

Artículo de investigación científica y tecnológica.

Cómo citar: S. Duque, M. Quiroz, y L. Vargas. "Propuesta para maximizar la recarga de agua subterránea con la siembra de maderables en la finca La Aurora en Guamal, Meta". *Inventum*, vol. 15, no. 29, pp. 117-134. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.15.29.2020.117-134

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520
eISSN: 2590-8219

Fecha de recibido: Mayo 15 de 2020

Fecha de aprobado: Junio 15 de 2020

Fecha de publicación: Julio 15 de 2020

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

Propuesta para maximizar la recarga de agua subterránea con la siembra de maderables en la finca La Aurora en Guamal, Meta

Proposal to maximize the groundwater recharge with the sow of wood (trees) in the finca La Aurora in Guamal, Meta

Proposta de maximização do recarregamento de águas subterrâneas com o plantio de madeira na fazenda La Aurora em Guamal, Meta

Resumen

En una cuenca hidrográfica el conocimiento del movimiento del agua específico permite llevar a cabo una planeación y ordenamiento territorial. El objetivo del presente trabajo es la extracción de datos climatológicos de la zona en donde se ubica la finca de trabajo y por consiguiente la realización de un montaje basado en plataformas aptas para la reubicación, identificación y operación del almacenamiento hídrico de Guamal, Meta. Debido a esto, fue necesario identificar los factores biológicos y antropogénicos de la finca, dado que generan alteraciones patológicas, desbordamientos e inundaciones que alteran el uso de la cuenca hídrica elegida. De modo que con la información recopilada del SIG (Sistema de Información Geográfica) se dio inicio al diseño hidrológico, con el empleo de programas informáticos tales como Qgis y Python para denotar el montaje de un reservorio de agua lluvia en el territorio anteriormente mencionado. Por otro lado, a partir de la realización de cálculos matemáticos y adjunción de datos consultados en el Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), se determinó, a partir del método de Thornthwaite, que la capacidad de recarga acuífera que tendrá la zona destinada para el establecimiento del embalse es de 984.88 mm/año, el cual será correctamente aprovechado para nuevos proyectos que necesiten de la reserva de este recurso hídrico.

Palabras clave: almacenamiento hídrico, cuenca hídrica, método Thornthwaite, Qgis, Python.

Abstract

In a hydrographic basin the knowledge of the specific water movement allows a planning and / or territorial management. The objective of the

Sofia Duran Duque

cossdurand@unbosque.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-7157-8393>
Grupo de Investigación Choc lzone,
Semillero de hidrología computacional
Universidad El Bosque, Bogotá
Colombia

Manuel Esteban Quiroz Escobar

mquiroze@unbosque.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-4409-5801>
Grupo de Investigación Choc lzone,
Semillero de hidrología computacional
Universidad El Bosque, Bogotá
Colombia

Laura Vanessa Vargas Guerrero

lvargasg@unbosque.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-5164-3079>
Grupo de Investigación Choc lzone,
Semillero de hidrología computacional
Universidad El Bosque, Bogotá
Colombia

present radical work in the extraction of climatological data from the area where the predisposed work farm is located and by the execution of an assembly based on platforms suitable for the relocation, identification, and operation of the Guamal, Meta water storage. Due to this, it was necessary to identify the biological and anthropogenic factors of the farm, because they generated pathological changes, overflows and floods occur, which alter the use of the chosen water basin. So, with the collected information from the GIS (Geographical Information System) the hydrological design began using software as Qgis and Python to denote the installation of a rainwater reservoir in the territory. On the other hand, by performing mathematical calculations and adding data consulted at Ideam (Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental studies), it was determined from the Thornthwaite method that the aquifer recharge capacity that would have the zone destined for the establishment of the reservoir is 984.88mm/year, which will be correctly approach for new projects that need the reservation of this hydrologic resource.

Keywords: water storage, water basin, Thornthwaite method, Qgis, Python.

Resumo

Em uma bacia hidrográfica, o conhecimento do movimento específico da água permite realizar um planejamento e / ou ordenamento territorial. O objetivo deste trabalho está na extração de dados climatológicos da área onde se localiza a fazenda de trabalho e conseqüentemente na realização de uma montagem baseada em plataformas adequadas para a realocação, identificação e operação do armazenamento de água Guamal, Meta. Em função disso, foi necessário identificar os fatores biológicos e antrópicos da fazenda, uma vez que geram alterações patológicas, inundações e inundações que alteram o funcionamento da bacia hidrográfica escolhida. Assim, com as informações coletadas do SIG (Sistema de Informação Geográfica), iniciou-se o projeto hidrológico, utilizando programas de computador como Qgis e Python para denotar a montagem de um reservatório de água de chuva no referido território. Por outro lado, a partir da realização de cálculos matemáticos e adição de dados consultados no IDEAM (Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais), foi determinado a partir do método de Thornthwaite qual a capacidade de recarga do aquífero que a área destinada terá Para a implantação do reservatório é de 984,88 mm / ano, que será devidamente utilizado para novos projetos que requeiram a reserva deste recurso hídrico.

Palavras-chave: armazenamento de água, bacia hidrográfica, método Thornthwaite, Qgis, Python.

I. INTRODUCCIÓN

La caracterización del ciclo hidrológico genera un diagnóstico básico para todo tipo de estudio de cuencas hídricas, diversos autores han señalado que la infiltración expresa el volumen del agua procedente de las precipitaciones, atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros en el suelo, e indica un movimiento vertical del agua sobre el sustrato. De igual manera, el escurrimiento participa como fuente hídrica proveniente de una tormenta que drena o escurre sobre la superficie del suelo. A medida que circula desde las partes más lejanas hasta la desembocadura, fluye por los cauces e incrementa su volumen hasta lograr el caudal pico, a partir del cual comienza suavemente a decrecer al poco tiempo de terminada la lluvia [1]. Particularmente, el escurrimiento superficial en áreas serranas se favorece por la presencia de pendientes pronunciadas y estratos semi-impermeables a poca profundidad.

Los componentes del ciclo hidrológico se pueden modelizar según una tendencia de cambio espacio-temporal, lo que permite analizar el carácter dinámico de la información incluida en el sistema [1] como se muestra en la figura 1. La cuantificación del excedente superficial de una lluvia constituye la base en la planificación del recurso agua, sea para aumentar el proceso de infiltración en el suelo con el fin de mantenerla disponible para los cultivos, como para disminuir los caudales pico generadores de inundaciones por desborde de los cauces [2]. El conocimiento de los factores intervinientes en los procesos hidrológicos de una cuenca hidrográfica es muy importante, debido a que es allí donde se capta y almacena el agua necesaria para diferentes usos del suelo o consumo urbano.

Por otra parte, la vegetación retarda el flujo hídrico superficial y otorga tiempo adicional para penetrar al suelo, de este modo limita el escurrimiento superficial y favorece el proceso de infiltración [3].

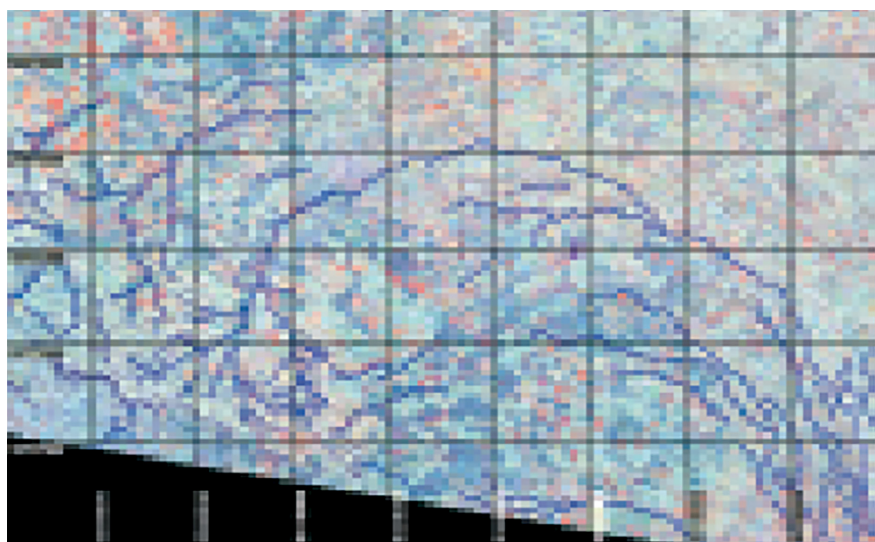


Figura 1. Imagen satelital de la cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande y su sistema de drenaje.
Fuente: [1].

El empleo de herramientas geoinformáticas permite realizar estudios orientados a cuantificar las transformaciones del paisaje con relación a la dinámica del escurrimiento a nivel temporal y espacial [4]. Por su parte, el análisis espacio-temporal de la cobertura vegetal y uso del suelo permite conocer cómo se está utilizando una

determinada zona y qué recursos permanecen en su estado natural [3].

No obstante, los métodos para estimar la esorrentía a partir de la precipitación tratan de descontar de la lluvia caída sobre una cuenca todas aquellas pérdidas que se deben a factores tales

como la infiltración, la evapotranspiración, la interceptación y el almacenamiento superficial. El procedimiento más generalizado y fácil de adaptar a cualquier región es el método del número de curva (NC) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1972). Este método se basa en la estimación directa de la escurrentía superficial de una lluvia aislada a partir de características del suelo, uso de este y de su cubierta [1]. A partir de la representación de la precipitación (P) y precipitación efectiva (Pe) se obtuvo una familia de curvas que fueron estandarizadas para definir un número adimensional de curvas NC, que varía de 1 a 100 según sea el grado de escurrimiento directo. El NC igual a 1 indica que toda la lluvia infiltra y un NC de 100 representa el escurrimiento total de la precipitación. Los números de curva se aplican para diferentes condiciones de humedad antecedente, siendo la condición II la que corresponde a humedad media del suelo. Si en el momento de producirse la precipitación el suelo se encuentra saturado de acuerdo con lluvias precedentes en el período de 5 días anteriores, se supone un aumento de la escurrentía “condición III”; por el contrario, si el suelo está seco la infiltración será predominante “condición I” [5].

II. JUSTIFICACIÓN

La adaptación al entorno es la clave de la evolución para cualquier ser vivo, mientras que para el ser humano es necesario alterar su entorno ambiental con el fin de adaptarlo a sus necesidades. La actividad humana, el incremento de la urbanización, la deforestación, la degradación de los ecosistemas y la variabilidad en el clima, son factores que producen una serie de cambios y consecuencias a corto y mediano plazo, tales como la alteración en el proceso de transporte de agua lluvia, que a su vez genera condiciones de sequía y múltiples inundaciones. De acuerdo con esto, se pueden considerar dos conceptos importantes, cambio climático y alteración ecosistémica, la cual ha generado una migración de la población de las zonas rurales, lo que ocasiona un crecimiento continuo de las ciudades, procesos de cambio de cobertura de suelo y aumento en la demanda de los servicios ecosistémicos [6].

Por lo tanto, el diseño hidrológico de un embalse contribuye de manera positiva al aprovechamiento del agua lluvia, debido a que reduce el impacto en verano cuando hay sequías en la zona afectada,

además al poseer una reserva de este recurso ecosistémico no será necesario su uso a gran escala, por lo cual el valor pagado a la empresa de Acueducto para la adquisición del agua, a largo plazo se verá disminuido.

También se podría disponer para diferentes propósitos, en este caso para la irrigación de cultivos sin uso del riego y el aumento de la probabilidad que la quebrada no se seque por temporadas, para que el ganado no se vea afectado por la falta de recurso hídrico en ninguna época del año.

Es importante destacar que la deforestación ocasiona fuertes perturbaciones en los ecosistemas y en el ciclo hidrológico. Existen ideologías que argumentan que la deforestación puede incrementar los caudales y por tanto ser benéfica para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos, sin embargo, las contraposiciones señalan que las fuentes de agua se secan con la deforestación.

De igual manera, el cambio de cobertura trae consigo adicionalmente una variación significativa en la rugosidad aerodinámica. La altura promedio de los árboles en la selva es de aproximadamente 35 metros, mientras que los pastos y los potreros difícilmente tienen alturas superiores a los 35 cm. El efecto más importante de la rugosidad está sobre la turbulencia en la capa límite planetaria donde la evaporación y el flujo de calor sensible son apreciablemente afectadas por este fenómeno; así pues, a mayor intensidad de la turbulencia, se presentarán mayores tasas de transporte de temperatura y humedad.

También es necesario considerar el efecto de la rugosidad sobre la estabilidad vertical del aire húmedo, asunto de capital importancia para las lluvias. Una elevada rugosidad significa que el espesor de la capa límite será mayor, que hay una mejor mezcla al interior de la capa y que una gran porción de la energía del flujo principal se gasta en vórtices y movimiento desordenado, que incluye pendientes ascendentes.

Se debe tener en cuenta, que la elevada tasa de evapotranspiración simboliza la existencia de una fuente continua de humedad superficial. Sin embargo, el desarrollo de la deforestación en zonas ecuatoriales tiende a disminuir las condiciones favorables para que se presente la precipitación y a su vez, evita la correcta infiltración, que, en el caso de la presente investigación, es un proceso fundamental para desarrollar el embalse en la finca La Aurora en Guamal, Meta [7]. En la siguiente tabla, extraída de la base de datos del Ideam

(Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), se observa que el departamento del Meta a nivel nacional ha sido muy afectado por el

fenómeno de la deforestación, trayendo graves implicaciones para el correcto desarrollo del ciclo hidrológico en la zona.

Departamento	Nacional %	Acumulado%
Caquetá	26,29	26,2
Guaviare	23,59	49,8
Meta	20,31	70,1
Putumayo	18,56	88,7
Vaupés	2,90	91,6
Norte de Santander	1,89	93,5
Antioquia	1,88	95,4
Amazonas	1,21	96,6
Nariño	0,62	97,2

Departamento	Nacional %	Acumulado%
Chocó	0,59	97,8
Bolívar	0,42	98,2
Córdoba	0,36	98,6
Arauca	0,29	98,9
Cauca	0,24	99,1
Vichada	0,24	99,4
Guainía	0,19	99,5
Tolima	0,12	99,7

Tabla I. Detección temprana de deforestación
Fuente: [8].

III. PREGUNTA PROBLEMA

¿Cómo un modelo hidrológico para el aprovechamiento de agua lluvia en la finca La Aurora en Guamal, Meta, puede maximizar la captación de agua infiltrada y de agua escorrentía, para obtener la máxima cantidad de agua aprovechable?

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Realizar una propuesta de optimización de la recarga de agua subterránea en la finca La Aurora.

B. Objetivos específicos

- Caracterizar el terreno a partir de las condiciones y variables ambientales en fuentes bibliográficas, modelos de elevación digital (DEM), Información de las estaciones meteorológicas del Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), bases de datos, noticias.
- Realizar una propuesta de optimización de la recarga de agua subterránea en la finca La Aurora en Guamal, Meta.

V. MARCOS DE REFERENCIA

A. Fundamentos conceptuales

Los sistemas de información geográfica son una herramienta para el análisis geográfico de gran difusión. La causa principal reside en la multitud de actividades en las que pueden ser útiles y que pueden ser clasificadas en dos grandes grupos:

1. Gestión y descripción del territorio: es decir se trata de contestar preguntas del tipo: ¿dónde están las “cosas”? Por ejemplo:

1. ° El mantenimiento, cartografía y control de grandes infraestructuras (redes de abastecimiento y evacuación de aguas, red telefónica,), es decir los denominados sistemas AM/FM.
2. ° El control y gestión de datos catastrales, los sistemas LIS/SIC.
3. ° La gestión urbana y municipal.

2. Ordenación y planificación del territorio: en este caso se trata de responder a cuestiones del tipo: ¿dónde deben estar las “cosas”? Por ejemplo:

- 1.° Las tareas de planificación urbana.
- 2.° La ordenación del territorio y la planificación ambiental.
- 3.° El análisis y preparación de políticas sobre el transporte: flujo de tráfico, delimitación de áreas de influencia, cálculo de rutas óptimas. Ayuda a la conducción.
- 4.° El geomarketing y/o la geodemografía.

Por lo tanto, al contar con los SIG (sistemas de información geográfica), se revisó el trabajo titulado “Propuesta de almacenamiento de agua lluvia para el suministro del municipio de Albán utilizando Hec Geohms”, en el cual se establece una propuesta para el aprovechamiento de agua lluvia mediante embalse para abastecer al municipio de Albán y se calculan las variables hidráulicas para el suministro de la población desde el embalse hasta la planta de tratamiento de agua potable [9]. De acuerdo con la bibliografía consultada se posee un

fundamento teórico y se desarrolla la idea planteada sobre maximizar la carga de agua subterránea con la siembra de maderables en la finca La Aurora en Guamal, Meta, que tiene como finalidad ayudar a conservar el agua de la época de lluvias dentro del agua subterránea captada por las raíces de los árboles, además de maximizar el contacto del agua con el suelo, lo que ocasiona la máxima infiltración y almacenaje del agua en los acuíferos subterráneos con la restauración de los flujos naturales del agua en el suelo [10].

VI. METODOLOGÍA

A. Datos

Los datos fueron obtenidos de la finca La Aurora, ubicada en la vereda El Danubio en el municipio el Guamal, Meta ilustrada en la figura 2, la cual es de tamaño “mediano”, al poseer 14 hectáreas de terreno.

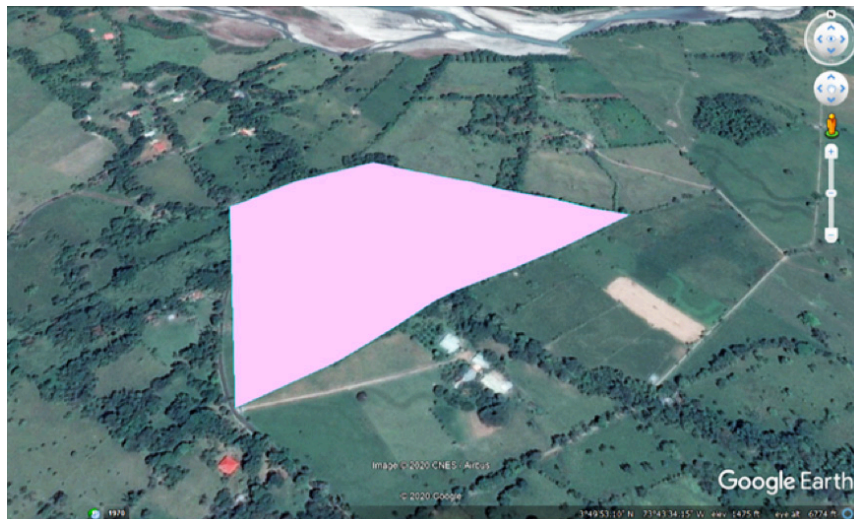


Figura 2. Área de captación y ubicación de la finca La Aurora.
Fuente: elaboración propia.

B. Desarrollo metodológico, alcance y objetivo de estudio

En primer lugar, se halló el área de captación del terreno en metros cuadrados, a partir de un modelo de elevación digital de 12,5 metros de precisión por píxel con la utilización de la herramienta Hec Geohms, donde se obtuvieron los datos de la precipitación promedio mensual

del atlas interactivo del Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) [11]. Gracias a esta plataforma se obtuvieron como primera medida los litros de agua aprovechable adjuntados en el archivo Excel que se denota en la figura 3, y por consecuencia, se dio lugar a la multiplicación de la precipitación promedio entre el coeficiente de escorrentía encontrado en la norma NS 085 (EAAB).

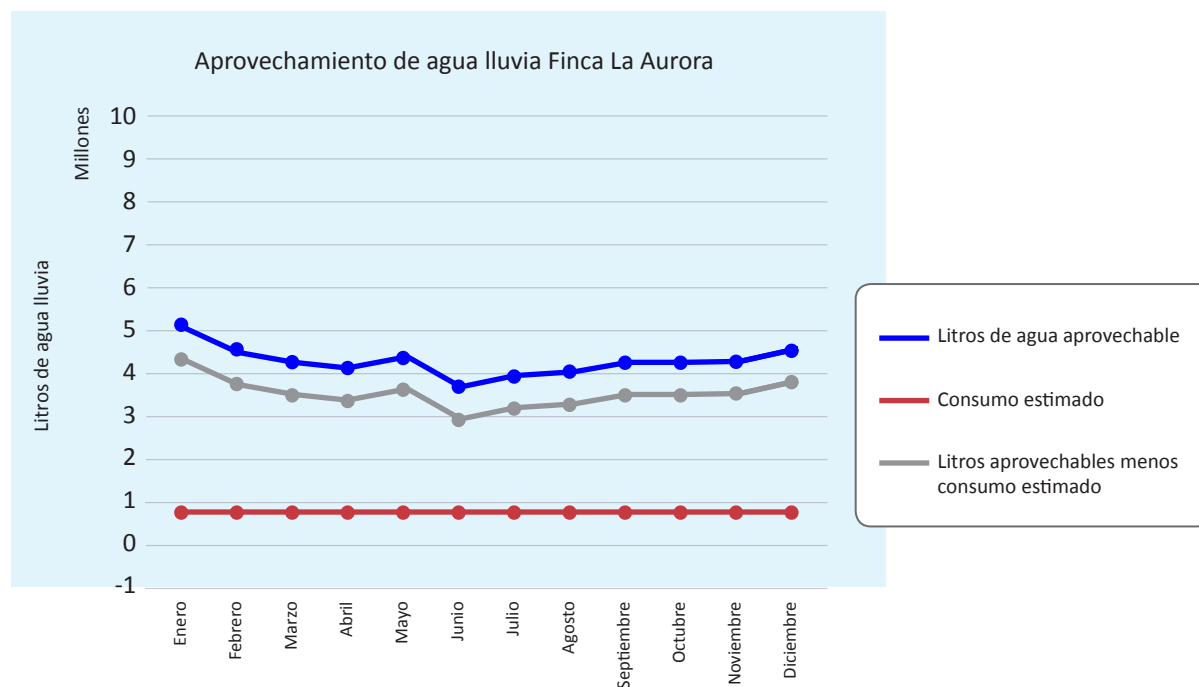


Figura 3. Información de la captación del terreno.
Fuente: elaboración propia.

Embalse	Mes	Precipitación promedio mensual en litros/m ²	Área de Captación en m ²	Coficiente de escorrentía Norma NS 085 EAAB	Litros de agua aprovechable al mes en litros	Litros de agua almacenada real	Consumo estimado mensual	Diferencia entre consumo y agua almacenada al mes en litros
Medición	Enero	145.7	140,000.0	0.25	5,099,500		733,521	4,365,979
	Febrero	129.3			4,525,500		733,521	3,791,979
	Marzo	122.3			4,280,500		733,521	3,546,979
	Abril	116.4			4,074,000		733,521	3,340,479
	Mayo	124.3			4,350,500		733,521	3,616,979
	Junio	105.6			3,696,000		733,521	2,962,479
	Julio	112.8			3,948,000		733,521	3,214,479
	Agosto	116.0			4,060,000		733,521	3,326,479
	Septiembre	120.8			4,228,000		733,521	3,494,479
	Octubre	120.1			4,203,500		733,521	3,469,979
	Noviembre	120.9			4,231,500		733,521	3,497,979
	Diciembre	130.4			4,564,000		733,521	3,830,479
Anual	122.1	51,261,000		8,802,256	42,458,744			

Tabla II. Información de la captación del terreno
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de las precipitaciones mensuales de 2009 a 2017, por medio de la plataforma del Ideam, la cual brinda información climatológica aledaña a la finca de estudio predispuesta. A partir de la información recolectada se realizó el promedio mensual por año de

cada base de datos adjunta al Excel denotado en la figura 3 y la tabla III. Es importante resaltar que este procedimiento se llevó a cabo en dos distintas estaciones meteorológicas cercanas a la finca La Aurora, las cuales son la estación meteorológica de Villavicencio (tabla II) y la de San Martín (tabla III).

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio
Enero	117.67	204.7	143.3	122.7	151.3	150.8	133.1	162.7	102.8	143.23
Febrero	118.73	182.1	112.9	124.1	120.3	154.5	125.9	112.9	101.1	128.06
Marzo	122.01	122.8	114.3	127.4	119.1	143	128.9	111.4	108.6	121.95
Abril	87.5	92.3	104.7	104.6	115	119.5	116.5	86.6	108.1	103.87
Mayo	120.4	98.2	93.7	135.8	129.1	126.4	112.2	121.8	124.4	118.00
Junio	104.5	94.7	99.9	116.5	101.4	93.4	91.5	98.5	105	100.60
Julio	105.4	76.4	111.3	106.9	126.9	103.2	116.8	103.8	74.9	102.84
Agosto	113.5	95.6	138.9	102.1	106	104.9	104.2	108.1	137.5	112.31
Septiembre	145	124.8	114.2	112.9	124.6	151.5	139.9	130	127.1	130.00
Octubre	142	127.4	108.5	147.7	145.6	130.3	125	130.5	136.2	132.58
Noviembre	128.3	104	103.7	141.3	117.8	118.5	113.4	125.5	39.6	110.23
Diciembre	151.5	113.8	123.3	138.5	134.4	130.3	131.8	97.5	117.9	126.56

Tabla III. Recopilación de la información del IDEAM de estación meteorológica de Villavicencio
Fuente: elaboración propia.

	2009	2010	2011	2012	2014	2015	2016	2017	Promedio
Enero	114.9	173.1	157.8	171.1	128.55	108.02	155.3	157.2	145.75
Febrero	117.5	145.8	154.6	88.4	144.8	108.21	117.8	157.2	129.29
Marzo	123.9	126.7	119.8	129.7	112.3	135.3	112.2	118.8	122.34
Abril	91.8	78.1	144.1	109.2	128.5	106.6	128.4	144.4	116.39
Mayo	127.6	114.9	139.5	119.4	128	104.8	119.5	140.1	124.23
Junio	89.5	104.2	132.45	92.9	123.1	69.5	96.4	134.4	105.31
Julio	89.3	106	139.3	118.4	126.7	110.7	121.6	90.4	112.80
Agosto	117	102.5	137.7	83.3	126.1	110.6	115.98	134.6	115.97
Septiembre	137.7	106.4	137.8	105.5	99.6	125.7	122.8	131.4	120.86
Octubre	139.5	117.5	109.3	128	124.2	111.4	121.1	109.5	120.06
Noviembre	140.9	117.6	137.4	110.6	98.1	113.3	117.3	131	120.78
Diciembre	182.1	142.1	123.5	134.6	121.8	92.3	117.2	129.3	130.36

Tabla IV. Recopilación de la información del IDEAM de estación meteorológica de San Martín
Fuente: elaboración propia.

C. Instrumentos de procesamiento de información

En los datos anteriormente obtenidos en el servidor del Ideam, transcurridos en un periodo de nueve años, se manifiesta una precipitación y evapotranspiración registrada anualmente. A partir de esto se realizó un promedio de los datos obtenidos para cada una de estas variables por cada mes en los nueve años. Los resultados obtenidos fueron adjuntados en la tabla IV.

Luego, los datos de precipitación promedio obtenidos designados por la letra P, fueron insertados en el programa Python como se observa en la figura 5, donde a través del modelo de balance hídrico de Thornthwaite, que consiste en un modelo simplificado de balance hídrico mensual del suelo para deducir la evapotranspiración real (ETP) y los valores mensuales promedio de recarga (Rmax) y escorrentía del agua subterránea, se calculó la recarga del acuífero como se observa en la figura 5 y se obtuvo un valor de 1384.88 mm/año [6].

```
In [16]: P = [103.07,137.45,322.75,543.48,588.58,521.12,472.1,386.21,343.43,448.81,449.23,251.38]
ETP = [143.23,128.06,121.94,103.86,118,100.6,102.83,112.31,130,132.68,110.2,126.55]
Rmax = 100
```

Figura 4. Datos precipitación y evapotranspiración.
Fuente: elaboración propia.

```
In [29]: tasa = 0.45
Recarga = df.transpose().sum()[3] * tasa
print ('La recarga del acuífero es de ' + str(round(Recarga,2)) + ' mm/año')

La recarga del acuífero es de 1384.88 mm/año
```

Figura 5. Recarga acuífero 1.
Fuente: elaboración propia.

Al ejecutar el mismo procedimiento, pero cambiando el valor de la tasa a 0,7, (según el porcentaje de número de curva de la metodología del servicio geológico de Estados Unidos) establecido en la figura 6, la recarga acuífera es de 2154,26

mm/año. Este valor está basado en la existencia de una cobertura natural, es decir una abundante vegetación, puesto que los árboles ayudan a que el agua se absorba más fácilmente en la tierra y así se recarguen las fuentes subterráneas.

```
In [56]: tasa = 0.7
Recarga = df.transpose().sum()[3] * tasa
print ('La recarga del acuífero es de ' + str(round(Recarga,2)) + ' mm/año')

La recarga del acuífero es de 2154.26 mm/año
```

Figura 6. Recarga de acuífero 2.
Fuente: elaboración propia.

El valor más cercano a la realidad, que se obtuvo de la recarga acuífera de la finca localizada en Villavicencio es de 984,8 mm/año, un dato muy bajo en comparación con los otros. Este resultado se evidencia en la figura 7, y está relacionado con

el tipo de suelo con el que cuenta la finca que es pastizal principalmente, debido a que no cuenta con abundante vegetación, lo cual se refleja en el porcentaje de infiltración y evapotranspiración que es de 32 %, y el de escorrentía de un 68 %.

```
In [42]: tasa = 0.32
Recarga = df.transpose().sum()[3] * tasa
print ('La recarga del acuífero es de ' + str(round(Recarga,2)) + ' mm/año')
```

La recarga del acuífero es de 984.8 mm/año

Figura 7. Recarga de acuífero 3.
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se realizó la red de drenaje a partir del modelo de elevación digital y la herramienta SAGA, donde se puede evidenciar en la figura 8 las corrientes de flujo en esta zona determinada. Todo esto fue plasmado en Google Earth, para poder tener una visión más clara de las corrientes de agua, y de cómo se puede hacer el embalse [12]. El

seguimiento de las fuentes hídricas se enfocó en la determinación del área de captación de agua en la finca, como se evidencia en la figura 9, en este paso se pudo identificar el área deseada por medio de las dos vertientes ubicadas en la zona al noreste del espacio de la finca, donde se cuenta con un espacio de captación de aproximadamente 6,26 hectáreas.

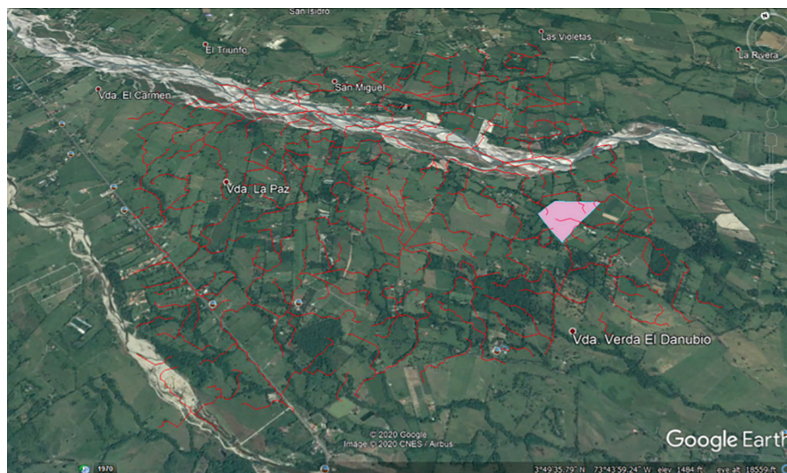


Figura 8. Imagen tomada desde Google Earth.
Fuente: elaboración propia.

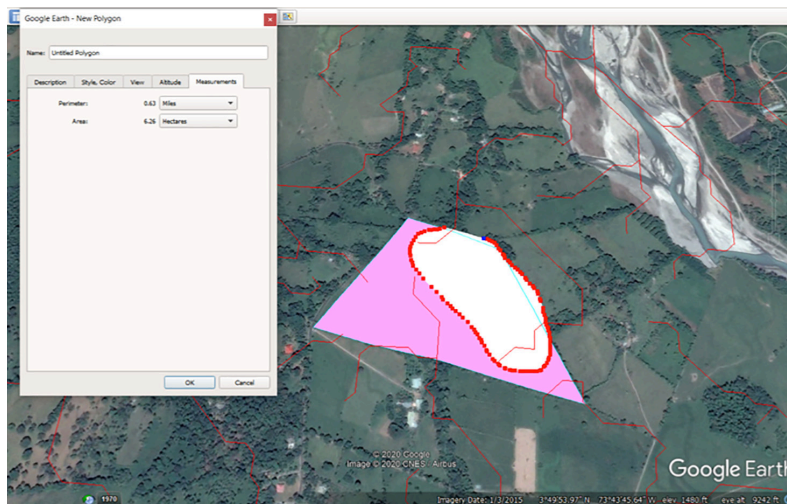


Figura 9. Imagen tomada desde Google Earth.
Fuente: elaboración propia.

Por consiguiente, se dio lugar al desarrollo del diseño de las zanjas para llevar el agua de las vertientes principales a la mitad de la finca, y así maximizar el proceso de infiltración y evapotranspiración, como se observa en la figura 10.

Sin embargo, se obtuvieron solo dos vertientes principales provenientes del río Guamal, donde se evidencia que el recorrido de cada zanja es de un aproximado de 355 metros.

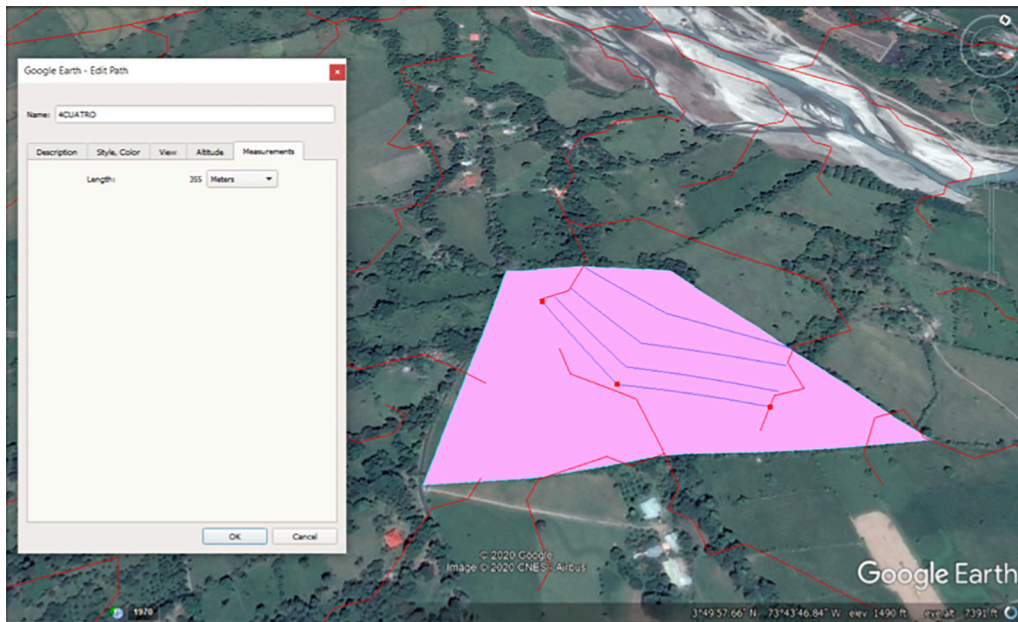


Figura 10. Imagen tomada desde Google Earth.
Fuente: elaboración propia.

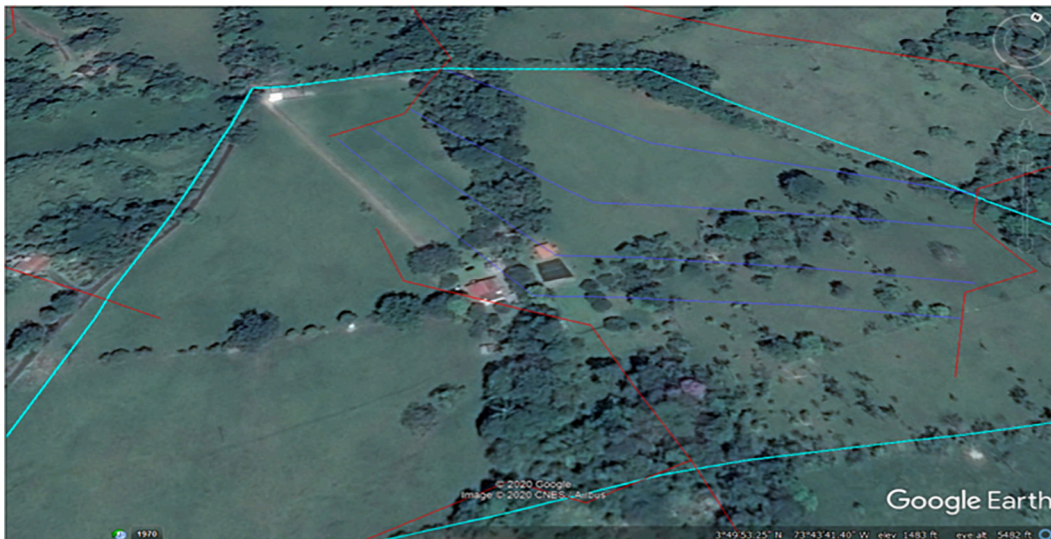
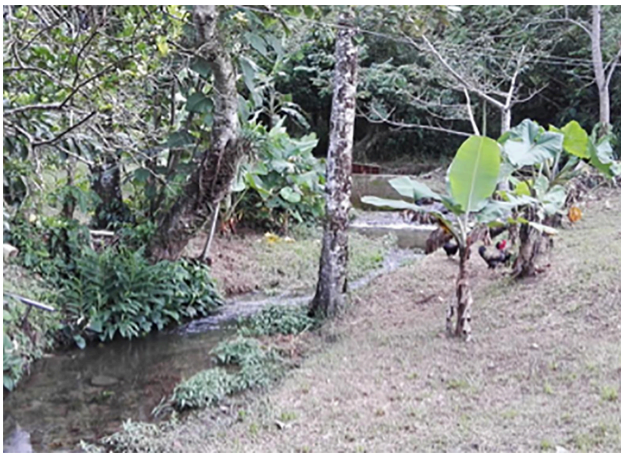


Figura 11. Imagen tomada desde Google Earth.
Fuente: elaboración propia.

Cabe resaltar que el área de captación número uno está construido sobre el terreno, como se puede observar en la figura 13, con el propósito de extraer agua de la quebrada, enseñada en las figura 12 y 14, para implementar un pequeño cultivo de mojarra.

Por lo tanto, mediante la aplicación Qgis se determinaron las dos áreas de captación en el terreno específico, la primera área, que consta de 4.133m² de área, observada en la figura 15, es la más pequeña en donde se desarrollará un cultivo de mojarra; la segunda área de captación se terminó en otra vertiente que se puede visualizar

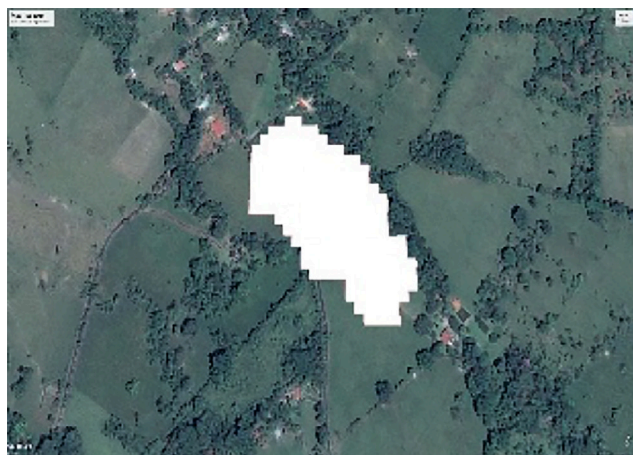
en las figuras 16 y 17, la cual resultó ser un área más amplia al contar con 33.594 m², así pues será destinada a implementar actividades económicas que serán base fundamental para el suministro de los hogares aledaños y del ganado. El propósito de la identificación de las áreas de captación es determinar las zonas óptimas para la creación del embalse y así reducir el costo del recibo del agua que se puede ver reflejado mensualmente en los pagos de este servicio, además de aminorar el impacto que genera la ausencia del recurso hídrico en época de sequía, debido a que los habitantes de la región dependen de este servicio ecosistémico.



Figuras 12 y 13. Imágenes representativas de la construcción.
Fuente: elaboración propia.



Figura 14. Imagen representativa de la quebrada.
Fuente: elaboración propia.



Figuras 15, 16 y 17. Imágenes tomadas desde Google Earth..
 Fuente: elaboración propia.

Cobertura	Condiciones hidrológicas	Grupo de suelo			
		A	B	C	D
Pasto con árboles	Mala	55	73	82	86
Pasto con árboles	Buena	20	48	65	73
Diferencia en 5% escurrimiento al pasar de Mala a Buena		35	25	17	13

Tabla V. Cambio en el escurrimiento para diferentes grupos de suelo según cobertura
 Fuente: [13].

También, para maximizar la infiltración en La Aurora y así tener una gran reserva de agua en el embalse, se determinó el tipo de suelo existente en la finca, siendo este tipo c (arcilloso medio), con lo cual se logró estimar la cantidad de agua en litros que se pueden infiltrar por año, ya sea con una cobertura baja en árboles o con una que cuente con más de 50 % de maderables en ambas áreas de captación estimadas, estos datos se pueden observar en las figuras 18 y 19. De acuerdo con esto, el plan será sembrar árboles en las diferentes cuencas localizadas, debido a que en el área de captación más pequeña evidenciada en la figura 15 se recolectan 350 litros y en el área de captación más grande, que se observa en las

figuras 16 y 17, se pueden almacenar hasta 3000 litros, por lo tanto, si se logra crear los embalses en las áreas de captación predispuestas se tendrá una reserva de agua de aproximadamente 3350 litros, los cuales serán correctamente aprovechados especialmente durante la época de verano para así mitigar los impactos de la sequía y aminorar el valor económico que se debe pagar por hacer uso de este recurso. Cabe resaltar, que el agua de los embalses es proveniente de la quebrada que pasa por la finca La Aurora, no obstante, esta cuenca no se verá afectada, puesto que, la cantidad de agua que será encaminada es para reserva subterránea y una vez satisfaga su capacidad, el agua seguirá su ciclo a través de esta.

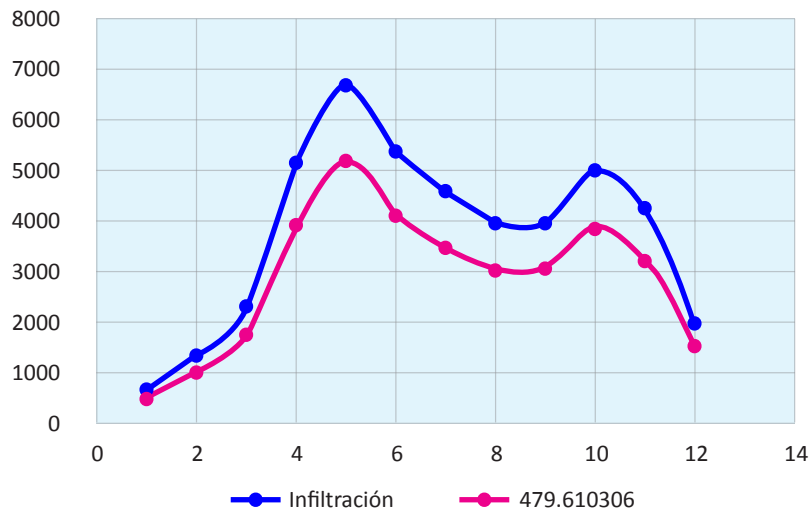


Figura 18. Infiltración en la segunda área de captación (33.594 m²).
 Fuente: elaboración propia.

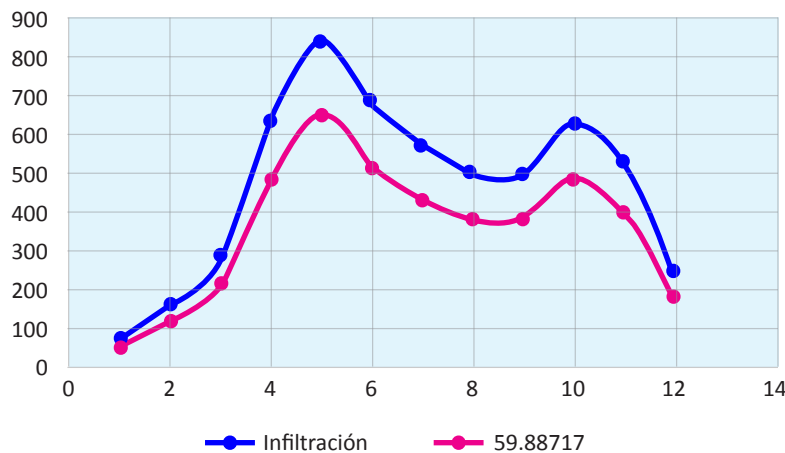
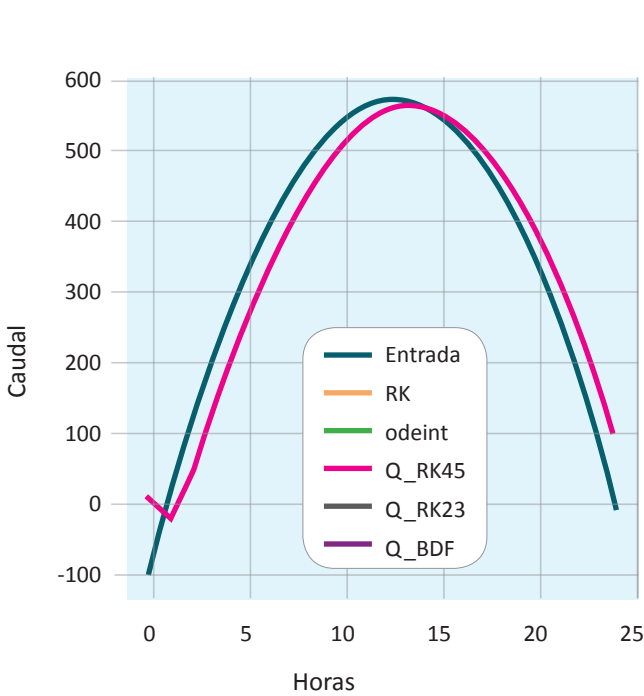


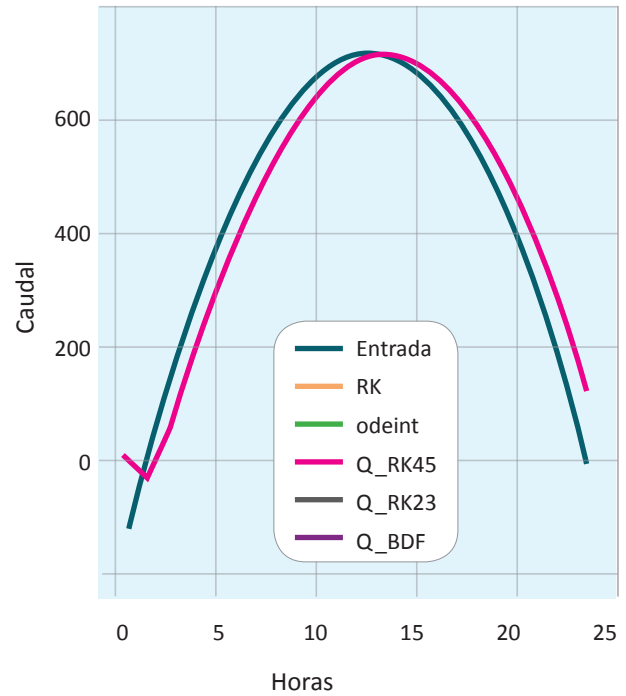
Figura 19. Infiltración en la primera área de captación (4.133m²).
 Fuente: elaboración propia.

Por lo cual, se realizó el trabajo de estimar cuántos litros de agua lluvia por horas al día se destinaban a escorrentía en el área total de la finca, tomando información proveniente del Ideam en la estación meteorológica de Villavicencio, sin embargo, se debió organizar la información

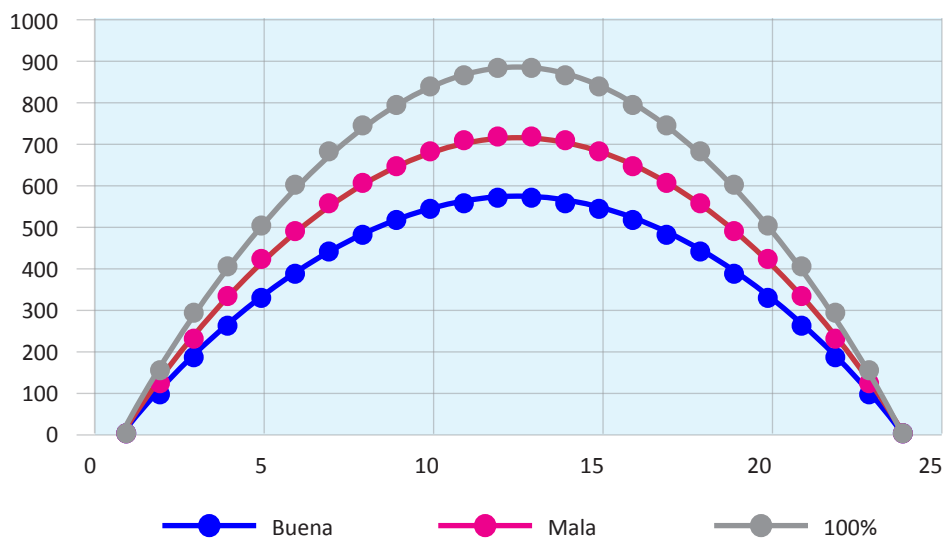
con el uso de los programas de Python y Excel. Dado esto, se observó cuál sería la diferencia con buena cobertura (figuras 20 y 22), mala cobertura (figuras 21 y 22), y sin infiltración alguna (figura 22), en la superficie del área de captación.



Figuras 20. Buena cobertura.
 Fuente: elaboración propia.



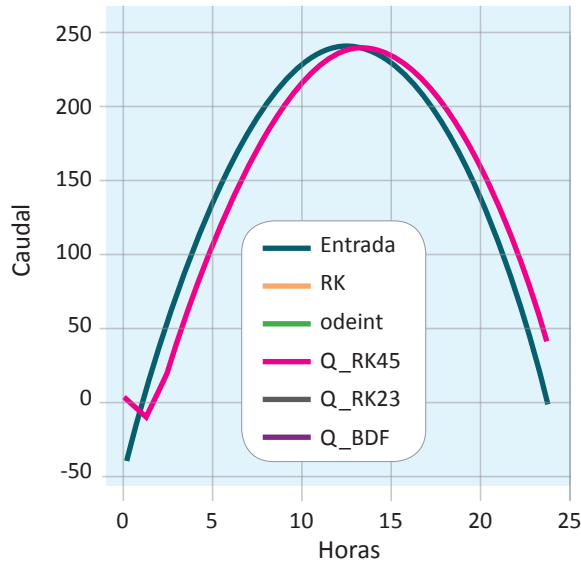
Figuras 21. Mala cobertura.
 Fuente: elaboración propia.



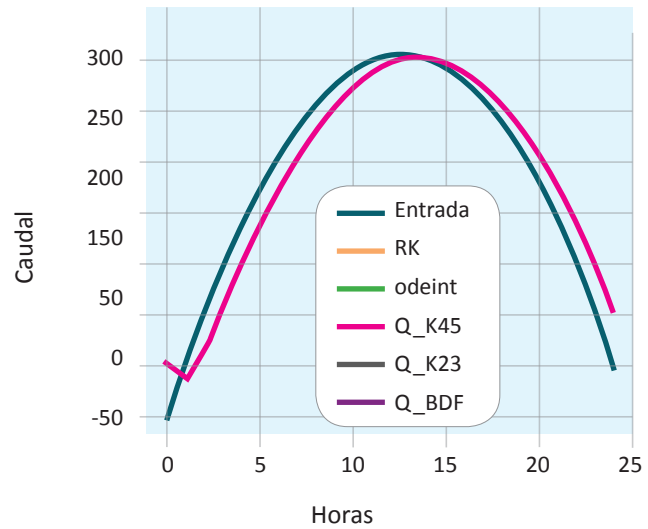
Figuras 22. Comparación entre tipos de cobertura.
 Fuente: elaboración propia.

Además, se realizó la comparación de cuántos litros de agua a lluvia por horas al día se destinaban a escorrentía en el área de la cuenca según la estación meteorológica “Caño Hondo” de

Guamal, de igual manera se observó cual sería la diferencia con buena cobertura (figura 23) y mala cobertura (figura 24) en la superficie del área de captación.



Figuras 23. Buena cobertura.
 Fuente: elaboración propia.



Figuras 24. Mala cobertura.
 Fuente: elaboración propia.

En este resultado se puede evidenciar que al mejorar la cobertura del terreno mediante la siembra de maderables se maximiza en un 20 % la infiltración de agua, es decir habrá una mayor recarga del acuífero, sin embargo, aún se presentará escorrentía (pero no en la misma magnitud), por lo tanto, el agua que descien- de a causa de este fenómeno será dragada y

almacenada en los embalses para aprovecharla en diferentes necesidades.

Para finalizar se hace una comparación entre la cantidad de agua infiltrada en la superficie con maderables y la superficie sin maderables, y expresar su productividad en términos de ahorro monetario.

Cobertura con árboles	Infiltración anual en litros/ (ha)	Aumento al mejorar cobertura
Buena	301.560.000	163.800.000
Mala	137.760.000	

Tabla VI. Comparación infiltración anual
 Fuente: elaboración propia.

Como se pudo representar y observar en la tabla IV se aumenta más del doble de la cantidad estimada en el proceso de infiltración, esto teniendo en cuenta que el metro cúbico es cobrado a 456 pesos, respecto al terreno de 140.000 m² que tiene la finca, por consiguiente se tendría disponible un monto de 74'692.800 pesos en agua lluvia, únicamente al encauzarla y recolectarla, lo que genera beneficios para el subsuelo y las afluentes que pasan por este terreno, en pocas palabras hay una mejora en todos los aspectos posibles, al tratarse de restablecer la cobertura de maderables en este terreno.

VII. CONCLUSIONES

Considerando el 32 % de la evapotranspiración, que puede ser medida por un modelo con una herramienta como Qswat, y el 68 % de la escorrentía del terreno, el porcentaje de la infiltración va a aumentar considerablemente, y da como resultado una recarga de 2154,26 mm/año, teniendo en cuenta que las precipitaciones promedio por año son de 984.8 mm/año. Por lo tanto, para el aprovechamiento de agua lluvia se propone la idea de crear un embalse, como método artificial, con el fin de recoger el agua de escorrentía en una parte del terreno, en otras palabras, para poder obtener provecho de las aguas que no se infiltran en el terreno, que tiene un área aproximada de seis hectáreas.

Asimismo, se estableció un cambio en las coberturas de los terrenos para así tener la facultad de desarrollar reservas importantes de este recurso en el subsuelo, que lleguen a alimentar humedales y ríos en temporada de sequía, para que se mitigue el impacto en todos los sectores productivos [14].

Se realizó la comparación del agua que se infiltra en el subsuelo, con la siembra de árboles en la totalidad del área del terreno con la cobertura actual que se tiene, además se evidencia un gran ahorro económico, aproximadamente de 74 millones de pesos al año, al tomar como referencia el valor del agua en el recibo de este servicio en la finca.

La herramienta Qgis permite el aporte de detalles a cualquier modelo que da disponibilidad de tener visión de un terreno en una amplia escala, para así dar opción para tomar decisiones que puedan maximizar el aprovechamiento de agua lluvia en un proyecto con fines productivos.

El agua lluvia es un recurso que se debe tener en cuenta para la planificación de cualquier proyecto, esto gracias a las herramientas del sistema de información geográfica, que dan la posibilidad de hacer diseños a bajo costo a la hora de tomar dictámenes finales.

Se requieren datos precisos en la hidrología computacional y los modelos de simulación, por lo que es necesaria una investigación previa para los procesos de infiltración, evapotranspiración y dinámica subterránea en el campo con diferentes coberturas, con el fin de tener datos reales para establecer modelos para el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] F.J. Gaspari, G.E. Senisterra y R.M. Marlats, "Relación precipitación - escorrentía y número de curvas bajo diferentes condiciones de uso de la cobertura del suelo aplicada a una cuenca modal del Sistema Serrano de la Ventana". *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias-Universidad Nacional de Cuyo*, vol. 34, no. 1, pp. 21-28, 2007.
- [2] A. Velázquez, A. Torres y G. Bocco (comps.), *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*. México, Semarnat, Instituto Nacional de Ecología, México, 2004.
- [3] J. Sánchez, G. Bocco, J. Fuentes y A. Velázquez, *Análisis de cobertura y uso del terreno en el contexto de su dinámica espacio-temporal*. México, Instituto Nacional de Ecología, 2003.
- [4] M. Aguayo, A. Pauchard, G. Azocar y O. Parra, "Cambio de uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje", *Revista Chilena de Historia Natural*, no. 82, pp. 361-374, 2009.
- [5] F. López Cadenas de Llano, *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Madrid, Ed. Tragsa. Madrid, 1998.
- [6] J. C. González, *La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica*. Bogotá, Universidad Católica de Colombia, 2014.

- [7] G. Poveda y O. J. Mesa, “Efectos hidrológicos de la deforestación”, *Energética*, no. 16, pp. 91-102.
- [8] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), “Sistema de monitoreo de bosques y carbono. Detección temprana de deforestación”. *Boletín 21*, Cuarto trimestre, 2019.
- [9] E. Corredor, J. Fonseca y E. Páez, “Los servicios ecosistémicos de regulación: tendencias e impacto en el bienestar humano”, *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 3, no. 1, pp. 77-83, 2012.
- [10] G. A. Forero, “La madera Colombiana, oportunidad de regeneración del flujo de los ríos mediante una producción sostenible y competitiva,” *Rev. Tecnol.*, vol. 15, no. 2, 2017. doi: 10.18270/rt.v15i2.2179.
- [11] G. A. Forero, J. C. Ramírez y G. A. Ramírez, “Propuesta de almacenamiento de agua lluvia para suministrarla al municipio de Albán utilizando HEC-GeoHMS”, *Av. Investig. en Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 1-25, 2020. doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.6031.
- [12] G. A. Forero, “Dimensionamiento de canales y embalses para conducir y almacenar agua lluvia para abastecer la población de Altos de Cazucá (Soacha-Colombia) utilizando D.E.M.”, *Rev. Tecnol.*, vol. 16, no. 1, p. 113. 2018. doi: 10.18270/rt.v16i1.2320.
- [13] L.W. Mays, *Water Resources Engineering 3rd Edition*. Arizona, Wiley, 2019.
- [14] G. A. Forero, “Dimensionamiento de embalses para fincas en Colombia usando como herramienta los modelos de elevación digital”, *Rev. Tecnol.*, vol. 15, no. 1, pp. 129-138. 2017. doi: 10.18270/rt.v15i1.2044.