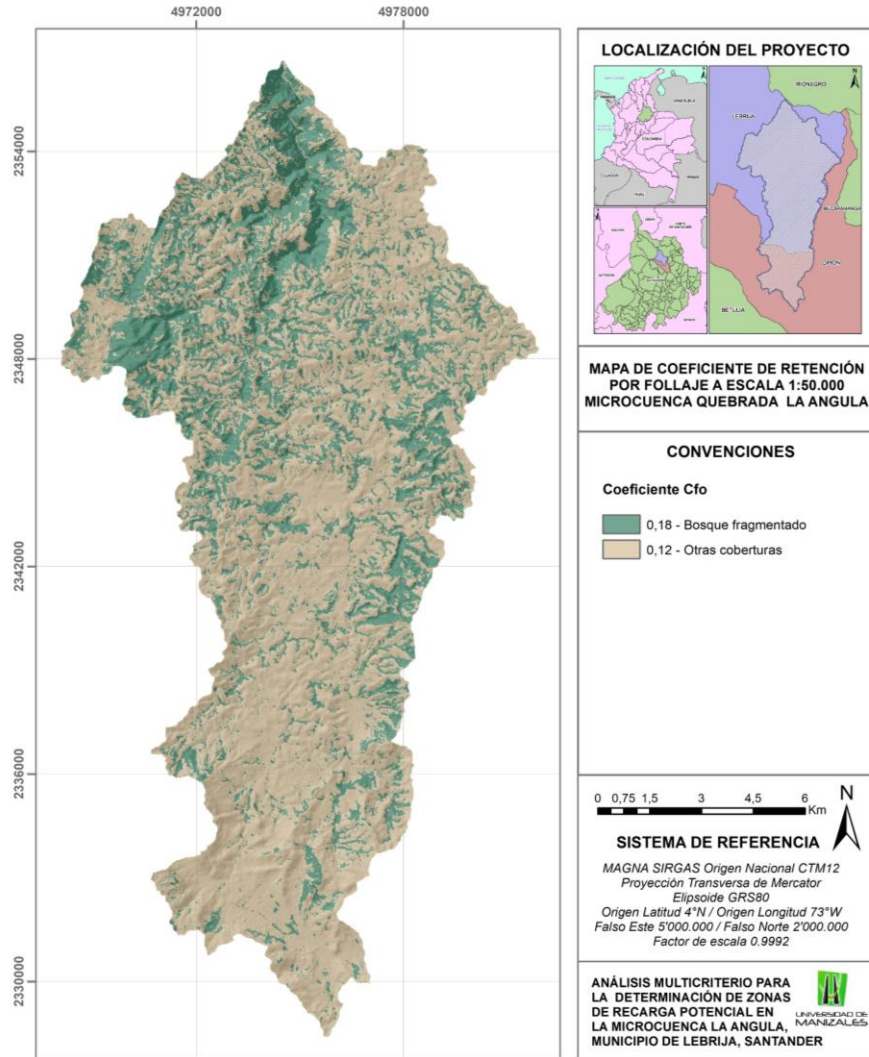
Valores mínimos de coeficiente de infiltración se presentan hacia el norte y noroccidente (zona baja de la microcuenca) en consecuencia al alto gradiente de las pendientes con laderas muy escarpadas, y texturas de suelo de carácter arcilloso y franco-arcilloso provenientes de la meteorización de rocas sedimentarias de grano fino a muy fino (lutitas y calizas). Por su parte, los valores máximos del coeficiente son asignados a aquellas zonas de la microcuenca que presentan un relieve plano a suavemente inclinado, suelos con texturas predominantemente arenosas o franco arenosas, y coberturas de pastos y vegetación densa, factores que potencializan la capacidad de infiltración de agua hacia el subsuelo.

La Figura 17 expone el mapa del coeficiente de retención por follaje, definido a partir de la reclasificación del mapa de coberturas terrestres, donde se asignó a las áreas con bosques fragmentados un coeficiente de 0.20 y al restante de coberturas clasificadas un valor de 0.12. Este coeficiente es el insumo para el cálculo de la retención mensual de lluvia interceptada por el follaje, descrita en la Ecuación 1.

Con el fin de analizar las variaciones de la máxima capacidad de infiltración que presenta el suelo en escenarios climáticos extremos de ocurrencia periódica, se determina la infiltración pluvial mensual en octubre de año húmedo (2011), año normal (2014) y año seco (2015), tomando como insumos los datos de precipitación de las estaciones de referencia en el periodo analizado, el mapa adimensional de coeficiente de infiltración y el cálculo mensual de la fracción de agua que retiene por follaje (Ver Figura 18).

**Figura 17**

*Coefficiente de retención por follaje Microcuenca La Angula*



Cabe destacar que octubre es el mes con mayor índice de lluvias en el territorio según lo reportado en el estado del arte y la estadística aplicada al conjunto de datos de precipitación obtenidos del IDEAM en el periodo 2009-2023. Este análisis permitió deducir la variación en el comportamiento de las entradas y salidas de agua al sistema en un mes que aportaría una fracción considerable de recarga al acuífero en condiciones climatológicas normales, cuando el territorio se ve impactado por fenómenos climáticos extremos que alteran la infiltración y

recarga potencial de los acuíferos. Los valores de precipitación utilizados para el análisis de los escenarios se muestran en la Tabla 8. La estación Palmas, ubicada hacia la zona baja de la microcuenca, reporta notables variaciones de lluvia mensual acorde al fenómeno climático presentado en cada año, con un aumento del 60% de lluvias del periodo seco al periodo normal; este mismo porcentaje de incremento se evidencia del periodo normal al periodo húmedo. Por su parte, las estaciones El Pantano y La Laguna indican una fuerte variación de la precipitación del periodo seco al periodo normal con un aumento aproximado del 90% de lluvia, mientras que la precipitación en el año húmedo aumentó 25% con respecto al año normal en la Estación La Laguna, y solo 1% en la Estación El Pantano.

**Tabla 8**

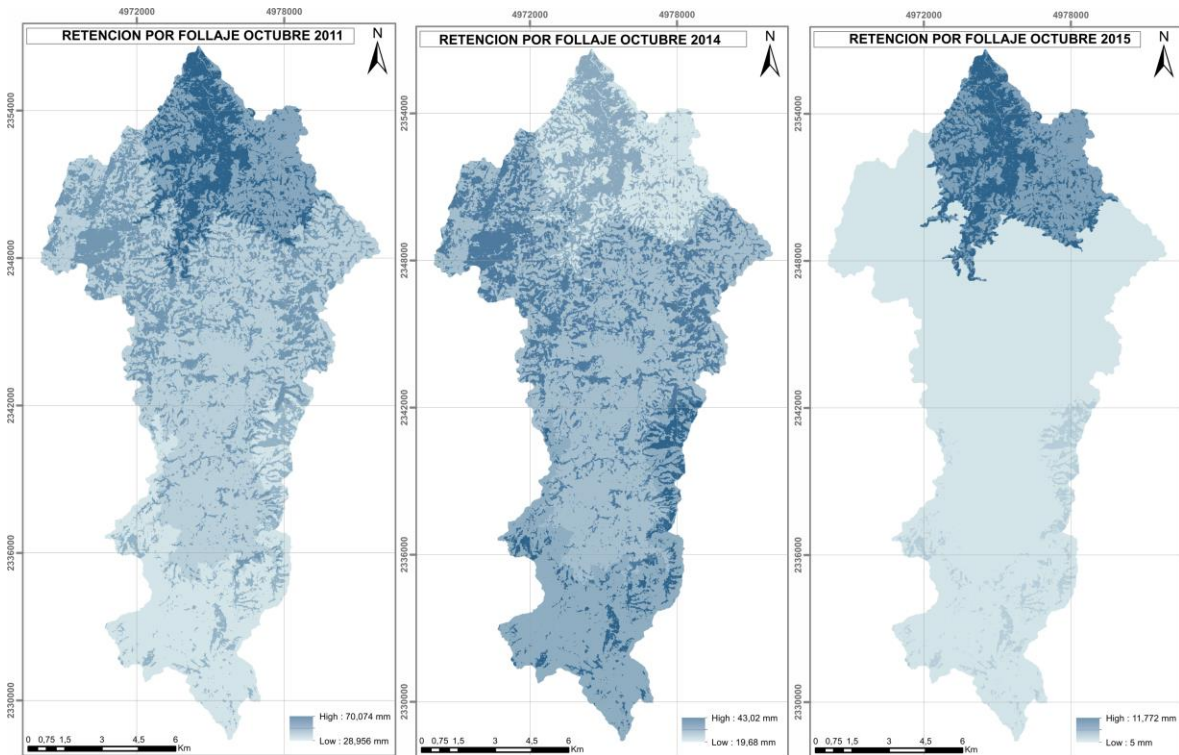
*Precipitación total mensual en los escenarios climáticos analizados*

<b>Periodo/Estación</b>	<b>Estación El Pantano</b>	<b>Estación La Laguna</b>	<b>Estación Palmas</b>
Octubre 2011 (húmedo)	241.3 mm	289.9 mm	389.3 mm
Octubre 2014 (normal)	239 mm	213.1 mm	164 mm
Octubre 2015 (seco)	33 mm	18.5 mm	65.4 mm

Los mapas de retención por follaje en mm son mostrados en la Figura 18. En octubre de 2011 (año húmedo), la retención por efecto del follaje presentó una variación de 29 mm a 70 mm. En octubre de 2014 (año normal), la fracción de pérdida por retención alcanzó valores desde 20 mm a 43 mm aproximadamente. En contraste, la retención por follaje en octubre de 2015 es mínima, con pérdidas en el orden de 5 mm a 12 mm, debido a los bajos valores de precipitación reportados en el mes (periodo seco).

**Figura 18**

*Retención por follaje en milímetros mes húmedo, mes normal y mes seco Microcuenca La Angula*

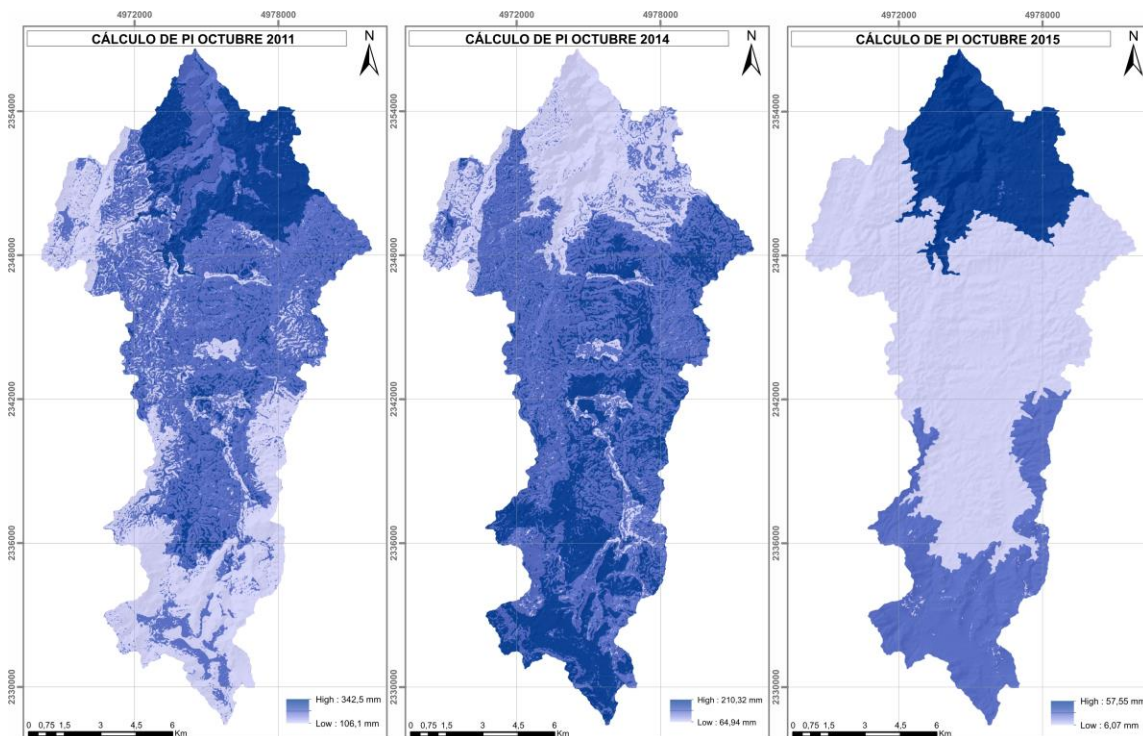


Los mapas de infiltración pluvial mensual en los 3 meses de referencia son mostrados en la Figura 19. Con este cálculo, se estima los valores de infiltración máximos que la microcuenca potencialmente puede recibir en un escenario óptimo (mes húmedo en año húmedo), en un escenario normal (mes húmedo en año normal), y en un escenario seco (mes húmedo en año seco). La infiltración en condiciones de extrema humedad a causa del fenómeno de la Niña en el año 2011, sin considerarse en ningún escenario la pérdida por evapotranspiración, alcanzó valores máximos de 342.5 mm. Bajo condiciones normales, en al año 2014, la capacidad máxima de infiltración es de 210 mm en un mes húmedo. En época del fenómeno del Niño (2015-2016),

cuando el país atravesó por periodos extensos de sequía, la microcuenca recibió en el mes de octubre de 2015 un bajo aporte de infiltración, en el orden de 57.55 mm. La sectorización heterogénea de infiltración pluvial en cada una de las área de influencia delimitadas por estación pluviométrica, sugiere que el efecto orográfico puede influir en la cantidad de lluvia que cae en una región específica.

### Figura 19

*Infiltración pluvial en milímetros mes húmedo, mes normal y mes seco Microcuenca La Angula*



A continuación se exponen los resultados del análisis de retención, infiltración, evapotranspiración real y recarga potencial mensual desde el mes de noviembre de 2013 hasta el mes de octubre de 2014 (año normal), realizando los cálculos teóricos de evapotranspiración real con los datos obtenidos de la red hidroclimatológica de la CDMB en los años 2013 y 2014.

La Tabla 9 consigna los valores de precipitación usados para el análisis anual. La estación Palmas, en la zona baja de la microcuenca, reporta una precipitación anual de 1075.3 mm/año, mientras que las estaciones El Pantano y La Laguna indican precipitaciones de 862.2 mm/año y 804.9 mm/año respectivamente.

**Tabla 9**

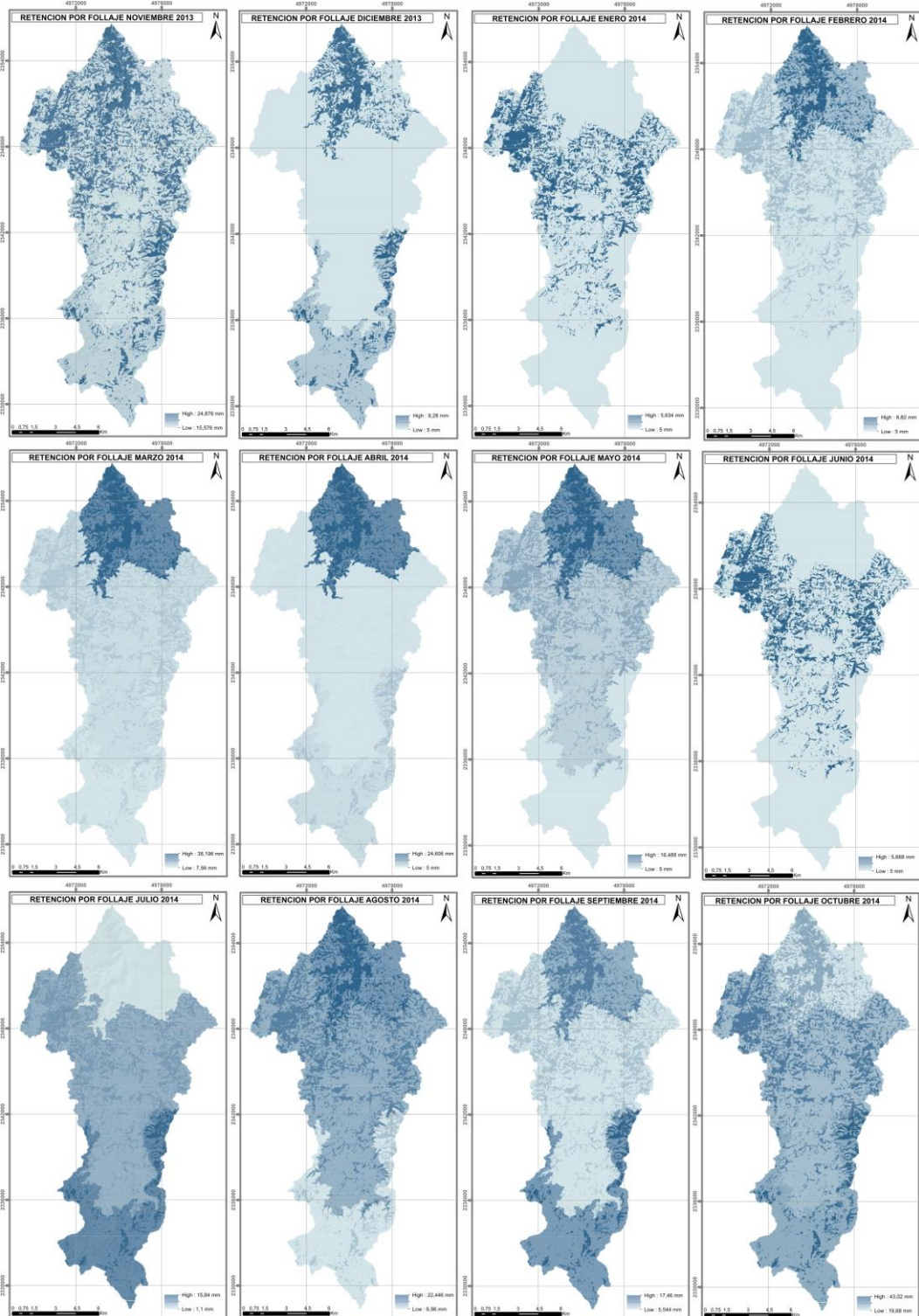
*Precipitación total mensual año normal*

<b>Mes/Estación</b>	<b>Estación El Pantano</b>	<b>Estación La Laguna</b>	<b>Estación Palmas</b>
Noviembre 2013	138.2	129.8	132.7
Diciembre 2013	46	8.5	41.7
Enero 2014	16	31.3	25.6
Febrero 2014	26	33.3	49
Marzo 2014	63	73.2	212.2
Abril 2014	50	31.4	136.7
Mayo 2014	19	53.6	91.6
Junio 2014	22	31.6	15.3
Julio 2014	88	50.8	1.1
Agosto 2014	58	102.1	124.7
Septiembre 2014	97	46.2	80.7
Octubre 2014	239	213.1	164
<b>Total anual</b>	862.2 mm	804.9 mm	1075.3 mm

La Figura 20 reúne los mapas de retención mensual calculados para todo el año. La Figura 21 agrupa los resultados de infiltración pluvial mensual en este mismo periodo.

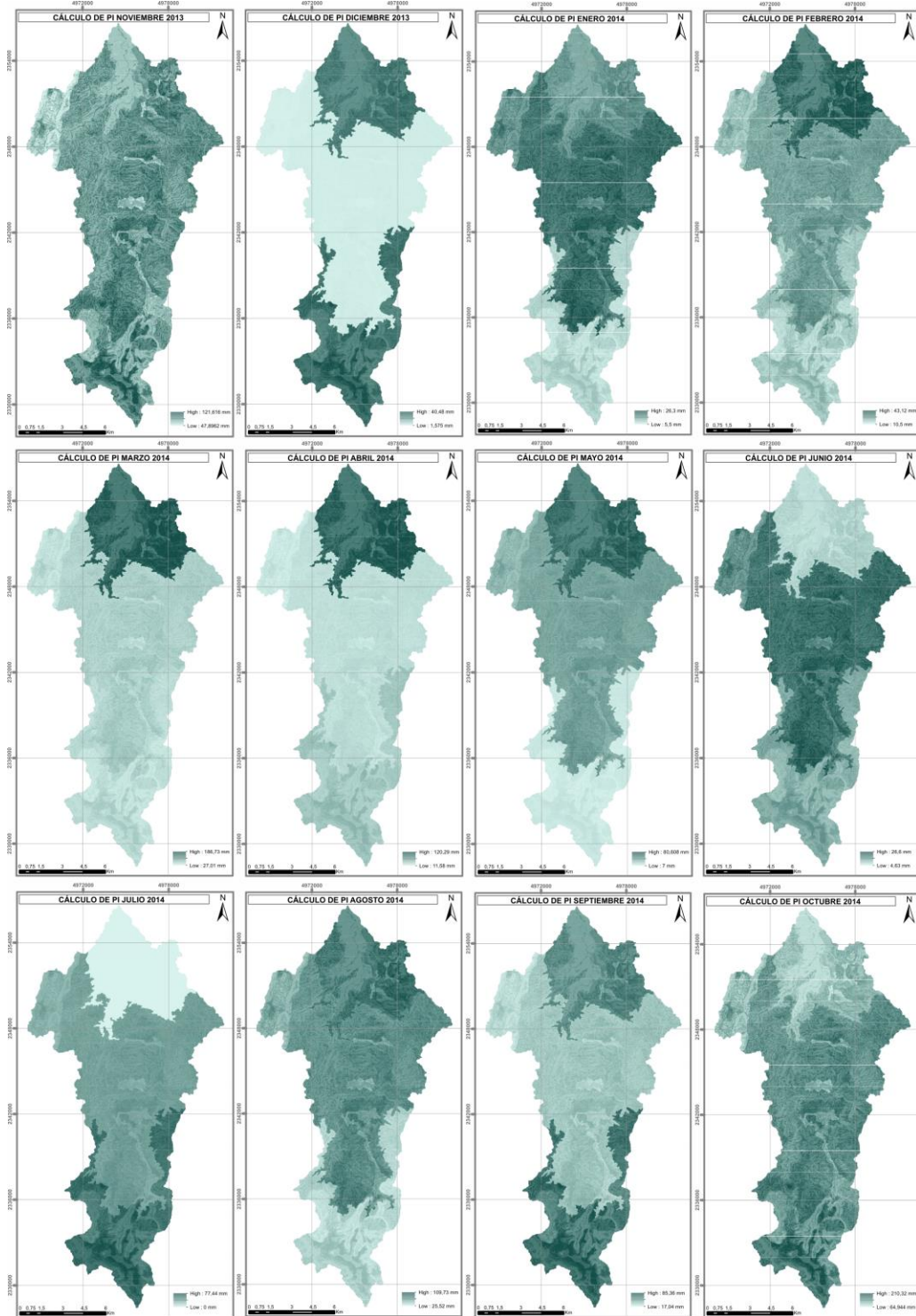
Figura 20

Retención mensual año normal Microcuenca La Angula



**Figura 21**

*Infiltración pluvial mensual año normal Microcuenca La Angula*



La pérdida por retención y la infiltración pluvial son variables que se encuentran íntimamente relacionadas con la precipitación reportada en cada mes. Octubre, noviembre, marzo y abril presentan los mayores índices de pérdida y potencial de infiltración, tanto en la zona alta como baja de la microcuenca.

La Tabla 10 consigna los valores de temperatura media mensual para el cálculo de la evapotranspiración potencial/mes (Tabla 11) y evapotranspiración real/mes (Tabla 12) en el periodo analizado, donde se emplearon las ecuaciones N°5 a la N°10, descritas en el capítulo 5 del documento.

**Tabla 10**

*Temperatura promedio mensual °C en estaciones de referencia microcuenca La Angula*

Mes / Estación	Estación Humedal- Pantano	Estación Portugal	Estación Diamante
Noviembre 2013	20.61	20.7	23.4
Diciembre 2013	20.65	21.1	23.1
Enero 2014	21.3	21.6	22.35
Febrero 2014	21.7	21.8	22.63
Marzo 2014	21.5	23.3	22.41
Abril 2014	22.1	22.2	22.85
Mayo 2014	21.5	21.6	22.16
Junio 2014	22	22.4	23.07
Julio 2014	22.5	23.1	23.74
Agosto 2014	21.4	21.9	22.62
Septiembre 2014	21.5	21.7	23.03
Octubre de 2014	20.8	22	22.72
<b>Promedio anual</b>	21.46	21.95	22.84

La temperatura media mensual en la microcuenca presenta una variación entre 21.46°C a 22.84°C dependiendo de la localización geográfica y la altitud. Julio presenta los mayores

valores de pérdida por evapotranspiración potencial debido a las horas de sol diarias definidas para este mes.

**Tabla 11**

*Evapotranspiración potencial coregida método Thornwaite*

Mes/Estación	Estación Humedal- Pantano	Estación Portugal	Estación Diamante
Noviembre 2013	71.76028917	71.18528311	94.1970707
Diciembre 2013	74.17951851	76.81202468	93.6016629
Enero 2014	80.27063964	81.76852382	85.9921984
Febrero 2014	76.47482061	76.21606108	81.0144175
Marzo 2014	84.21135921	101.2588933	88.8472237
Abril 2014	88.53566053	88.34485149	92.1308983
Mayo 2014	87.03014947	86.68165401	89.082385
Junio 2014	89.3761638	92.19575903	96.4902423
Julio 2014	97.09679498	102.4291633	107.282618
Agosto 2014	85.36194256	88.97955513	93.3998258
Septiembre 2014	81.83584644	82.44959688	92.9412782
Octubre 2014	77.1978432	86.84943714	91.5556362

La evapotranspiración real tiene en cuenta la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial calculada en la Tabla 11. En los resultados obtenidos para este parámetro, se identifica que en Julio de 2014 la estación Palmas no reporta dato de pérdida por evapotranspiración debido a que la precipitación medida este mes fue de 1.1 mm, por lo que automáticamente se asume que no existe entradas ni salidas de agua al sistema. Octubre fue el mes con mayor reporte de pérdida por evapotranspiración real en las 3 estaciones de referencia. Los datos calculados se ingresaron al software SIG asignándose a cada área de influencia.

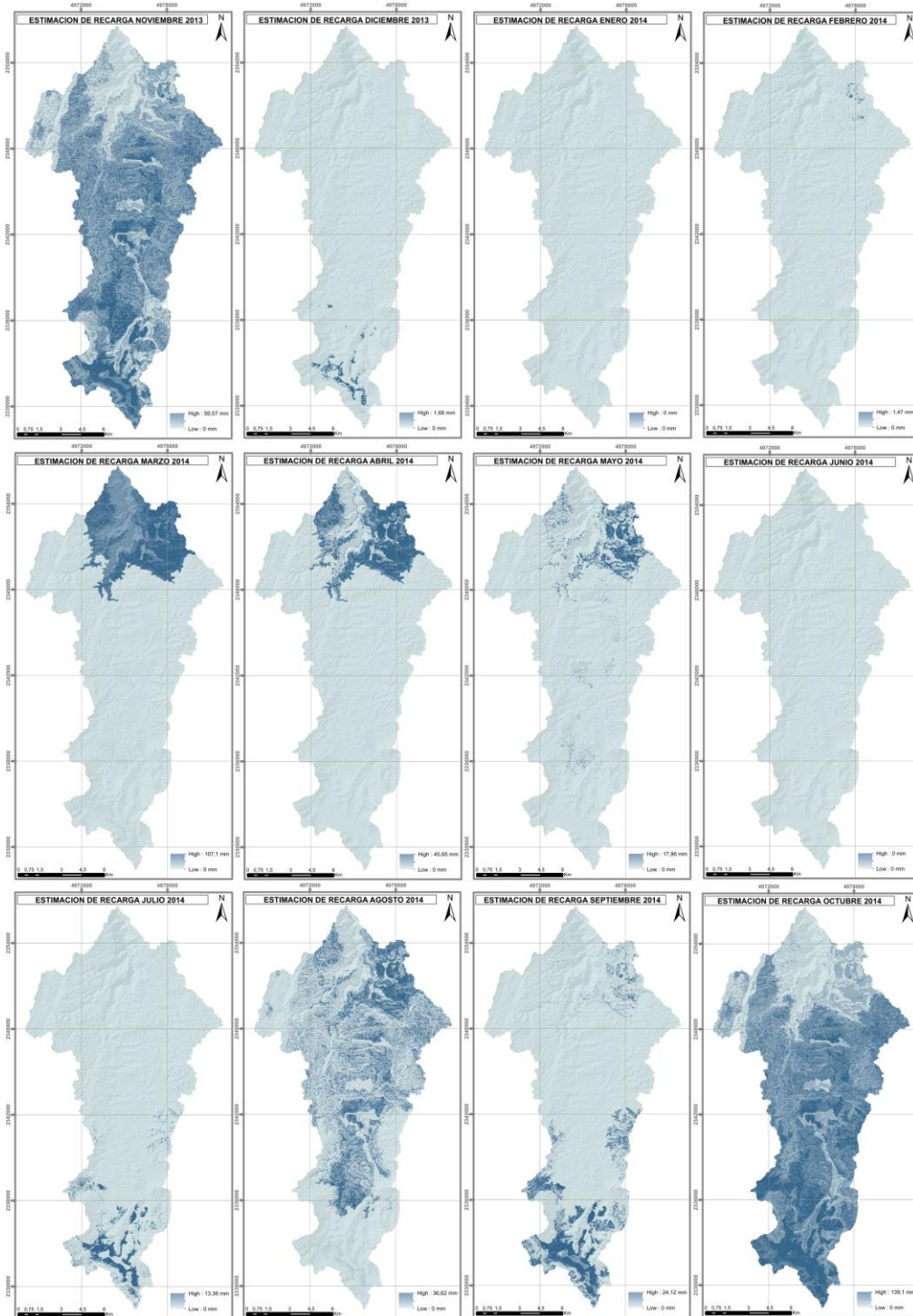
**Tabla 12***Evapotranspiración real calculada por el método Budyko*

<b>Mes/Estación</b>	<b>Estación el Pantano</b>	<b>Estación La Laguna</b>	<b>Estación Palmas</b>
Noviembre 2013	62.04605009	60.8462969	75.07998141
Diciembre 2013	38.80570277	8.482214506	38.20124246
Enero 2014	15.84262601	29.42678758	24.78964936
Febrero 2014	24.83404295	30.61937966	41.65175571
Marzo 2014	49.79968308	58.61755536	79.63611162
Abril 2014	43.34569137	29.82714441	74.63955336
Mayo 2014	18.75445672	45.25682146	62.63858943
Junio 2014	21.5938185	30.15368283	15.22248728
Julio 2014	64.08930236	45.49769482	0
Agosto 2014	47.48777413	65.70291891	73.107222
Septiembre 2014	61.24253593	40.13692758	59.94348906
Octubre 2014	71.21805336	78.12821594	77.94814471

Los mapas rasterizados de infiltración pluvial y evapotranspiración real sectorizada por el área de influencia de las estaciones fueron operados a través de la herramienta raster calculator en el SIG como se indica en la Ecuación 11. El resultado de este tratamiento es un mapa por cada mes que muestra la cantidad y distribución de recarga potencial en milímetros (Figura 22). Se identifica puntualmente en un año con condiciones climatológicas normales aquellos meses que no aportan recarga a los acuíferos existentes o el aporte es mínimo, estos son: diciembre, enero, febrero, mayo, junio y julio. En los meses restantes ingresa al acuífero fracciones agua superiores a 24 mm/mes hasta valores máximo de recarga de 139 mm/mes.

Figura 22

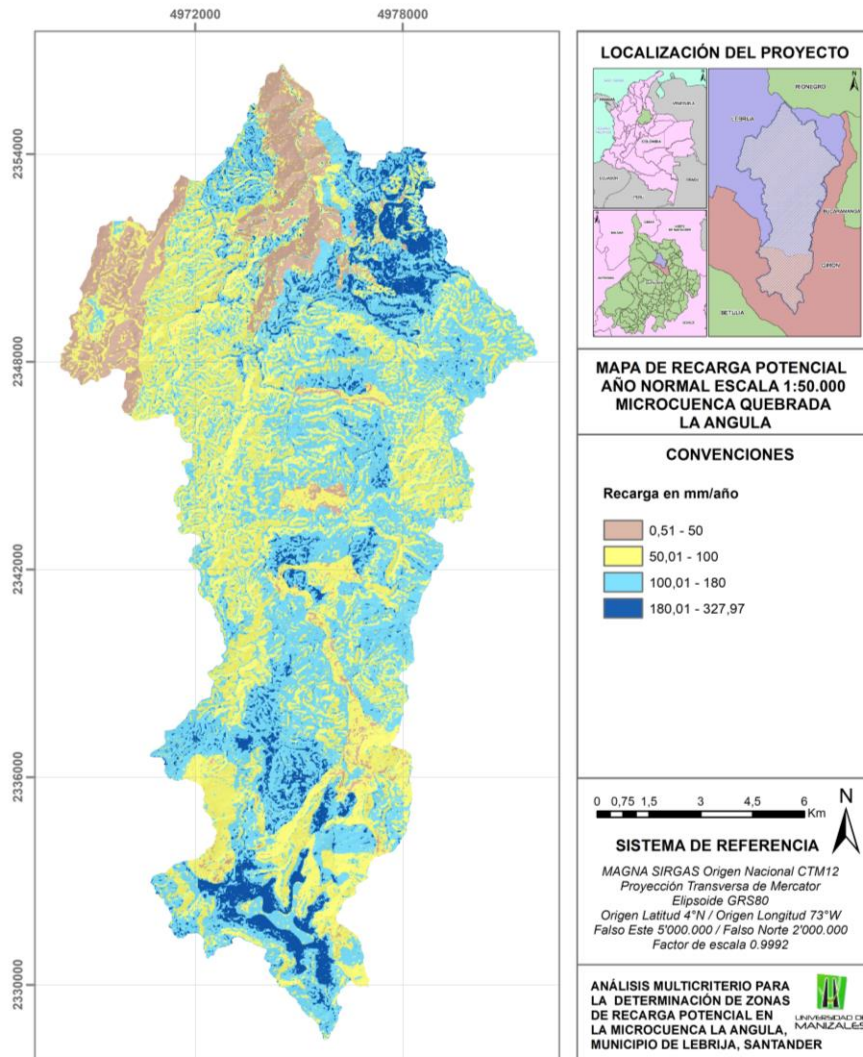
Recarga potencial mensual año normal Microcuenca La Angula



Finalmente, el alcance de la investigación se engloba en la sumatoria de todos los aportes mensuales de recarga en la microcuenca La Angula para determinar la recarga anual en un año normal y los sectores que, debido a su favorable capacidad de infiltración y óptimas condiciones de precipitación y temperatura, son potenciales para captar mayores volúmenes de recarga. El resultado final de zonificación de recarga potencial anual se expone en la Figura 23.

**Figura 23**

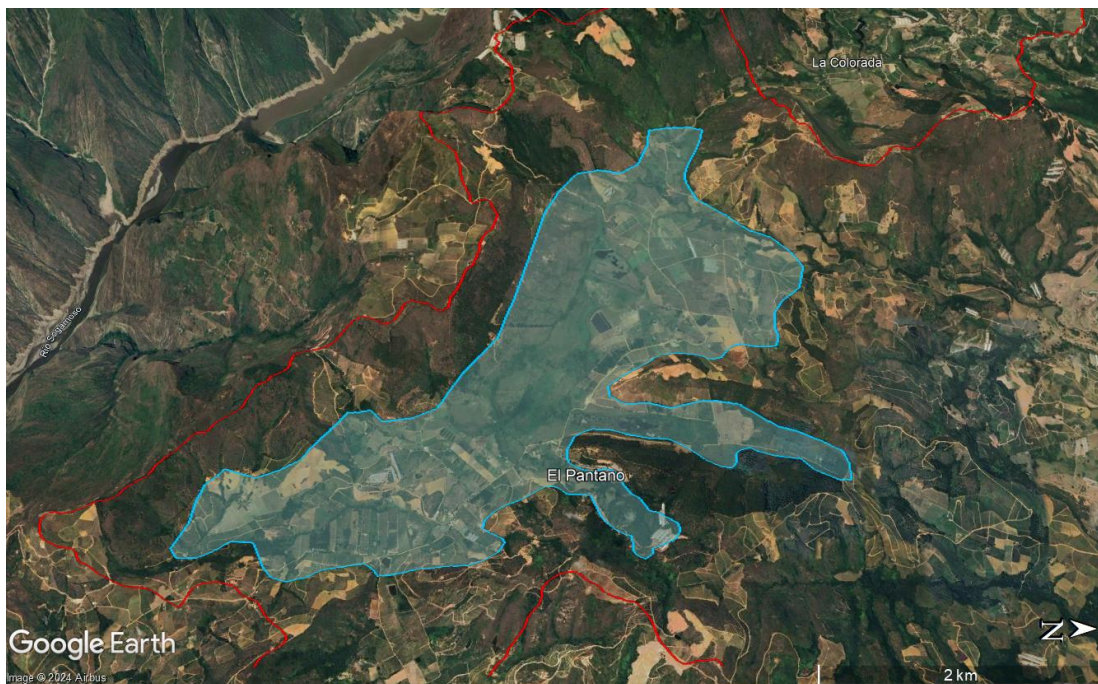
*Recarga potencial anual año normal (Nov 2013- Oct 2014)*



Del 100% del área de la microcuenca, en un 9% se estiman recargas inferiores a 50 mm/año, 40% del área recibe un aporte al acuífero entre 50 mm y 100 mm en el año, 44% del territorio obtiene una recarga entre 100 mm/año a 180 mm/año y finalmente, los sectores de mayor interés donde se estiman recargas entre 180 mm/año a 327 mm/año abarcan el 7% de la microcuenca. Con estos resultados, se realiza una delimitación de dos áreas de alta importancia; la primera, ubicada en la zona alta de la microcuenca, en la vereda El Pantano de Lebrija con un área aproximada de 710 hectáreas (Figura 24), la segunda, ubicada en inmediaciones de las veredas San Cayetano, La Aguirre, El Oso, El Santero y el Progreso de Lebrija, sobre la parte baja de la microcuenca, con un área estimada de 1528 hectáreas (Figura 25).

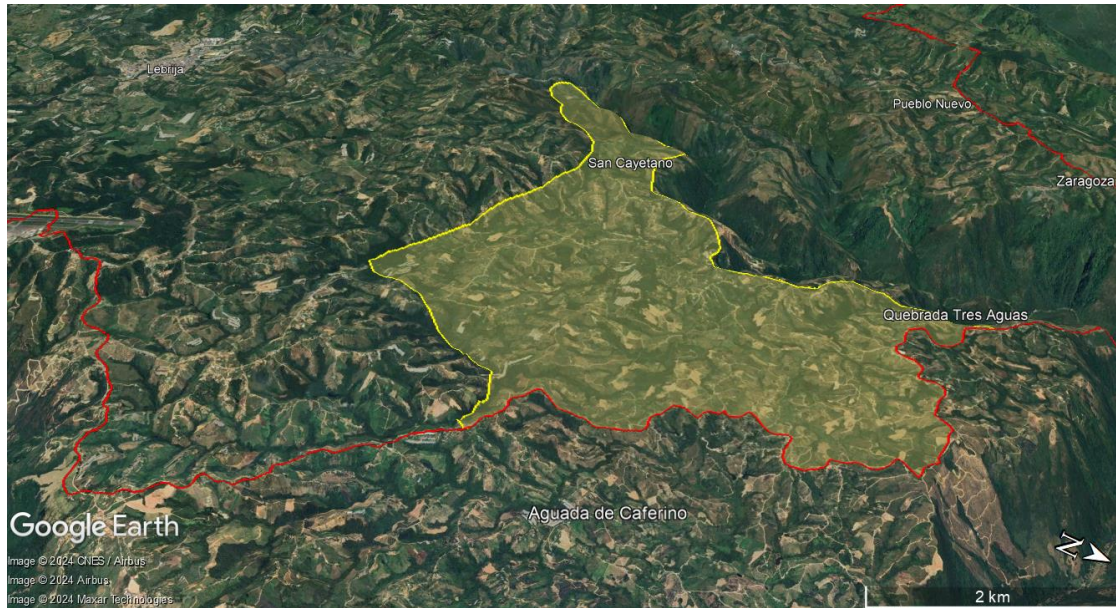
#### **Figura 24**

*Área de importancia alta por fenómenos de recarga potencial vereda El Pantano, Lebrija, Santander*



**Figura 25**

*Área de importancia alta por fenómenos de recarga potencial vereda San Cayetano y otras, Lebrija, Santander*



## 8. Discusión

Para el cálculo del coeficiente de infiltración en la microcuenca La Angula, se evaluaron tres variables: La primera, la fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal, considerándose los territorios artificializados como sectores impermeables y zonas que conservan vegetación autóctona densa como favorables para el fenómeno de infiltración. Segundo, la fracción que infiltra por efecto de la pendiente, siendo propicio las zonas con pendientes planas a suavemente inclinadas, a diferencia de relieves abruptos que ocasionan un movimiento rápido del agua por efecto de la escorrentía. Tercero, la fracción que infiltra por la tipología de suelo, teniendo en cuenta que la condición textural del suelo impacta significativamente la cantidad de recarga que logra infiltrarse. El alcance del estudio no involucra la evaluación de la capacidad de atenuación de la zona no saturada ni la delimitación de las unidades hidrogeológicas puesto que para llevar a cabo estos requerimientos se deben adelantar trabajos de campo que permitan la cartografía detallada de las rocas que constituyen la microcuenca y la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas. De acuerdo al contexto geológico regional y local del área, analizado por medio de información secundaria, se infiere la posible existencia de acuíferos fracturados con porosidad secundaria; por lo que el cálculo del coeficiente de infiltración y el estimado de recarga en un año con condiciones meteorológicas normales se convierte en un primer modelo teórico de balance de suelos. Para refinar este modelo, se requiere la obtención de datos primarios in situ de la velocidad de infiltración de los suelos, la aplicación métodos geofísicos para determinar la tendencia del fracturamiento de las rocas y la recopilación de un volumen de datos de precipitación y temperatura con una distribución espacio-temporal favorable; como es explicado en el capítulo de recomendaciones.

## 9. Conclusiones

El mapa de coberturas de la tierra en la microcuenca La Angula construido a través del método de clasificación supervisada de una imagen satelital del año 2023 con resolución de 3 metros demuestra un dominio de mosaicos de pastos y cultivos distribuidos espacialmente en aproximadamente 60% del área total de estudio, con más de 11.000 hectáreas clasificadas bajo esta cobertura, seguido de zonas de bosques fragmentados en un área de aproximadamente 5.500 hectáreas (30%). El 10% del área restante se distribuye en territorios artificializados, suelos desnudos y degradados por influencia antrópica y cuerpos de agua. Lo anterior corrobora la transformación prolongada de zonas con vegetación autoctóna densa que han sido adecuadas como áreas de cultivos en la microcuenca.

El mapa de pendientes generado a través del procesamiento de un modelo digital de elevación con resolución 12.5 metros, indica un relieve dominante de laderas ligeramente inclinadas a onduladas, con pendientes menores a 20°. En contraste, se identifican y delimitan para el análisis de recarga aquellas zonas de la microcuenca que presentan laderas escarpadas a muy escarpadas, condición que no favorece la capacidad de infiltración de agua hacia el subsuelo.

El mapa de distribución de suelos consolidado por medio de la adaptación y comparación de información secundaria sobre edafología y geología en el territorio demuestra la relación entre el carácter del suelo y los materiales parentales rocosos pues se identifica un dominio de texturas franco arenosas y franco arcillo arenosas, provenientes de la meteorización de rocas sedimentarias areniscas y limolitas.

Los datos de precipitación y temperatura obtenidos de las bases de datos del IDEAM y la CDMB fueron insumos fundamentales para los análisis de retención por follaje, infiltración pluvial mensual y evapotranspiración real en diferentes escenarios climáticos evaluados en el periodo 2009 – 2023. Se determina que existe un comportamiento bimodal de la precipitación en la microcuenca, el periodo de mayor sequía se contempla en los meses de diciembre, enero, y febrero y los meses más húmedos corresponden a octubre, noviembre y abril. Adicionalmente se sugiere que el efecto orográfico puede influir en la cantidad de lluvia que cae en una región específica, debido a las diferencias en los valores totales mensuales de precipitación reportados en las estaciones de referencia.

La recarga potencial anual fue calculada para un año de muestra (noviembre de 2013 a octubre de 2014) con condiciones climatológicas normales para evitar la sobrestimación o subestimación de la fracción que recarga a los acuíferos existentes. Los resultados obtenidos zonifican sectores con recarga potencial que alcanzan valores de 327 mm/año; el uso actual de estas áreas de interés hidrogeológico es predominantemente agrícola, por lo que se debe evaluar el manejo y preservación de las mismas.

## 10. Recomendaciones

El desarrollo de la investigación tuvo como guía los estudios realizados por Schosinsky y Losilla (2000) y Schosinsky (2006) así como un número importante de antecedentes de este mismo método aplicado a zonas de Latinoamérica con condiciones topográficas, geológicas y climáticas similares a las existentes en la microcuenca en estudio. El alcance del proyecto no contempló la obtención de información primaria por medio de jornadas de campo, pues se realizó una búsqueda y tratamiento exhaustivo de información secundaria obteniendo resultados muy coherentes con el contexto que se tiene del territorio. Bajo estos términos, es recomendable trabajar en pro a una continua mejora de los análisis multicriterio obteniendo información primaria precisa y reciente, pues esto contribuye a refinar los modelos y estimar con mayor exactitud los valores de recarga y la delimitación de zonas de interés hidrogeológico en la microcuenca. Así mismo, la deficiencia en la continuidad de los datos climatológicos del área debido a estaciones retiradas e inactivas, zonas sin cubrimiento de estaciones de medición como fue del caso del análisis de temperatura en la zona baja de la microcuenca donde se empleó la estación el Diamante ubicada aproximadamente a 9 km del límite de la zona baja de la microcuenca, son condiciones que suponen un rango de error en los cálculos desarrollados. Por esta razón, los municipios deben articular esfuerzos para fortalecer el conocimiento de estas temáticas de interés ambiental y de conservación en sus territorios por medio de instalación de herramientas y monitoreo de los diferentes componentes que rigen el territorio.

Finalmente, se recomienda evaluar el estado actual de las zonas de interés hidrogeológico definidas en esta investigación como insumos piloto para análisis más detallados que contemplen la protección vitalicia de estas zonas de importancia ambiental alta.



## 11. Referencias

Aldana, H.; Ortiz, G.; Ortiz, E.; Montenegro, R.; Colorado, J. (1997). Estudio semidetallado de suelos de la subcuenca de la quebrada La Angula. Centro de Estudios para el Desarrollo Territorial Corpoica. Libro y anexos obtenidos en el Centro de documentación de la CDMB.

Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes y Smith (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines por computing crop water requeriments – FAO Irrigation and drainage paper 56. Disponible en Internet en español: <ftp://ftp.fao.org/aglw/docs/idp56s.pdf>

Alvarado-Batres, C.A. (2020). Análisis de la recarga potencial del acuífero superficial en Isla de Méndez, Jiquilisco, Usulután. Revista Minerva, 3(2), 46–59.  
<https://revistas.ues.edu.sv/index.php/minerva/article/view/2506>

Balamurugan, G.; Seshan, K.; Bera, S. (2017). Frequency ratio model for groundwater potential mapping and its sustainable management in cold desert, India. Journal of King Saud University, 29(3), 333-347. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.08.003>

Batelaan, O.; De Smedt.; F. (2007). Gis-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. Journal of Hidrology, 337(3), 337-355.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.001>

- Bohórquez, D. (2019). Revisión de Información Geofísica del Archivo de Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga C.D.M.B., como aporte al conocimiento hidrogeológico del municipio de Lebrija, Santander. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Budyko, M. (1958). The heat balance of the earth's surface. Translate from russian by N.A Stepanova, U.S Department of Commerce., Washington D.C, 259 pp.
- Camargo, E.; León, A. (2008). Formulación de los términos de referencia para la implementación de los programas para el uso eficiente del agua en el área de drenaje de la quebrada la angula en el municipio de Lebrija. Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
- Centro de estudios regionales (2010). Plan de Ordenamiento Territorial de San Juan de Girón 2000-2009. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Corporación Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB (2014). Actualización POMCA Río Alto Lebrija. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica. Informe final.
- Dar, I.A.; Sankar, K.; Dar, M.A. (2010). Remote sensing technology and geographic information system modeling: an integrated approach towards the mapping of groundwater potential

- zones in hardrock terrain, Mamundiyyar basin. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), 285–295.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.022>.
- Garzón, Y.; Salcedo, H. (2022). Estimación de la Recarga Potencial Mensual en La Mesa de Los Santos (Santander). Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Ghorbani, S.; Falah, F.; Daneshfar, M., Haghizadeh, A.; Rahmati, O. (2017) Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models. *Geocarto International*, 32(2), 167-187. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1132481>
- IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p
- Iguarán-Hernández, H. (2022). Modelo de recarga potencial del sistema acuífero de Santa Marta y sus alrededores. Tesis de pregrado, Universidad del Magdalena, Colombia.
- Maghribi, A.; Dimiyati, M.; Supriatna, S. (2022). Geographic information system and multi-criteria decision analysis for the determination of groundwater recharge potential: systematic review. *Water Supply*, 22(9). [10.2166/ws.2022.297](https://doi.org/10.2166/ws.2022.297)
- Matus, O.; Faustino, J.; Jiménez, F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica : Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa,

- Nicaragua. Serie técnica. Boletín técnico No. 38. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo, Costa Rica.
- Moeck, C.; Grech-Cumbo, N.; Podgorski, J.; Bretzler, A. Gurdak, J.; Berg, M.; Schirmer, M. (2020). A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates: A review of variables, processes and relationships. *Science of the Total Environment*, 717(137042). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137042>
- Pérez-Pardo, Y. (2021). Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la identificación del potencial de recarga hídrica de la microcuenca Río Botello. Tesis de Especialización, Universidad Antonio Nariño, Colombia.
- Perdomo, V.; Rojas, C. (2017). Modelo hidrogeológico conceptual a partir de información secundaria, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá. Tesis de Especialización, Universidad Católica de Colombia, Colombia.
- Ramirez-Granados, P. (2013). Determinación de la recarga acuífera potencial mediante un sistema de información geográfica para la cuenca del río Frío, Costa Rica. *Revista Geográfica De América Central*, 2(51), 15-35.
- Sallwey, J.; Bonilla, J.; Vásquez, F.; Junghanns, R.; Stefan, C. (2019). Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies. *Environmental Reviews*, 27(2), 138-150. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0069>

Sánchez-Farfán, P.A. (2018). Estimación de la recarga potencial en una cuenca andina de alta montaña. Tesis de maestría, Universidad de Chile, Chile.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151849>

Schosinsky, G., y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, (23), 43–55.

<https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>.

Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, (34-35), 13-30.

<https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>

Simsek, C., Demirkesen, AC., Baba, A., Kumanlioglu, A., Durukan, S., Aksoy, N., Demirkiran, Z., Hasözbek, A., Murathan, A., Tayfur, G. (2020). Estimation groundwater total recharge and discharge using GIS-integrated water level fluctuation method: a case study from the Alaşehir alluvial aquifer Western Anatolia, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(143). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5062-0>

Vélez, M.; Vásquez, L. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín.

# A. Anexo 1:

## Aval del proyecto emitido por la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB y por la Secretaría de Planeación del municipio de Lebrija, Santander

30/9/24, 16:41

Gmail - Reenviar: Respuesta radicado No 17271



Laura Rios <lauracrios98@gmail.com>

### Reenviar: Respuesta radicado No 17271

1 mensaje

maría carmenza vicini martinez <maria.vicini@cdmb.gov.co>  
Para: lauracrios98 <lauracrios98@gmail.com>

30 de septiembre de 2024, 3:59 p.m.

=====  
Mensaje reenviado  
De: maria carmenza vicini martinez <maria.vicini@cdmb.gov.co>  
Para: "lauracrios98" <lauracrios98@gmail.com>  
Cc: "Correspondencia Sopit" <sopit@cdmb.gov.co>  
Fecha: vie., 27 sept. 2024 12:00:43 -0500  
Asunto: Respuesta radicado No 17271  
=====  
Mensaje reenviado  
=====

Cordial saludo, respecto a su solicitud relacionada con el desarrollo de su proyecto de investigación denominado "Análisis multicriterio la determinación de zonas de recarga potencial en la microcuenca La Angula, municipio de Lebrija, Santander", la CDMB, le informa que la microcuenca La Angula ubicada en el municipio de Lebrija, se encuentra ubicada en el área de jurisdicción de la CDMB, y por lo tanto, los proyectos de investigación que se generan en nuestra área de jurisdicción son de interés para la Entidad.

Igualmente le recordamos que de acuerdo a la Política de Generación de Conocimiento e Investigación Ambiental de la CDMB, debe radicar los resultados del proyecto de investigación en medio magnético en el Centro de Documentación Ambiental y su autorización para ser publicado en nuestra página web.

Agradecemos su interés en la generación de proyectos de investigación ambiental, que aporten en información en nuestra área de jurisdicción.

Cordialmente

MARIA CARMENZA VICINI MARTINEZ  
Coordinadora Gestión del Conocimiento Ambiental CDMB

Carrera 23 # 37 - 63 Bucaramanga, Santander, Colombia  
PBX: (607) 6970241, Línea Gratuita: 018000180527

www.cdmb.gov.co  Cdbm Autoridad  carcdmb  carcdmb



Lebrija, septiembre 30 de 2024

Señores;

Gabriel Martínez Calderón  
Alcalde de Lebrija

Alexander Martínez Mendoza  
Secretario de Planeación de Lebrija

Ciudad

Respetuosamente me dirijo a ustedes para solicitar apoyo con el aval del proyecto de grado de la estudiante Laura Camila Ríos Vásquez con C.C 1098806931, titulado: "*Análisis multicriterio para la determinación de zonas de recarga potencial en la microcuenca La Angula, municipio de Lebrija, Santander*", como requisito para optar el título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de Manizales. El objetivo del proyecto es la aplicación de una metodología de superposición cartográfica para la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca, con el fin de identificar los sectores que requieren un manejo especial de preservación.

Esta solicitud refiere únicamente a constatar que la dependencia de Planeación y Ordenamiento Territorial puede encontrar utilidad en los resultados de la investigación para el fortalecimiento de la gestión del conocimiento ambiental del municipio, sin obligatoriedad. El documento final será compartido para su revisión y análisis luego de la aceptación por parte de la Universidad de Manizales.

Agradezco de antemano su colaboración con la solicitud.

Cordialmente;



LAURA CAMILA RÍOS VÁSQUEZ  
GEÓLOGA UIS – ESTUDIANTE ESP. SIG UM

