

Estimación de la Recarga Potencial Mensual en La Mesa de Los Santos (Santander)

Yira Xiomara Garzón Hernández y Harold David Salcedo Rueda

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Directora

Sully Gómez Isidro

Doctora en Ingeniería Civil

Codirectora

Luisa Casadiegos Agudelo

Geóloga

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

**Agradecimientos****Yira Xiomara Garzón Hernández**

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por permitirme hacer parte de esta gran familia. En segundo lugar, agradezco a la directora de grado Sully Gómez y codirectora Luisa Casadiegos por su tiempo y cooperación por ayudarnos en la investigación de nuestro proyecto. Finalmente agradezco a mi familia porque sin ellos no podría hacer este sueño realidad ya que me apoyaron y guiaron en el transcurso de estos años como estudiantes UIS.

**Agradecimientos****Harold David Salcedo Rueda**

Quiero agradecer a mis padres y abuela por tantos años de apoyo, amor y educación que desde siempre han sido brindados. Gracias a ellos tengo presente que debo ser un buen profesional y, sobre todo, una buena persona.

A mi primo Iván Mauricio, sus enseñanzas, charlas, experiencias y momentos en familia no serán olvidados.

A mi compañera de tesis, Yira Garzón, por su esfuerzo y dedicación durante todo este proceso.

También quiero agradecer a nuestra directora Sully Gómez y codirectora Luisa Casadiegos, por el conocimiento, tiempo, disposición y el gran apoyo brindado que fue de mucha importancia en cada etapa de este proceso.

A Karina Castellanos por su amor, motivación y compañía en los buenos y malos momentos, a Iván Nova por su amistad y apoyo.

A mi familia, compañeros y amigos de la universidad y de la vida, por los momentos agradables y compañía.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Recarga.....	16
2.2 Acuíferos.....	17
2.3 Balance Hídrico.....	18
3. Metodología .....	19
3.1 Recopilación y Análisis de Información Climática.....	23
3.2 Texturas.....	26
3.3 Usos del Suelo y Grupo Hidrológico de los Suelos .....	28
3.4 Dirección de Flujo .....	31
3.5 Capacidad de Agua Disponible.....	33
3.6 Conversión de Capas a Formato ASC.....	35
3.7 Software y Métodos Utilizados.....	36
4. Análisis de Resultados .....	37
4.1 Evapotranspiración .....	37

<b>ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL</b>	<b>5</b>
4.2 Recarga Potencial .....	42
5. Conclusiones .....	45
6. Recomendaciones .....	46
Referencias Bibliográficas .....	47

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Localización del Área de Estudio</i> .....	20
Figura 2. <i>Localización Estación Automática</i> .....	24
Figura 3. <i>Precipitación Mensual y Anual en las Tres Estaciones</i> .....	25
Figura 4 <i>Textura de los suelos en la zona de estudio. Fuente: Información brindada por la codirectora.</i> .....	28
Figura 5. <i>Uso del Suelo en la Zona de Estudio</i> .....	29
Figura 6. <i>Grupo Hidrológico de los Suelos en la Zona de Estudio</i> .....	31
Figura 7. <i>Dirección de Flujo de cada Celda en la Zona de Estudio</i> .....	32
Figura 8: <i>Capacidad de Agua Disponible de los Suelos en la Zona de Estudio.</i> .....	34
Figura 9. <i>Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Turc</i> .....	39
Figura 10. <i>Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Hargreaves</i> .....	39
Figura 11. <i>Evapotranspiración Potencial vs Temperatura</i> .....	41
Figura 12. <i>Evapotranspiración Potencial vs Temperatura</i> .....	41
Figura 13. <i>Recarga Potencial Mensual vs Precipitación</i> .....	43
Figura 14. <i>Recarga Octubre 2020 - Marzo 2021</i> .....	43
Figura 15. <i>Recarga Abril 2021 - Septiembre 2021</i> .....	44

Figura 16. *Recarga Potencial Anual en la Mesa de los Santos* ..... 44

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Datos climáticos para los métodos de Evapotranspiración de Turc y Hargreaves – Samani</i> .....	22
Tabla 2. <i>Estación Automática con sus Datos.</i> .....	23
Tabla 3. <i>Precipitación Mensual y Anual en las Tres Estaciones</i> .....	25
Tabla 4. <i>Humedad Relativa, Temperatura Media y Radiación Solar en la Estación Meteorológica Llanadas</i> .....	26
Tabla 5. <i>Clasificación de los Grupos Hidrológicos del Suelo para La Mesa de los Santos</i> .....	30
Tabla 6. <i>Capacidad de Agua Disponible Estimada para Varios Grupos de Texturas de Suelo.</i> ..	34
Tabla 7. <i>Profundidad de Raíz en los Pastizales que se encontraban en la Zona</i> .....	35
Tabla 8. <i>Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Turc.</i> .....	38
Tabla 9. <i>Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Hargreaves</i> .....	38
Tabla 10. <i>Evapotranspiración Potencial vs Temperatura</i> .....	40
Tabla 11. <i>Evapotranspiración Potencial vs Temperatura</i> .....	40
Tabla 12. <i>Valores Promedio Mensual de la Recarga Potencial</i> .....	42

**Lista de Apéndices**

**Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS**

Apéndice A. Localización de la zona de estudio.

Apéndice B. Localización de la estación automática llanadas.

Apéndice C. Textura de los suelos en la zona de estudio

Apéndice D. Resumen texturas de los suelos en la zona de estudio

Apéndice E. Uso del suelo en la zona de estudio

Apéndice F. Grupo hidrológico de los suelos en la zona de estudio

Apéndice G. Dirección de flujo en cada celda en la zona de estudio

Apéndice H. Capacidad de agua disponible de los suelos en la zona de estudio.

Apéndice I. Recarga en el mes de octubre de 2020

Apéndice J. Recarga en el mes de noviembre de 2020

Apéndice K. Recarga en el mes de diciembre de 2020

Apéndice L. Recarga en el mes de enero de 2021

Apéndice M. Recarga en el mes de febrero de 2021

Apéndice N. Recarga en el mes de marzo de 2021

Apéndice O. Recarga en el mes de abril de 2021.

Apéndice P. Recarga en el mes de mayo de 2021

Apéndice Q. Recarga en el mes junio de 2021

Apéndice R. Recarga en el mes de julio de 2021.

Apéndice S. Recarga en el mes agosto de 2021

ApéndiceT. Recarga en el mes de septiembre de 2021

Apéndice U. Recarga en el periodo de octubre de 2020 a septiembre de 2021.

**Resumen**

**Título:** Estimación de la Recarga Potencial Mensual en La Mesa de Los Santos (Santander) \*

**Autores:** Yira Xiomara Garzón Hernández y Harold David Salcedo Rueda \*\*

**Palabras Clave:** Mesa de los Santos, recarga potencial mensual, código SWB, evapotranspiración potencial, recursos hídricos, balance, clima, suelos.

**Descripción:** El objetivo de este trabajo es estimar la recarga mensual en la Mesa de Los Santos, en el departamento de Santander, de forma distribuida sobre cerca de los 160  $Km^2$  que abarca la zona de acuíferos de la Formación Geológica Los Santos. Para poder llevar acabo esto, se utilizó el código del modelo numérico Soil Water Balance SWB, se procesó la información disponible sobre el clima y suelos y se hizo las respectivas distribuciones espaciales de los parámetros que requiere el modelo. El modelo se corrió entre el 1 de octubre de 2020 y el 1 de octubre de 2021 para obtener la recarga potencial mensual, la cual fue mínima en los meses de enero, marzo, julio y septiembre con 0% y máxima en el mes de junio con 68,5% de la precipitación mensual. También se estimó la evapotranspiración potencial mensual en la Mesa de los Santos y se seleccionó el método que mejor se adaptó a las condiciones de la zona. Con los resultados de recarga a acuíferos se espera que las entidades encargadas de la gestión y manejo de recursos hídricos puedan definir valores explotables de agua subterránea para así realizar un manejo sostenible del recurso subterráneo en esta zona.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Sully Gómez Isidro, Doctora en Ingeniería Civil. Codirectora: Luisa Casadiegos Agudelo, Geóloga

**Abstract**

**Title:** Estimate of the Monthly Potential Recharge in La Mesa de Los Santos (Santander) \*

**Authors:** Yira Xiomara Garzón Hernández y Harold David Salcedo Rueda\*\*

**Keywords:** Mesa de los Santos, monthly potential recharge, SWB code, potential évapotranspiration, water resources, balance, climate, soils.

**Description :** The objective of this work is to estimate the monthly recharge in the Mesa de Los Santos, located in Santander, in a distributed manner over about 160  $Km^2$  that covers the aquifer zone of the Los Santos Geological Formation. In order to carry out this, the Soil Water Balance SWB numerical code was used, the available information on climate and soils was processed and the respective spatial distributions of the parameters required by the model were made. The model was run between October 1, 2020 and October 1, 2021 to obtain the monthly potential recharge, which was minimum in the months of January, March, July and September with 0% and maximum in the month of June with 68.5% of the monthly precipitation. The monthly potential evapotranspiration in the aquifers of the Mesa de los Santos was also obtained and, finally, the method that best adapted to the conditions of the area was selected. With these results it is expected that the entities in charge of the management and management of water resources can carry out an adequate management of the underground resource in this area.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Sully Gómez Isidro, Doctor in Civil Engineering. Co-director: Luisa Casadiegos Agudelo, Geologist

### **Introducción**

Las aguas subterráneas continentales presentan unos volúmenes de almacenamiento mucho mayores (98%) en comparación con los de las aguas superficiales (2%) y también durante periodos de tiempo más amplios. Por lo tanto, las aguas subterráneas son fuente de agua potable para la mitad de la población mundial (Becerra & Parra, 2016).

El fácil acceso a dicho recurso ha facilitado la disponibilidad de agua potable a amplios sectores de la población mundial, siendo más del 80% de la población que se abastece de ella, donde la recarga juega un papel importante ya que de esta depende el volumen de recursos hídricos subterráneos renovables y disponibles. El desarrollo sostenible de los recursos hídricos subterráneos depende no solamente de la estimación de la recarga, sino del manejo que haga el hombre de las aguas subterráneas (Vélez & Poveda, 2000).

En Colombia más del 75% del territorio cuenta con zonas favorables para el almacenamiento de aguas subterráneas, tanto en rocas fracturadas como en depósitos sedimentarios (INGEOMINAS, 2004).

Un balance de agua en suelos permite estimar la recarga de los acuíferos, para ello es necesario conocer la infiltración de lluvia que penetra al suelo. La infiltración es un factor muy importante que depende de: la precipitación mensual de la zona, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente. Conocida la infiltración, se puede realizar un balance de suelos para estimar el agua que queda libre para recargar los acuíferos. Para poder realizar el balance, también es importante determinar la cobertura vegetal del suelo junto con la profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad

de campo, el punto de marchitez del suelo y la humedad del suelo al inicio del análisis (Gunther, 2006).

El municipio de Los Santos se localiza en la zona suroccidental de la mesa y ha sufrido a lo largo del tiempo escasez de agua especialmente acentuada en las épocas secas que se pueden extender hasta 4 meses sin lluvia. Debido a lo anterior las comunidades utilizan el agua subterránea, principalmente a través de aljibes (excavaciones manuales) o pozos profundos para el extraer el agua subterránea.

El objetivo de este trabajo es estimar la recarga potencial mensual en la Mesa de Los Santos en forma distribuida sobre cerca de los  $160 \text{ Km}^2$  que abarca la zona de acuíferos de la Formación Geológica Los Santos. Para realizar esto se utiliza el código del modelo numérico Soil Water Balance SWB creado por el Servicio Geológico de EE. UU que representa el balance de agua en el suelo, se procesa la información disponible sobre el clima y suelos para hacer las respectivas distribuciones espaciales de los parámetros que requiere el modelo. A partir de información climática diaria distribuida en el área, se corre el modelo con datos de un año, comprendido entre el 1 de octubre del 2020 y el 1 de octubre del 2021 para así obtener los datos de la recarga potencial mensual a los acuíferos de la Mesa de Los Santos. A partir del análisis de resultados se seleccionan los métodos de evapotranspiración que se adaptan mejor a las condiciones de la zona y se obtienen los valores de recarga mensual. Con estos resultados se espera que las entidades encargadas de la gestión y manejo del recurso hídrico puedan realizar un manejo adecuado del recurso subterráneo en la Mesa de los Santos.

**1. Objetivos****1.1 Objetivo general**

Estimar la recarga potencial mensual en La Mesa de Los Santos (Santander) de forma distribuida, a través de la aplicación del modelo de equilibrio de agua y suelo del USGS (Soil Water Balance SWB)

**1.2 Objetivos específicos**

Procesar y analizar la información hidrológica y climática disponible en la zona de estudio.

Estimar la recarga potencial mensual del suelo en La Mesa de Los Santos empleando el código SWB.

Analizar y seleccionar el método de estimación de evapotranspiración potencial que se adapte mejor a la región de estudio.

## 2. Marco Teórico

A continuación, se definen algunos términos importantes y que contextualizan el trabajo desarrollado:

### 2.1 Recarga

Es un proceso hidrológico a través del cual el agua desciende a través del suelo a los acuíferos. La recarga es muy importante debido a que se requiere conocer su valor para poder hacer un manejo eficiente del recurso subterráneo. El agua explotable de un acuífero debe ser menor al valor de la recarga para que este recurso sea sostenible (Vélez & Vásquez, 2004). Para estudiar la recarga se debe conocer algunos conceptos como son la recarga potencial y la recarga efectiva.

Recarga potencial: Es el agua que se infiltra y se encuentra almacenada en la zona superior del suelo para después alimentar en forma potencial a los acuíferos. Normalmente para estimar esta recarga se utilizan ecuaciones de balances hídricos, ya sea de largo plazo (escala anual) o de corto plazo (escala diaria o mensual) para lo cual se requieren datos de almacenamiento en el suelo (Vélez & Vásquez, 2004).

Recarga efectiva: Es la parte de agua que ha viajado a lo largo de la zona no saturada y llega a alimentar los acuíferos. Esta recarga requiere métodos más sofisticados que permitan medir los avances de frentes de humedad en el suelo mediante la instalación de equipos de medición de humedad (Vásquez, sf).

## 2.2 Acuíferos

Los acuíferos son formaciones geológicas que almacenan agua y permiten el movimiento de ella bajo la acción de las fuerzas de gravedad y se puede extraer en cantidades apreciables. Para considerar una formación geológica como acuífera es necesario que se presenten dos condiciones: Que sea una formación hidrogeológica permeable y la presencia del agua subterránea (Vélez M. , sf).

Existen diferentes tipos de acuíferos de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que esté sometida el agua en ellos, estos son:

*Acuíferos libres:* Se trata de un acuífero que no se encuentra confinado por ninguna capa impermeable o de baja permeabilidad y por tanto el límite superior de la zona saturada de agua (véase nivel freático) se encuentra a presión atmosférica. Por encima de este límite superior de agua, los poros se encuentran, al menos en parte ocupados por aire constituyendo la zona no saturada (Geotecniafacil, sf).

*Acuíferos confinados:* Es un acuífero cuya parte superior está delimitada por un nivel impermeable o de muy baja permeabilidad por la que el flujo de agua es prácticamente inexistente. El acuífero se encuentra completamente saturado y la presión a la que se encuentra sometida el agua es superior a la atmosférica (Geotecniafacil, sf)..

*Acuíferos semiconfinados:* Se trata de acuíferos intermedios entre acuíferos libres y acuíferos confinados. Su característica principal es que la parte superior de los acuíferos semiconfinados está compuesta por un terreno de permeabilidad reducida, pero sin llegar a ser impermeable. Es posible la recarga a través de este nivel, pero en un trascurso de tiempo importante (Geotecniafacil, sf)..

### 2.3 Balance Hídrico

Los balances hídricos en el suelo permiten obtener valores de recarga potencial y este se expresa como (Mcnutt & Salazar, 2010):

$$R = P - (I + ES + ETR) - \Delta HS$$

*R* = Recarga

*P* = Precipitación

*I* = Intercepción

*ES* = Escorrentía

*ETR* = Evapotranspiración real

$\Delta HS$  = Humedad del suelo (1)

Donde:

*Precipitación*: Agua que cae desde la atmósfera a la superficie terrestre (Sánchez M, 2021).

*Intercepción*: Parte del agua lluvia que queda detenida en la superficie de las hojas de los árboles.

*Escorrentía*: Agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno (Sánchez M, 2021).

*Humedad del suelo*: Representa la cantidad de agua almacenada en el suelo. Varía entre la capacidad de campo y el punto de marchitez (Sánchez M, 2021).

*ETR*: Es la salida de agua a través de la transpiración de las plantas y de evaporación del suelo. La evapotranspiración es la salida más importante del balance hídrico. Para estudiar la

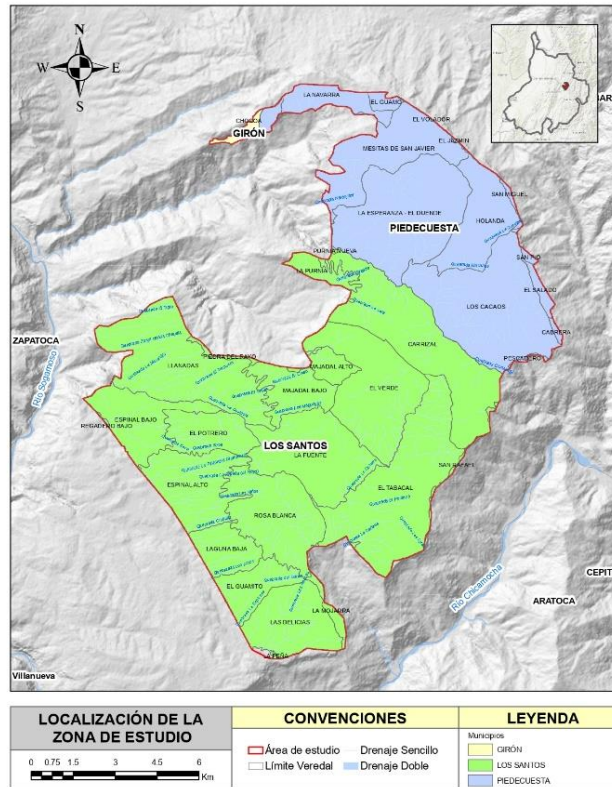
evapotranspiración existen diversos métodos o ecuaciones. El uso de estas ecuaciones requiere estimar la evapotranspiración potencial (máxima evapotranspiración que puede ocurrir en un suelo a partir de las condiciones climáticas de una región, sin limitación de agua) (Mays, 1994).

A partir de esta evapotranspiración potencial se calcula la evapotranspiración real (evapotranspiración que ocurre bajo condiciones limitadas de agua). Un indicador de la validez de la estimación de evapotranspiración potencial es la comparación con el valor de la evaporación de tanque. La evaporación de tanque es la máxima salida de agua que puede ocurrir en una zona y la evapotranspiración potencial debe siempre ser menor a este valor (Castro & Guzmán, 1985).

### **3. Metodología**

Este proyecto se realizó en la Mesa de Los Santos, ubicada en la provincia Santandereana de Soto, en la zona central del departamento y conforma en su mayor extensión el municipio de Los Santos y una pequeña parte de Girón y Piedecuesta. El área total de la Mesa de los Santos es aproximada de 430 Km<sup>2</sup> pero el área a estudiar es de 160km<sup>2</sup> (INGEOMINAS, 2009). Limita por el norte con Girón y Piedecuesta, por el sur con Jordán Sube y Villanueva, por el oriente con Piedecuesta y Aratoca, y por el occidente con el municipio de Zapatoca. Ver Figura 1.

Figura 1. Localización del Área de Estudio.



Nota: Este mapa también puede encontrarse en el anexo A.

Para determinar la evapotranspiración, en este proyecto se utilizaron dos métodos: Hargreaves- Samani y Turc utilizados en el código SWB. A continuación, se presentan las ecuaciones de dichos métodos y sus variables:

*Método Hargreaves (Sánchez, s.f.)*

$$ETP = 0.0135 (tmed + 17,78) Rs$$

*ETP= evapotranspiración diaria, mm/día*

*tmed= temperatura media, C°*

*Rs= radiación solar incidente, convertida en mm/día.*

(2)

*Método Turc (Gómez & Cadena, 2017)*

*cuando la humedad relativa media mensual es inferior al 50%*

$$ETP = K(T/T+15) (RG+50) (1+50-HR/70)$$

*Cuando la humedad relativa media mensual es superior al 50%*

$$ETP = K(T/T+15) (RG+50)$$

*K= 0.40 para los meses de 30 y 31 días*

*K= 0.37 para febrero*

*T= temperatura mensual en %*

*R= radiación global, en cal/cm<sup>2</sup>/día* (3)

La recarga potencial a los acuíferos de la Mesa de los Santos se estimó por medio del código SWB (Soil-Water-Balance) que calcula variaciones temporales y espaciales de recarga en un intervalo diario durante un año (1 de octubre de 2020 y 1 de octubre de 2021). Se seleccionó este periodo debido a la disponibilidad de la información climática en la estación automática Llanadas, que hasta esa fecha empezó a funcionar y que proporciona datos vitales para el proyecto.

Para la ejecución del código fueron necesarios datos climáticos de la zona y uso de capas de datos de sistema de información geográfica (SIG). El código SWB puede usar cualquiera de los 5 métodos aplicados más comunes para estimar la evapotranspiración potencial: Thornthwaite-Mather, Jensen-Haise, Blaney-Criddle, Turc y Hargreaves-Samani, en este caso se aplicaron los métodos de Hargreaves-Samani y Turc debido a la disponibilidad de datos (ver Tabla 1). Para

realizar la selección de los métodos más apropiados para el área de estudio, se calculó la evapotranspiración potencial por los dos métodos considerados y su resultado se comparó con los datos de lluvia mensual, temperatura y evaporación del tanque.

**Tabla 1.** Datos climáticos para los métodos de Evapotranspiración de Turc y Hargreaves – Samani

Método	Temperatura del aire (°F)			Humedad relativa (%)	Brillo solar (%)
	Mínima	Media	Máxima		
<b>Turc</b>		X		X	X
<b>Hargreaves-Samani</b>	X	X	X		

*Nota:* McNutt M, Salazar K (2010).

Una vez seleccionados los métodos de evapotranspiración a usar, se procedió a recopilar la información que requiere el código para arrojar resultados de recarga los cuales corresponden a:

1. Información climática y meteorológica.
2. Texturas del suelo.
3. Usos del suelo.
4. Grupos hidrológicos del suelo.
5. Dirección de flujo.
6. Capacidad de agua disponible.
7. Conversión de capas a formato ASC

8. Software y métodos utilizados.

### 3.1 Recopilación y Análisis de Información Climática

El código necesita datos de precipitación y algunas variables climáticas como temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación. Se obtuvo información de las estaciones La Mesa del Ideam, Llanadas del GPH y una estación privada de una de las propiedades de la Mesa de los Santos, de las cuales sólo la estación de Llanadas, por ser una estación climática contenía la información de todas las variables necesarias para el código, mientras que las otras dos, por ser pluviométricas, sólo aportaron información de precipitaciones diarias, por lo cual finalmente no se contemplaron.

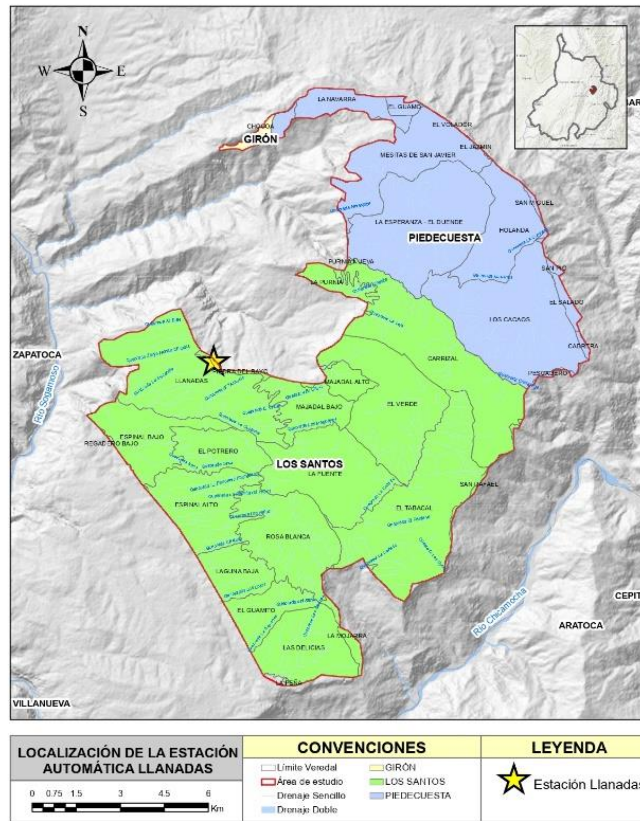
La estación automática Llanadas fue instalada por el grupo GPH en septiembre de 2020 y se utilizó para obtener los datos de precipitación, temperatura, humedad y radiación solar necesarios para hallar la Evapotranspiración potencial. Este es el único punto sobre la Mesa donde se cuenta con información climática.

Los datos de localización en la estación Llanadas se observan en la Tabla 2 y Figura 2.

**Tabla 2.** Estación Automática con sus Datos.

<b>Estación</b>	<b>Llanadas</b>
<b>Norte</b>	1249937,689
<b>Este</b>	11057779,63
<b>Altura</b>	1432,707
<b>Tipo de estación</b>	Automática
<b>Entidad encargada</b>	Grupo GPH

Figura 2. Localización Estación Automática

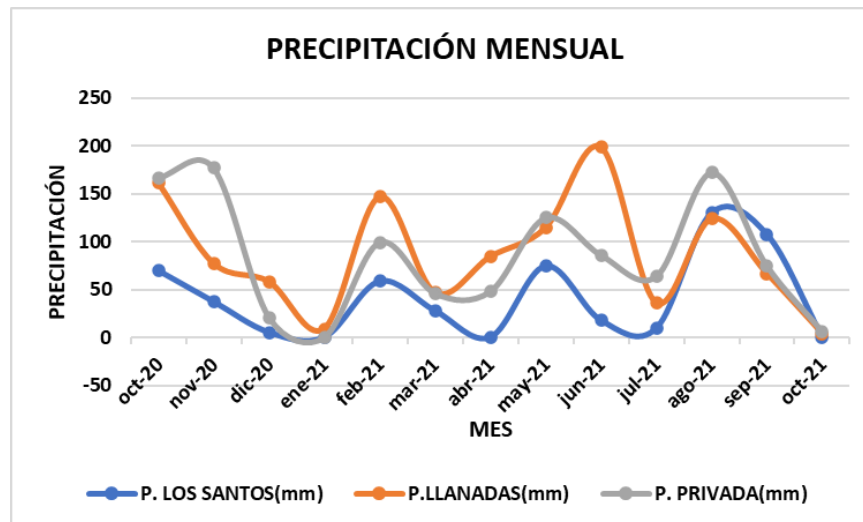


Nota: Este mapa también puede encontrarse en el anexo B.

La información de precipitación mensual y anual reportada por las tres estaciones se sintetizó en tablas y figuras con el fin de comparar estos reportes y analizar las diferencias debidas a su localización tal como se observa en la Tabla 3 y Figura 3.

**Tabla 3.** *Precipitación Mensual y Anual en las Tres Estaciones*

Precipitación mensual			
Fechas	P. Los Santos (mm)	P. Llanadas (mm)	Privada (mm)
1-31/oct/2020	69,80	161,40	166,90
1-30/nov/2020	37,30	77,20	177,00
1-31/dic/2020	5,20	58,00	21,00
1-31/ene/2021	0,00	9,00	0,00
1-28/feb/2021	58,60	146,60	99,30
1-31/mar/2021	27,80	46,60	46,10
1-30/abr/2021	0,00	84,20	48,00
1-31/may/2021	74,60	114,60	124,90
1-30/jun/2021	17,70	198,40	86,00
1-31/jul/2021	9,40	36,00	63,70
1-31/ago/2021	130,20	123,80	172,00
1-30/sep/2021	107,60	66,60	74,70
1-1/oct/2021	0,00	4,00	6,30
<b>Total</b>	<b>538,20</b>	<b>1126,40</b>	<b>1085,90</b>

**Figura 3.** *Precipitación Mensual y Anual en las Tres Estaciones*

Las variables climáticas que deben ser utilizadas para la estimación de la recarga potencial son la temperatura, humedad relativa y radiación solar. En la tabla 4 se presentan los datos mensuales de estas variables.

**Tabla 4.** *Humedad Relativa, Temperatura Media y Radiación Solar en la Estación Meteorológica Llanadas*

<b>Fechas</b>	<b>Temperatura media (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Radiación solar (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>1-31/oct/2020</b>	21,1	82	236
<b>1-30/nov/2020</b>	20,5	87	220
<b>1-31/dic/2020</b>	20,3	84	210
<b>1-31/ene/2021</b>	21,3	80	224
<b>1-28/feb/2021</b>	24,8	83	225
<b>1-31/mar/2021</b>	20,9	83	210
<b>1-30/abr/2021</b>	21,4	84	199
<b>1-31/may/2021</b>	21,3	86	202
<b>1-30/jun/2021</b>	20,7	88	198
<b>1-31/jul/2021</b>	21,6	82	211
<b>1-31/ago/2021</b>	20,7	85	220
<b>1-30/sep/2021</b>	21,2	84	230
<b>1-1/oct/2021</b>	20,6	85	291

### 3.2 Texturas

Para la determinación de la variable de texturas del suelo, se realizó una fase de campo, otra de laboratorio y una final de oficina.

La salida a campo en la Mesa de los Santos se realizó el viernes 07 de enero del 2022 donde se recogieron muestras de suelo en 20 puntos distribuidos a lo largo de la zona de estudio (Información brindada por la directora, 2022).

Estas muestras fueron llevadas a laboratorio del grupo GPH, donde fueron trituradas y secadas al sol. Posteriormente se hicieron los siguientes ensayos con las muestras:

1. Tamizado: se pasaron las muestras por los tamices N°200 y N°4 para así poder dividir las muestras que pasan y pesarlas. Se sacó una cantidad de arena retenida por el tamiz N°4 y el tamaño de dicha porción dependió del tamaño máximo de las partículas.

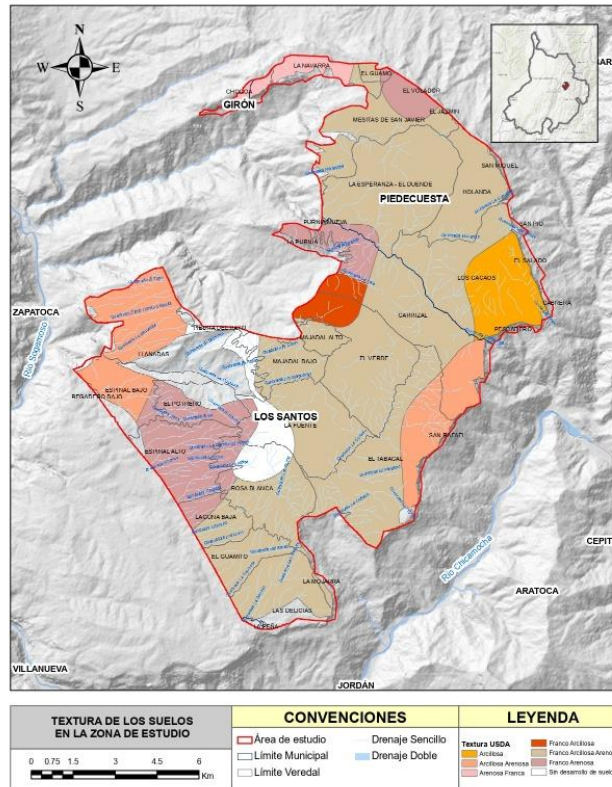
Posteriormente se lavó esta cantidad a través del tamiz N°200, luego, el material retenido se secó en el horno por 24 horas para después volver a tamizar y apuntar el material retenido. Con esto se calcula los porcentajes de arena y grava y también se dibuja la curva granulométrica

2. Gravedad específica de cada suelo: En esta prueba se pesa el balón de 500ml limpio y vacío, luego se hace la curva de calibración, se llena el balón con agua destilada y la muestra lo cual es 100g que pasan el tamiz N°4, esto se pesó nuevamente y se vertió el contenido en un recipiente, seguidamente se llevó la muestra al horno por 24 horas. Por último, se pesó el material seco y se hicieron los respectivos cálculos los cuales fueron: hallar el peso de los sólidos, el peso del agua y relación de vacíos en el suelo saturado.

3. Prueba de hidrómetro: Para esta prueba se cogió 50g de suelo limoso o arcilloso que pasa el tamiz N°4 y posteriormente fue añadido en defloculante para dejarlo actuar por 16 horas, transcurrido este tiempo se llevó al aparato de agitación. Se pasó la muestra a la probeta de 1000ml y se aforo. Se puso la probeta en una superficie plana para poder agregar el decímetro y se puso un cronómetro que permitió hacer lecturas de densímetro y temperatura.

Teniendo ya los cálculos realizados por cada ensayo se hizo un resumen de tamaño de partículas y parámetros texturales para así determinar la textura de cada muestra y poder seleccionar la capacidad de agua disponible (ver Figura 4 y Anexo D).

**Figura 4.** Textura de los suelos en la zona de estudio. Fuente: Información brindada por la codirectora.



*Nota:* Este mapa también puede encontrarse en el anexo C.

### 3.3 Usos del Suelo y Grupo Hidrológico de los Suelos

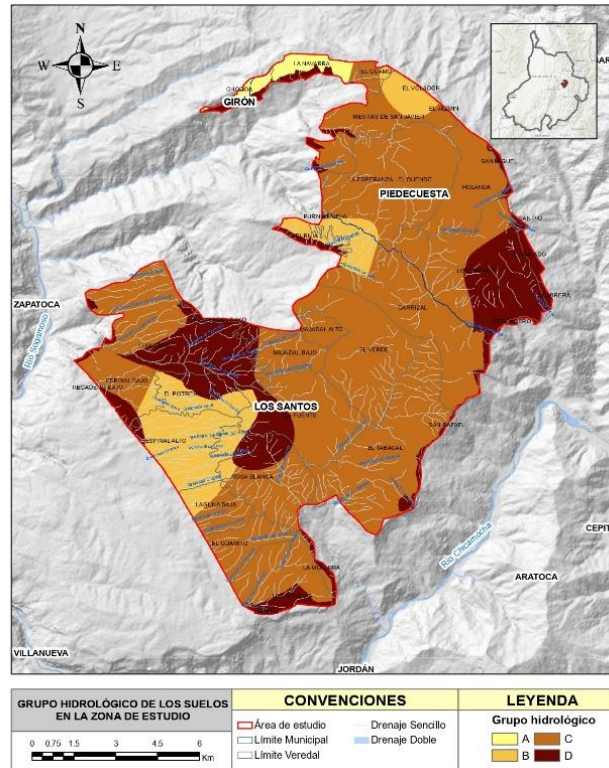
Se adquirió el mapa del uso de suelos en la Mesa de los Santos el cual se requirió para la estimación de la escorrentía, este fue obtenido a través de una tesis de grado de la Universidad Industrial de Santander (Pimiento & Merchán, 2021). El mapa se puso en una carpeta de entrada de datos para poderlo montar al código y poder calcular la escorrentía superficial y así asignar una capacidad máxima de retención de humedad de suelo para cada celda de la cuadrícula. (Ver Figura 5).



estudio, se obtuvo la clasificación de los grupos hidrológicos del suelo para La Mesa de los Santos (ver Tabla 5).

**Tabla 5.** *Clasificación de los Grupos Hidrológicos del Suelo para La Mesa de los Santos*

	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Tejido urbano continuo	98	98	98	98
Instalaciones recreativas	49	69	79	84
Cultivos permanentes herbáceos	62	71	78	81
Piña	62	71	78	81
Café	62	71	78	81
Pastos limpios	39	61	74	80
Pastos enmalezados	68	79	86	89
Mosaico de cultivos	62	71	78	81
Mosaico de pastos y cultivos	39	61	74	80
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	39	61	74	80
Mosaico de pastos con espacio natural	39	61	74	80
Bosque de galería y ripario	25	55	70	77
Plantación forestal	25	55	70	77
Herbazal	39	61	74	80
Arbustal	25	55	70	77
Vegetación secundaria o en transición	39	61	74	80
Tierras desnudas y degradadas	45	66	77	83
Lagunas	30	58	71	78
Cuerpos de agua artificiales	30	58	71	78

**Figura 6.** Grupo Hidrológico de los Suelos en la Zona de Estudio

*Nota:* Información brindada por la codirectora. Este mapa también puede encontrarse en el anexo F.

### 3.4 Dirección de Flujo

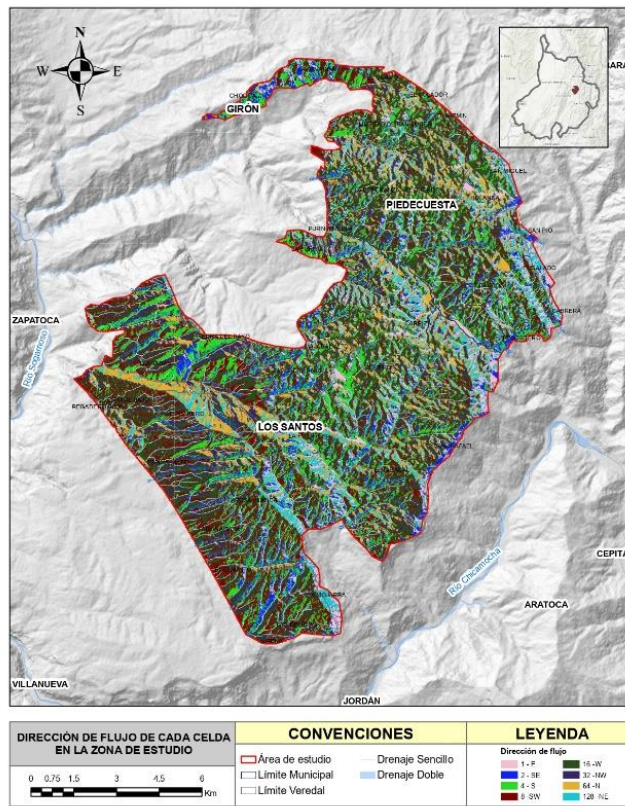
Se requiere la dirección de flujo para determinar el flujo superficial entre celdas o escorrentía entre celdas. Se obtuvo como mapa (ver figura 7) partiendo de un DEM y usando la herramienta ArcGIS a través de los siguientes pasos:

1. En ArcGIS se abrió el DEM (modelo digital de elevación) y con la herramienta FILL se corrigió
2. Con la herramienta Flow direction se sacaron las direcciones de flujo.

3. Luego de adquirir la información de la dirección de flujos estos se pusieron en una carpeta de entrada de datos convertido en un formato ASC para poderlos subir al código en forma de cuadrícula

4. Determinar cómo enrutar el flujo terrestre entre celdas utilizando el algoritmo de enrutamiento de flujo D8 el cual se encuentra en el código SWB (Mcnutt & Salazar, 2010).

**Figura 7.** Dirección de Flujo de cada Celda en la Zona de Estudio



*Nota:* Este mapa también puede encontrarse en el anexo G.

### 3.5 Capacidad de Agua Disponible

Esta variable fue calculada usando la información de la textura del suelo junto con su cobertura para determinar la capacidad máxima de retención de agua en cada celda de la cuadrícula. La capacidad de campo fue hallada con la siguiente ecuación (Mcnutt & Salazar, 2010):

$$C_{max} = C_{H2O} * P_r$$

$C_{max}$  = Capacidad máxima de agua del suelo.

$C_{H2O}$  = Capacidad de agua del suelo disponible

$P_r$  = Profundidad de la zona de la raíz. (4)

Con los datos de la textura de suelo se accedió a la tabla de la NRCS (Natural Resources Conservation Service) donde se puede observar la capacidad de agua que le corresponde a cada suelo.

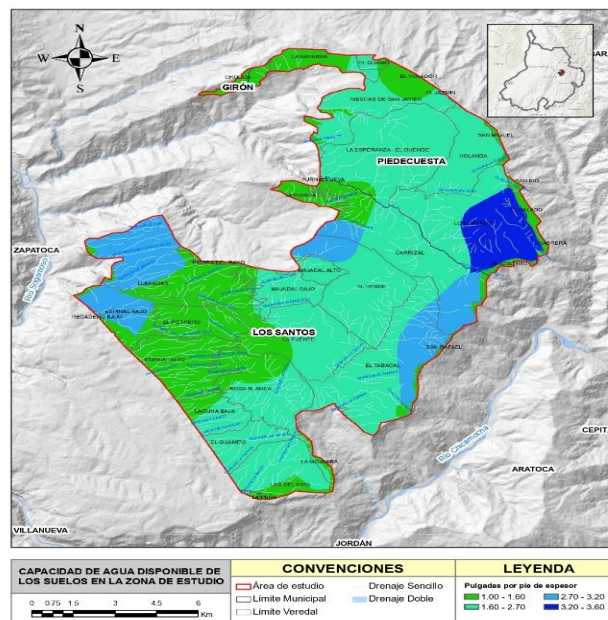
En el estudio de la textura de suelos también se determinó la profundidad de la raíz dependiendo de la cobertura de plantas que se encontraban en la zona, esta fue estimada en base al caso aplicado del código SWB (Mcnutt & Salazar, 2010) y algunos datos promedios proporcionados en la toma de muestras de suelos para texturas. A continuación, se presentan las texturas reconocidas y su capacidad de agua disponible en la tabla 6 y figura 8, también se presenta la profundidad de raíz en la cobertura de plantas de la zona Tabla 7.

**Tabla 6.** Capacidad de Agua Disponible Estimada para Varios Grupos de Texturas de Suelo.

Textura del suelo	Capacidad de agua disponible (pulgadas por pie de espesor)
Arena	1,20
Arena arcillosa	1,40
Franco arenosa	1,60
Franco arenosa fina	1,80
Franco arenoso muy fino	2,00
Franca	2,20
Franco limosa	2,40
Limosa	2,55
Franco arcillosa arenosa	2,70
Franco arcillosa limosa	2,85
Franco arcillosa	3,00
Arcillo arenosa	3,20
Arcillo limosa	3,40
Arcillosa	3,60

Nota: USGS (2010).

**Figura 8:** Capacidad de Agua Disponible de los Suelos en la Zona de Estudio.



Nota: Información brindada por la codirectora. Este mapa también puede encontrarse en el anexo H.

**Tabla 7.** Profundidad de Raíz en los Pastizales que se encontraban en la Zona

USO	PROFUNDIDAD DE RAÍCES
1.1.1 Tejido urbano continuo	0
1.4.2 Instalaciones recreativas (Nota interna: Nuestras instalaciones recreativas suelen tener pastos limpios para actividades de recreación, por eso la profundidad de raíces adoptada es el de pastos limpios)	1.01 m
2.2.1 Cultivos permanentes herbáceos	1.01 m
2.2.1.1 Piña	1.01 m
2.2.2.2 Café	1.01 m
2.3.1 Pastos Limpios	1.01 m
2.3.3 Pastos enmalezados	1.01 m
2.4.1 Mosaico de cultivos	1.01 m
2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos	1.01 m
2.4.3 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (Nota interna: En los espacios naturales comúnmente se encuentran cítricos cuyas raíces alcanzan el metro de profundidad)	1.01 m
2.4.4 Mosaico de pastos con espacios naturales ( Nota interna: en los espacios naturales comúnmente se encuentran cítricos /naranjas, limones/ cuyas raíces alcanzan un poco más del metro de profundidad)	1.01 m
3.1.4 Bosque de galería y ripario ( Nota interna: nuestros bosques riparios están compuestos por sauces, guaduas y algunos pinos)	46 cm
3.1.5 Plantación Forestal (Nota interna: Generalmente se siembran árboles que conserven el agua)	46 cm
3.2.1 Herbazal	46 cm
3.2.2 Arbustal (Nota interna: Para este uso tenemos cactus, plantas espinosas)	46 cm
3.2.3 Vegetación secundaria o en transición ( Nota interna: Nuestra vegetación secundaria es alta, principalmente arbórea y presencia ocasional de arbustos, palmas y enredaderas)	46 cm
3.3.3 Tierras desnudas y degradadas	0
5.1.2 Lagunas	0
5.1.4 Cuerpos de agua artificiales	0

Nota: USGS (2010).

### 3.6 Conversión de Capas a Formato ASC

Para el correcto funcionamiento del código SWB, fue necesario que las capas de los mapas de Usos del suelo, Grupo hidrológico de los suelos, Dirección de flujo y Capacidad de agua disponible se convirtieran a formato ASC mediante la herramienta “conversion tools” en ArcGis. Este formato requiere mapas rectangulares que se dividan en celdas de igual dimensión, para esto se tuvo en cuenta un área rectangular aún mayor que la de la zona de estudio que se dividió en celdas de 12,5x12,5 m. El total de celdas de esta área fue de 2'606.688 que finalmente solo

1'038.165 fueron celdas activas. Posteriormente, los mapas convertidos a formato ASC se ingresaron a la carpeta de entrada del código para su inicialización.

### **3.7 Software y Métodos Utilizados**

En este trabajo se utilizaron diferentes programas de computador para poder hacer la respectiva corrida del código estos fueron:

- Surfer: Software libre, útil para mapeo de superficies e interpolaciones. Se utilizó para poder espacializar las precipitaciones diarias en las tres estaciones y también para espacializar las texturas de los suelos (google, sf).
- ArcGis: Software no libre, útil para recopilar, administrar, compartir y distribuir información geográfica. Utilizado para el procesamiento y conversión de mapas a ráster, shapefile y el formato Action Script Archivos (ASC) (sigsa, sf).
- Excel: Software no libre, útil para obtener información con significado a partir de grandes cantidades de datos. También funciona muy bien con cálculos sencillos y para realizar el seguimiento de cualquier tipo de información. Utilizado para creación de tablas y gráficas de precipitación, recarga y evapotranspiración (Support, 2020).
- SWB: código libre de computadora necesario para calcular las variaciones espaciales y temporales de recarga de agua subterránea. Se ingresaron archivos de entrada como mapas de uso de suelo, dirección de flujo, grupo hidrológico de suelos y capacidad de agua en formato ASC, también información climática tomada de la estación automática llanadas (Mcnutt & Salazar, 2010).

#### 4. Análisis de Resultados

##### 4.1 Evapotranspiración

Para obtener la evapotranspiración potencial (ETP) se realizó un procedimiento el cual consistió en ingresar los valores al código SWB de precipitación, temperatura, humedad relativa y radiación solar empleando en método de Turc y Hargreaves en la Mesa de los Santos. Por el método de Turc los valores obtenidos varían entre los 85,34 y 103,89mm/mes y por el método de Hargreaves los valores obtenidos varían entre 94,742 a 136,398mm/mes.

A partir de los valores obtenidos de ETP el código calcula la evapotranspiración real (ETR) a partir del balance hídrico. El método de Turc permite obtener valores de evapotranspiración real que varían de 4,85 a 51,4 mm/mes y el método de Hargreaves permite obtener valores de evapotranspiración real que varían de 5,08 a 61,46mm/mes.

En las tablas 8 y 9 y figuras 9 y 10 se muestran las evapotranspiraciones calculadas por los dos métodos mencionados anteriormente vs la precipitación en estación automática Llanadas.

**Tabla 8.** *Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Turc.*

	<b>Método de Turc</b>		
	<b>Evapotranspiración potencial (mm)</b>	<b>Evapotranspiración real (mm)</b>	<b>Precipitación Llanadas(mm)</b>
oct-20	103,9	51,6	161,4
nov-20	92,9	39,1	77,2
dic-20	94,2	12,8	58,0
ene-21	99,1	4,8	9,0
feb-21	92,9	17,9	146,6
mar-21	92,9	19,5	46,6
abr-21	87,6	18,8	84,2
may-21	91,2	29,7	114,6
jun-21	85,3	28,7	198,4
jul-21	95,0	17,0	36,0
ago-21	96,8	39,6	123,8
sep-21	98,5	32,5	66,6
<b>Total</b>	<b>1130,5</b>	<b>312,2</b>	<b>1122,4</b>

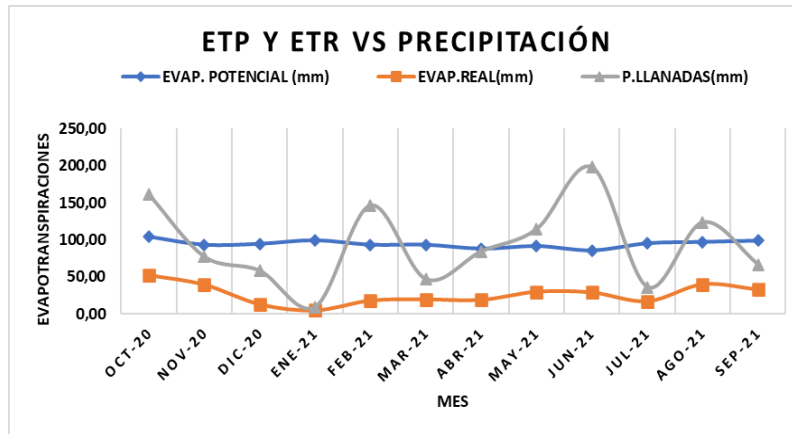
En este caso la evapotranspiración real anual corresponde a cerca del 28% de la precipitación anual.

**Tabla 9.** *Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Hargreaves*

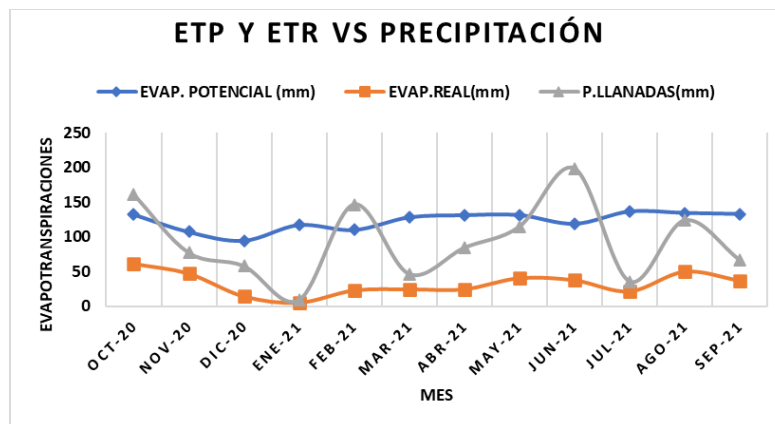
	<b>Método de Hargreaves- Samani</b>		
	<b>Evapotranspiración potencial (mm)</b>	<b>Evapotranspiración real(mm)</b>	<b>Precipitación Llanadas(mm)</b>
oct-20	132,1	61,5	161,4
nov-20	107,2	47,2	77,2
dic-20	94,7	14,3	58,0
ene-21	117,1	5,1	9,0
feb-21	110,0	22,9	146,6
mar-21	128,0	24,5	46,6
abr-21	131,1	24,5	84,2
may-21	131,3	40,6	114,6
jun-21	118,9	37,6	198,4
jul-21	136,4	21,5	36,0
ago-21	134,4	50,0	123,8
sep-21	132,8	37,1	66,6
<b>TOTAL</b>	<b>1474,0</b>	<b>386,9</b>	<b>1122,4</b>

En este caso la evapotranspiración real anual corresponde a cerca del 35% de la precipitación anual.

**Figura 9.** *Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Turc*



**Figura 10.** *Evapotranspiración Potencial y Real vs Precipitación en Estación Automática Llanadas por el Método de Hargreaves*



Para poder determinar si los métodos que se usaron eran aceptables también se hizo una comparación de ETP vs Temperatura (ver Tablas 10 y 11 y Figuras 11 y 12).

**Tabla 10.** *Evapotranspiración Potencial vs Temperatura*

	<b>Método de Turc</b>	
	<b>Evapotranspiración potencial (mm)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>oct-20</b>	103,9	21,1
<b>nov-20</b>	93,0	20,5
<b>dic-20</b>	94,2	20,3
<b>ene-21</b>	99,1	21,3
<b>feb-21</b>	93,0	24,8
<b>mar-21</b>	93,0	20,9
<b>abr-21</b>	87,6	21,4
<b>may-21</b>	91,2	21,3
<b>jun-21</b>	85,3	20,7
<b>jul-21</b>	95,0	21,6
<b>ago-21</b>	96,8	20,7
<b>sep-21</b>	98,6	21,2

**Tabla 11.** *Evapotranspiración Potencial vs Temperatura*

	<b>Método de Hargreaves- Samani</b>	
	<b>Evapotranspiración potencial (mm)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>oct-20</b>	132,1	21,1
<b>nov-20</b>	107,2	20,5
<b>dic-20</b>	94,7	20,3
<b>ene-21</b>	117,1	21,3
<b>feb-21</b>	110,0	24,8
<b>mar-21</b>	128,0	20,9
<b>abr-21</b>	131,1	21,4
<b>may-21</b>	131,3	21,3
<b>jun-21</b>	118,9	20,7
<b>jul-21</b>	136,4	21,6
<b>ago-21</b>	134,4	20,7
<b>sep-21</b>	132,8	21,2

Figura 11. Evapotranspiración Potencial vs Temperatura

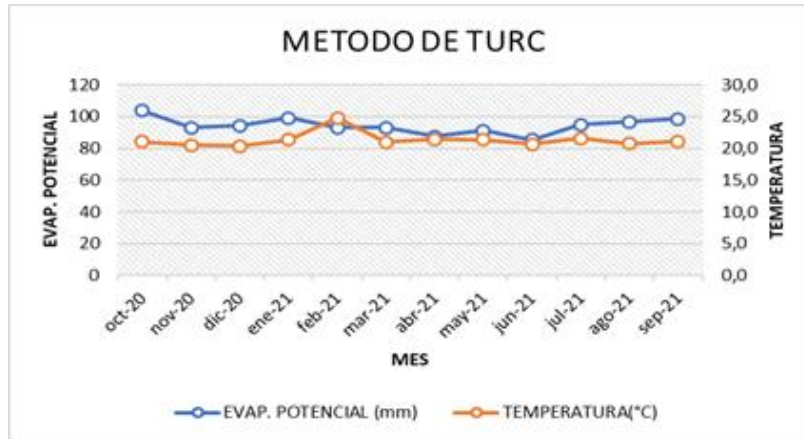
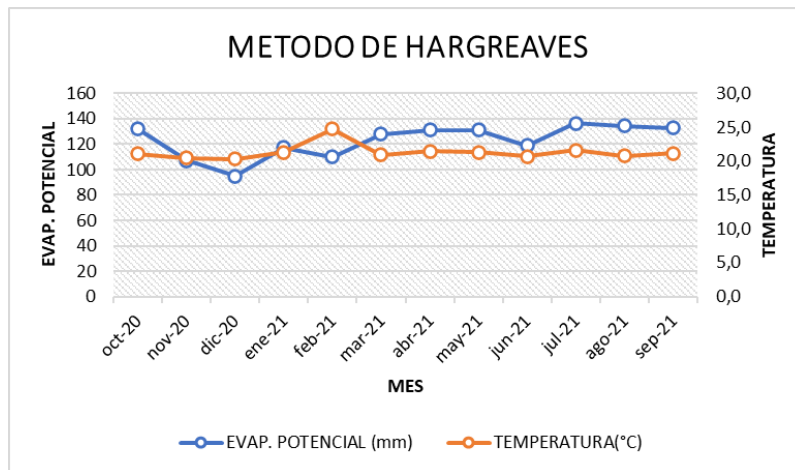


Figura 12. Evapotranspiración Potencial vs Temperatura



En estaciones cercanas como la estación de Zapatoca la ecuación por el método de Turc da una ETR semejante a 1132,85mm/ año y en la estación Llanadas de 1130,55mm/año. La evaporación de tanque medida en una estación cercana varía a lo largo del año entre 120 y 160mm. Esto significa que las dos ecuaciones utilizadas dan valores aceptables, debido a que la evapotranspiración Potencial siempre es menor que la evaporación de tanque.

## 4.2 Recarga Potencial

Para el cálculo de la recarga potencial se decidió finalmente usar el método de Turc debido a que al comparar el valor de la evapotranspiración real anual en la estación Zapatoca (Becerra & Parra, 2016), con la evapotranspiración real anual que dio en la estación Llanadas da un valor muy parecido obtenido por el método por este método.

En la Tabla 12 se observa los valores obtenidos de recarga potencial mensual y anual.

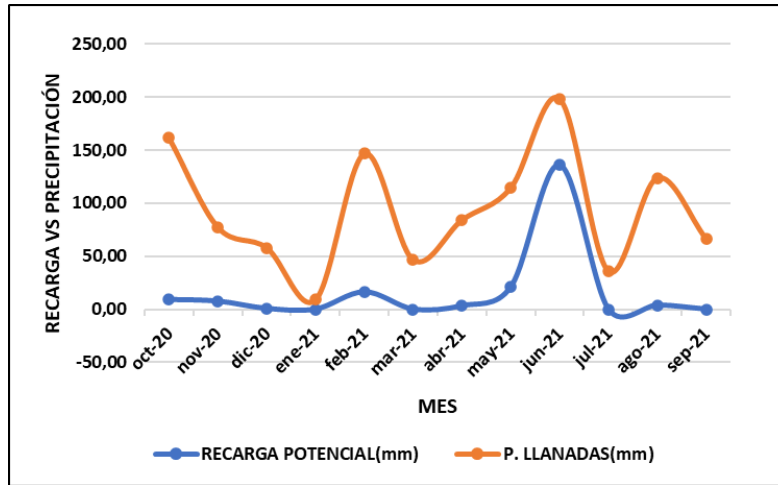
**Tabla 12.** *Valores Promedio Mensual de la Recarga Potencial*

	Método de Turc		
	Recarga potencial (mm)	Precipitación Llanadas(mm)	% Recarga
oct-20	9,00	161,40	5,58%
nov-20	7,52	77,20	9,74%
dic-20	0,65	58,00	1,11%
ene-21	0,00	9,00	0,00%
feb-21	16,33	146,60	11,14%
mar-21	0,00	46,60	0,00%
abr-21	3,22	84,20	3,83%
may-21	20,99	114,60	18,31%
jun-21	136,00	198,40	68,55%
jul-21	0,00	36,00	0,00%
ago-21	3,80	123,80	3,07%
sep-21	0,00	66,60	0,00%
<b>Total</b>	197,51	1122,40	17,60%

En la zona de estudio de la Mesa de los Santos se determinó que durante el año transcurrido entre el 1 de octubre de 2020 y 1 de octubre 2021 hubo una recarga media total de 197.51mm lo cual corresponde al 17.6% de la precipitación total en la estación Llanadas.

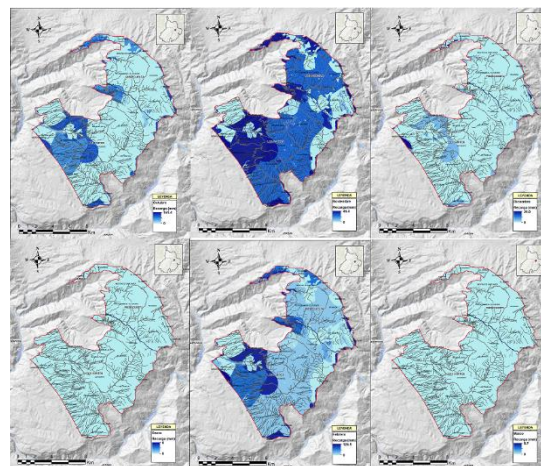
También se pudo evidenciar como se observa en la Figura 13 que en el mes donde hubo más precipitación también hubo más recarga potencial, este fue el mes de junio del año 2021.

**Figura 13.** Recarga Potencial Mensual vs Precipitación



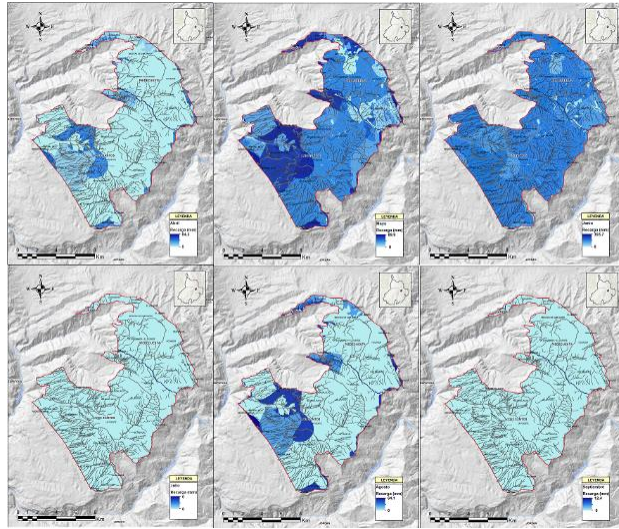
Por último, se muestra el mapa de la recarga potencial mensual donde la mayor recarga ocurrió en el mes junio del año 2021 con un valor de 136mm y la recarga más baja ocurrió en los meses de enero, julio y septiembre de 2021 con un valor de 0mm. También se muestra el mapa anual en la zona de estudio el cual se obtuvo sumando las recargas totales de cada mes donde sus valores varían entre 0 y 933,3mm. (Ver Figura 14, 15 y 16).

**Figura 14.** Recarga Octubre 2020 - Marzo 2021



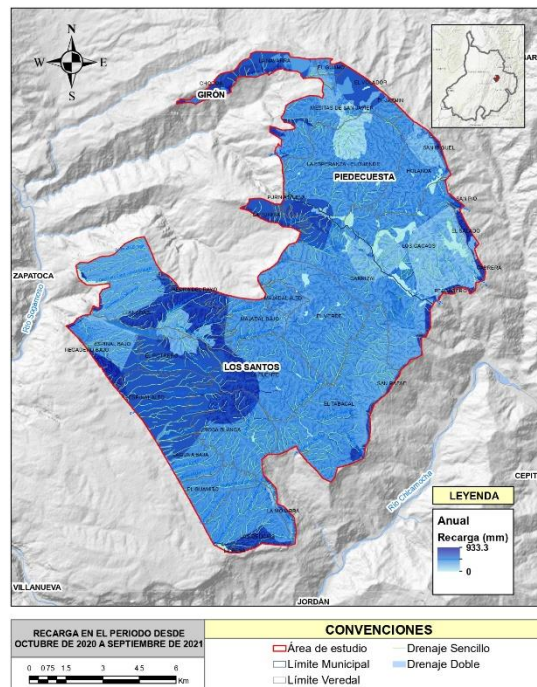
*Nota:* Estos mapas también pueden encontrarse desde el Anexo I hasta el Anexo N.

Figura 15. Recarga Abril 2021 - Septiembre 2021



nota: Estos mapas también pueden encontrarse desde el Anexo O hasta el Anexo T.

Figura 16. Recarga Potencial Anual en la Mesa de los Santos



Nota: Este mapa también puede encontrarse en el Anexo U.

## 5. Conclusiones

Se estimó la recarga potencial mensual en la zona de la Mesa de los Santos que corresponde a los acuíferos superficiales de la Formación geológica los Santos. Los valores obtenidos fluctúan a lo largo del año entre octubre de 2020 y octubre de 2021 de acuerdo con la fluctuación de la lluvia y estos son representativos de una recarga local. El mes de junio presentó el mayor valor de recarga (136 mm) que corresponde al 68.5% de la lluvia del mes correspondiente. Los meses de diciembre de 2020, enero y julio de 2021 presentaron los valores más bajos de recarga que fluctúan entre 0 y 1%, estos meses corresponden a épocas secas en la zona de estudio. La recarga anual se estimó en 197.5 mm que corresponde a cerca del 18% de la precipitación.

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, el método de Turc y el método de Hargreaves. Esta evapotranspiración presentó valores coherentes con las variaciones de la temperatura y otras variables climáticas. Igualmente, los resultados obtenidos por ambos métodos presentan valores menores a los valores de la evaporación de tanque que es un indicador de aceptación de la estimación obtenida. Debido a esto los dos métodos se aceptan como válidos para usar en la zona de estudio.

La evapotranspiración real anual obtenida por el método de Turc fue de 312 mm (28% de la precipitación) y de 386 mm (34% de la precipitación) por el método de Hargreaves. Se seleccionó el método de Turc para ser utilizado en el modelo de balance hídrico del programa SWB debido a que este utiliza otras variables climáticas además de la temperatura, y la

evapotranspiración es más cercana por este método comparándola con la estación Zapatoca que queda cerca a la estación Llanadas.

## **6. Recomendaciones**

Se recomienda seguir profundizando en el estudio de la evapotranspiración y la estimación de la recarga a los acuíferos mediante medición de niveles freáticos y aplicación de otros métodos.

La mesa de los Santos cuenta con información escasa para la medición de variables hidroclimáticas, solo existe la estación climática instalada por el grupo GPH, por lo tanto, se recomienda hacer la instalación de equipos de medición en diferentes puntos de la mesa.

Se recomienda estudiar a profundidad las condiciones de los suelos, coberturas y texturas, preferiblemente en escalas más detalladas. En la Mesa de los Santos la cartografía de algunas de las propiedades de los suelos se encuentra en escala 1:25.000.

## Referencias Bibliográficas

- Becerra, N., & Parra, C. (2016). *Balance hídrico para estimar recarga potencial en la Mesa de Los Santos y dirección de flujo de agua subterránea, tesis (pregrado)*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga,.
- Castro, M., & Guzmán, O. (1985). *Estudio comparativo de Formulas de Evapotranspiración Potencial de Colombia*, . Bogotá,.
- Geotecniafacil. (sf). *¿Qué es un acuífero? Definición, tipos y características principales;* .  
Obtenido de <https://geotecniafacil.com/que-es-un-acuifero>
- Gómez, J., & Cadena, M. (2017). *Validación de las Fórmulas de Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>) Para Colombia*. . Nota Técnica del Ideam, p.25.
- Google. (sf). *Surfer*. Obtenido de <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#sent?projector=1>
- Gunther, N. (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. Revista Geológica de América Central, 34-35: 13-30. p .14.
- Información brindada por la directora*. (2022).
- INGEOMINAS. (2004). *Atlas de aguas subterráneas de Colombia*.
- INGEOMINAS. (2009). *Atlas de aguas subterráneas de Colombia*.
- Mays, L. (1994). *V.T Chow Maidment, Hidrología aplicada*, . McGrall-Hill. p.584.
- McNutt, M., & Salazar, K. (2010). *SWB – A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for Estimating Groundwater Recharge, Técnicas y métodos 6 – A31*. Reston-Virginia: Servicio Geológico de EE. UU. p. 60.

- Pimiento, I., & Merchán, C. (2021). *inventario de fuentes de contaminación en el acuífero superior de la Mesa de los Santos (Santander)*. Universidad Industrial de Santander.
- Sánchez M, O. K. (2021). *Identificación de Ambientes Geomorfológicos y Elaboración de un Mapa de Favorabilidad para la Percolación de la Zona de la Mesa de Los Santos, Santander, tesis (pregrado)*. Universidad Industrial de Santander.
- Sánchez, F. (s.f.). *Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves*, Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. Obtenido de <https://hidrologia.usal.es/index.html>
- Sigsa. (sf). *¿Qué es ArcGIS?* . Obtenido de <https://www.sigsa.info/productos/esri/plataforma-arcgis#:~:text=ArcGIS%20es%20un%20completo%20sistema,compartir%20y%20distribuir%20informaci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica>
- Support. (2020). *Tareas básicas en Excel*, . Obtenido de <https://support.microsoft.com/es-es/office/tareas-b%C3%A1sicas-en-excel-dc775dd1-fa52-430f-9c3cd998d1735fca#:~:text=Excel%20es%20una%20herramienta%20muy,casi%20cualquier%20tipo%20de%20informaci%C3%B3n>
- Vásquez, L. (sf). *Métodos para determinar la recarga en acuíferos*. Medellín-Antioquia: Universidad Nacional de Colombia, p.2.
- Vélez, J., & Poveda, G. (2000). *Balances hidrológicos de Colombia, tesis (pregrado)*. . Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez, M. (sf). *Hidráulica de aguas subterráneas*, . Medellín-Antioquia: Universidad Nacional de Colombia. 3ª edición. p.404.
- Vélez, O., & Vásquez, M. (2004). *Aplicación de métodos no saturados para cuantificarla recarga de acuíferos*. Ejemplos bajo agricultura intensiva