



DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS EN UN CULTIVO DE CAFÉ, EN ETAPA PRODUCTIVA, CON BASE EN EL CONOCIMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO.

MYRIAM CAÑÓN HERNÁNDEZ

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas
Maestría desarrollo sostenible y medio ambiente
Manizales, Colombia
Año 2018



DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS EN UN CULTIVO DE CAFÉ, EN ETAPA PRODUCTIVA, CON BASE EN EL CONOCIMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO.

Myriam Cañón Hernández

Cohorte XII

Tesis de Grado para optar al título de:

Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:

Nelson Rodríguez Valencia, Ph.D

Línea de Investigación:

Biosistemas Integrados

Director: Dr. Jhon Fredy Betancur

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas

Maestría desarrollo sostenible y medio ambiente

Manizales, Colombia

Año 2018

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Dios nos muestra los caminos que te ayudan a vivir en su gracia y cada momento. Para el que quiere no existe lo imposible, no hay derrotas, sólo el poder de la victoria.

Donde la gratitud da sentido a nuestras vidas, en el pasado, presente y futuro; una visión diferente, ya que soy lo que soy por el gran amor de Dios, mi familia y de todas esas personas maravillosas que encontramos a lo largo de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Escribir nombres no es fácil, ya que todos los que han intervenido de una u otra forma en este trabajo merecen reconocimiento y gratitud. Pero en especial al Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFÉ, por darme la oportunidad en todo sentido a lo largo de la Maestría.

Quiero expresar mis más sinceros reconocimientos a:

La Dra. Ángela María Castaño Marín, por su apoyo en la realización de este estudio.

Al Dr. Juan Carlos García López, Coordinador de la Disciplina de Agroclimatología de Cenicafe, por sus aportes, compromiso como profesional y ser humano.

Al Dr. Nelson Rodríguez Valencia, por su paciencia y dedicación en aportar cada día a la ciencia, que busca siempre la sostenibilidad Ambiental.

A mis compañeros de trabajo en la EE Paraguaicito, Daniel Antonio Franco, y Jeison Fredy Penagos, por su dedicación que contribuyó para que este proceso de investigación llegara a buen puerto.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS	9
RESUMEN	10
SUMMARY.....	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
3.1. Pregunta de investigación.....	17
4. OBJETIVOS.....	18
4.1 . Objetivo general.....	18
5. HIPÓTESIS DE TRABAJO	19
6. MARCO TEÓRICO.....	20
6.1 . Marco contextual	20
6.1.1 Ciclo hidrológico	20
6.2 . Marco conceptual.....	23
6.2.1 Precipitación.....	23
6.2.2 Interceptación	24
6.2.3 Escorrentía.....	25
6.2.4 Infiltración	26
6.2.5 Transpiración	27
6.2.6 Evaporación	27
6.2.7 Evapotranspiración.....	28
6.2.8 Evapotranspiración de referencia (ET _o).....	29
6.2.9 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET _c).....	30
6.2.10 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET _{c aj})	31
6.2.11 Coeficiente único del cultivo (K _c).....	31
6.2.12. La importancia del agua en el sector cafetero (Rojas <i>et al.</i> , 2018)	32
6.3. Marco normativo	33

7. MATERIALES Y MÉTODOS	37
7.1. Localización – condiciones de clima	37
7.2. Descripción de las características del suelo.....	37
7.3. Descripción del lote experimental	39
7.4. Variables hidrológicas	40
7.5. Análisis de la información	44
7.6. Prueba de hipótesis	45
7.7. Descripción metroológica	46
7.8. Análisis estadístico.....	47
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
8.1. Condiciones del suelo de los predios hidrológicos	48
8.2. Medición del contenido de humedad volumétrica del suelo	49
8.3. Comportamiento de la Lluvia externa (P)	52
8.4. Comportamiento de la Lluvia neta (Lln) con relación a la Lluvia externa (Lle)	54
8.5. Relación entre la lluvia neta y la percolación.....	56
8.6. Relación entre la lluvia neta y la esorrentía	57
8.7. Relación entre la lluvia efectiva y la evapotranspiración real del cultivo.....	59
8.8. Respuesta a la pregunta de investigación.....	65
8.9. Corroboración de la hipótesis de trabajo.....	67
9. CONCLUSIONES	69
10. REFERENCIAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evapotranspiración de cultivo de referencia. FAO 2006.	30
Figura 2 Representación de Lisímetro gravimétrico instalado en los predios hídricos (PH).	42
Figura 3 Porcentaje de eventos diurnos y nocturnos de la Lluvia externa (P), de acuerdo con sus valores decadiarios.	53
Figura 4 Relación entre la Lluvia neta y la percolación en cada parcela.	57
Figura 5 Lluvia neta integrada en relación a la escorrentía de parcelas en evaluación del balance hídrico (Riego_1 y Riego_2), establecidas en un cafetal a libre exposición solar en etapa reproductiva.	59
Figura 6 Balance hídrico en un cafetal sembrado a libre exposición solar en etapa reproductiva, bajo condiciones se secano y riego. Las barras grises en las parcelas riego 1 y riego 2, indican el suplemento de agua a través de riego por goteo, cuando la humedad del suelo estaba por debajo de la capacidad de campo.	62
Figura 7 Contenido de agua en el suelo en fracción volumétrica medición de balance hídrico en un cafetal sembrado a libre exposición solar en etapa reproductiva. *CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente	64
Figura 8 Valores de evapotranspiración real acumulada quincenal (ET _c) con relación a la ET _o	64
Figura 9 K _c de un cafetal sembrado a libre exposición solar en etapa reproductiva.	65
Figura 10 Descripción del comportamiento de la lluvia neta con riego (lámina de agua), evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del cultivo	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas del suelo de estudio en cada una de las parcelas de estudio de acuerdo con los resultados del laboratorio de Suelo Asayma S.A.S – Palmira Valle del Cauca.....	50
Tabla 2 Características Químicas de cada parcela experimental de acuerdo con resultados del laboratorio de Suelo Asayma S.A.S Palmira Valle del Cauca. ...	51
Tabla 3 Contenido de humedad volumétrica del suelo en predios de escorrentía.	51
Tabla 4 Calificación de la conductividad hidráulica saturada.	52
Tabla 5 Valores de distribución de la lluvia externa mensual, % diurnos y % nocturnos.	53
Tabla 6 Frecuencia del Comportamiento de lluvia diurna y nocturna por rangos en mm.....	54
Tabla 7 Rangos de lluvia externa con relación a la lluvia neta	55
Tabla 8 Valores de Lluvia Neta (LIn) con Relación a la LluviaExterna (P) y valores y porcentajes de la lluvia interceptada (I).....	55
Tabla 9 Distribución de la lluvia neta más riego con relación a la escorrentía ...	59
Tabla 10 Descripción del comportamiento de la humedad del suelo con y sin riego (lámina de agua), en función de la lluvia neta y la evapotranspiración del cultivo.	63

RESUMEN

Con el propósito de generar estrategias que permitan optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico en la producción cafetera, se determinaron las necesidades hídricas del café de Colombia, en la etapa productiva, con base en el balance hídrico calculado en la Estación Experimental Paraguaicito de Cenicafé, en un lote de *Coffea arabica*, variedad Castillo Paraguaicito® de 36 meses de edad, sembrado a libre exposición solar en un área de 2 Ha. La determinación del balance hídrico se realizó en 3 parcelas, cada una con un área de 9 m² y 6 árboles de café, sembrados a una distancia de 1,4 m x 1,0 m. Dos de las parcelas se mantuvieron a capacidad de campo. La tercera parcela sirvió como testigo y se mantuvo bajo condiciones de secano (sin riego).

La presente investigación permitió determinar, en promedio, que a las parcelas hidrológicas ingresó una lluvia externa de 1404 mm en los 7,5 meses de monitoreo del experimento, de la cual se convirtió en lluvia neta (que llegó al suelo), entre el 84 y el 100%, y la lluvia interceptada por los árboles de café varió entre el 0,3 y el 6,8% de la lluvia que ingreso al predio. La percolación representó entre el 42,8% y el 43,3% de la lluvia neta que llegó al suelo (entre el 46,5% y el 47,07% de la lluvia externa). La escorrentía representó entre el 3,2% y el 5,4% de la lluvia neta que llegó al suelo (entre el 3,5% y el 5,9% de la lluvia externa).

A partir del análisis físico se definió que, en las parcelas, a la profundidad de 30 cm se presentan límites del punto de marchitez permanente y de la capacidad de campo en contenidos volumétricos de suelo de 78 y 103,5 mm, respectivamente, lo cual le confiere, al suelo, una capacidad de almacenamiento de 25,5 mm.

Se determinó, en promedio, que en las parcelas experimentales la evapotranspiración de referencia fue 1080 mm en los 7,5 meses que duró la experimentación, siendo el valor de la evapotranspiración del cultivo de 905 mm, con un uso consuntivo de agua de 0,84 el valor de la evapotranspiración de referencia, a través del coeficiente de cultivo (K_c), el cual varió entre 0,77 y 0,95.

El riego realizado durante la experimentación, cuando la humedad del suelo estuvo por debajo del punto de marchitez permanente fue de 348 mm, es decir, el 25% de la oferta hídrica de la zona en forma de lluvia externa.

Algunas estrategias para optimizar el uso del agua en la etapa productiva del cultivo son: Aumentar la densidad de siembra por área, Establecer sistemas agroforestales con el café, Mantener la cobertura del suelo utilizando coberturas muertas, Almacenar agua lluvias, Reusar las aguas residuales tratadas.

Palabras clave: Balance hídrico, cultivo de café, coeficiente de cultivo, agua en la caficultura.

SUMMARY

In order to generate strategies to optimize the use of water resources in coffee production, the water needs of Colombian coffee were determined during the production stage, based on the water balance calculated at the Experimental Station Paraguaicito de Cenicafé, in a batch of *Coffea arabica*, variety Castillo Paraguaicito® 36 months old, planted to free sun exposure in an area of 2 Ha. The determination of the water balance was made in 3 plots, each with an area of 9 m² and 6 coffee trees, planted at a distance of 1,4 m x 1,0 m. Two of the plots were maintained at field capacity. The third plot served as a witness and remained under rainfed conditions (without irrigation).

The present investigation made it possible to determine, on average, that hydrological plots received an external rainfall of 1404 mm in the 7,5 months of monitoring of the experiment, from which it became net rain (which reached the ground), among 84 and 100%, and the rain intercepted by the coffee trees varied between 0,3 and 6,8% of the rainfall that entered the premises. The percolation represented between 42,8% and 43,3% of the net rain that reached the ground (between 46,5% and 47,07% of the external rain). The runoff represented between 3.2% and 5.4% of the net rain that reached the ground (between 3,5% and 5,9% of the external rainfall).

From the physical analysis it was defined that, in the plots, at the depth of 30 cm there are limits of the permanent wilting point and the field capacity in volumetric soil contents of 78 and 103,5 mm, respectively, which it confers, on the ground, a storage capacity of 25,5 mm.

It was determined, on average, that in the experimental plots the reference evapotranspiration was 1080 mm in the 7,5 months that the experimentation lasted, being the value of the crop evapotranspiration of 905 mm, with a consumptive use of water of 0,84 the value of the reference evapotranspiration, through the cultivation coefficient (Kc), which varied between 0,77 and 0,95.

Irrigation carried out during the experimentation, when the humidity of the soil was below the point of permanent wilting was 348 mm, that is, 25% of the water supply of the area in the form of external rain.

Some strategies to optimize the use of water in the productive stage of the crop are: Increase planting density per area, Establish agroforestry systems with coffee, Maintain soil cover using dead coverages, Store rainwater, Reuse treated wastewater.

Keywords: Water balance, coffee cultivation, crop coefficient, water in coffee growing

1. INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos para satisfacer las necesidades de una población que mantiene un crecimiento a nivel mundial, está obligando al mejoramiento en el uso adecuado y racional del agua. Según la FAO aunque se prevé una disminución del uso del recurso destinada para el riego para 2030, en comparación con los registros de la década de los noventa, en algunas zonas del planeta existirá escasez de agua que será progresiva. Específicamente en Colombia, según las proyecciones del IDEAM, al 2022 los subsectores con los más altos incrementos en el uso del agua son el agrícola y la piscicultura, conjuntamente con los sectores de hidrocarburos minería y generación de energía (Rojas *et al.*, 2018).

Al revisar el Balance Hídrico (BH), como el agua que se encuentra en movimiento cíclico continuo, se conoce que es cuantificable y debido a los requerimientos actuales del hombre es necesario conocer con exactitud ese movimiento y definirlo, para aprovechar de forma racional los recursos hídricos y que no se modifiquen de forma irreversible.

El ciclo hidrológico se puede describir como las entradas y salidas en un sistema general de movimiento de aguas, y puede pasar primero por la evaporación, seguido de la precipitación y después en forma de escorrentía superficial o subterránea y como se trata de un ciclo, podría tenerse un punto de partida desde cualquier fase.

Para el sector agrícola y en el caso particular para el cafetero, es de gran relevancia conocer los requerimientos hídricos en las diferentes etapas del cultivo, debido a que el agua es un recurso finito y vulnerable que debe utilizarse

eficientemente. El aporte hídrico es fundamental en todas las etapas del desarrollo del cafeto, y en algunas de ellas es crítico. Por lo tanto, la humedad del suelo es una de las variables más importantes que determina la cantidad y calidad de la cosecha.

La presente investigación tuvo como objetivo determinar las necesidades de agua el cultivo de café en etapa productiva a partir de la cuantificación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) a través de la medición directa de las variables asociadas al balance hídrico en campo.

Este estudio contribuye a la generación de estrategias para la sostenibilidad del recurso hídrico a través del conocimiento del uso consuntivo del agua para el cultivo de café, establecido en condiciones de la zona cafetera colombiana y se constituye en una herramienta útil para la planificación del uso eficiente del agua.

2. JUSTIFICACIÓN

El agua es una sustancia esencial para la vida y forma parte de la estructura y el metabolismo de los seres vivos, como moderadora del clima, fuente de energía e interviene directa o indirectamente en numerosas actividades humanas (Jaramillo-Robledo, 2005). El anterior criterio se convierte en parte determinante para la economía y sostenibilidad cafetera de nuestro país, donde se hace inevitable conocer o determinar las diferentes necesidades del cultivo entre ellas las hídricas.

Son grandes los retos a los que se enfrenta la sociedad, en lo individual y lo colectivo, en términos de definición de pautas, lineamientos y normativas, para que en el futuro, desde diferentes temáticas, se aporte de manera importante y se avance en el conocimiento de este recurso vital, de tal manera que se promuevan e implementen mecanismos para hacer más eficiente su uso y conservación. Se requiere de diferentes estrategias para abordar la problemática actual y generar las soluciones de acuerdo a las condiciones y necesidades específicas de cada territorio (Rojas *et al.*, 2018).

El sector cafetero colombiano, que ocupa la mayor área sembrada en el país, por encima de las 900.000 Ha, ha mantenido un interés por el uso y conservación de los recursos naturales. Específicamente con relación al agua, desde la década de los 90, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia a través de Cenicafe ha generado tecnologías para la reducción del consumo del agua. Actualmente son diferentes los métodos disponibles para reducir el consumo: el despulpado sin agua, el transporte de la pulpa sin agua y el lavado y clasificación con tanque-tina, Becolsub y Ecomill®. Así mismo, son notorios los desarrollos para reducir la contaminación en el agua utilizada en el beneficio del café, mediante los Sistemas Modulares de Tratamiento de Agua – SMTA, las fosas de reúso y los filtros verdes

(Rojas *et al.*, 2018).

Por lo tanto, estudiar el ciclo del agua en un ecosistema implica describir todos los procesos de transferencia dentro del mismo: la cantidad de agua que ingresa al ecosistema, la cual depende como lo describe (Jaramillo-Robledo & Cháves-Córdoba, 1999) del régimen de lluvias y está asociada a la posición geográfica de la región, la circulación planetaria de las masas de nubes, del aire, las temperaturas y la vegetación entre otros factores. Estas variables hidrológicas que son estimadas de forma independiente no determinan un patrón de lluvia ni su distribución en diferentes coberturas vegetales, debido a las diferentes características, en relación al suelo, planta, y su evolución de forma natural y clima, que hacen pertinente conocer su relación en los ecosistemas (Velásquez-Franco & Jaramillo-Robledo, 2009a).

Debido a lo anterior, es importante establecer las relaciones entre las variables que componen el balance hídrico, a partir de las mediciones en campo en el cultivo de café, con el fin de obtener funciones matemáticas que expliquen la dinámica de las entradas de agua al sistema de producción. Además, teniendo en cuenta que la evapotranspiración del cultivo es una variable difícil de medir y poco evaluada en el sistema productivo cafetero a libre exposición solar en etapa productiva para las condiciones tropicales, se hace necesaria su determinación como aporte al conocimiento del requerimiento hídrico de este cultivo.

El conocimiento del balance hídrico es fundamental para el uso eficiente del recurso, mejorando el desarrollo de los cultivos y en especial el de los cafetos en etapa productiva. La pérdida del recurso agua o su inadecuada distribución hace que el cultivo no cuente con los requerimientos necesarios, dificultado los procesos fisiológicos de la planta y por ende la producción.

3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La disponibilidad de agua es indispensable para alcanzar el desarrollo sostenible de las sociedades. El cambio climático, la variabilidad climática y la contaminación atmosférica influyen de forma directa en la disponibilidad del agua, cuya oferta espacio-temporal es variable. La agricultura es una de las actividades productivas que genera una mayor demanda de agua y es una de las principales actividades económicas en nuestro país. De acuerdo con los Estudios Nacionales del Agua 2010 y 2014, se ha presentado una disminución de la pluviosidad media en nuestro país pasando de 3000 mm/año en el 2010 a 2864 mm/año en el 2014. Los 136 mm de agua que dejaron de caer como lluvia, representaron como escurrimiento superficial cerca de 93 km³ de agua que hubieran permitido abastecer la población de nuestro país durante 34 años (Rodríguez *et al.*, 2018).

La mayor parte del área sembrada en café, en Colombia, se encuentra establecida en la macrocuenca Cauca-Magdalena, en donde se concentra alrededor del 70% de la población colombiana y cuenta sólo con el 13,5% de la oferta hídrica nacional. Por lo anterior, es de vital importancia el cuidado de los recursos hídricos de la región, a partir del uso racional del recurso agua en los procesos productivos y el reúso del agua como estrategia para disminuir la presión sobre el recurso superficial, no sólo en lo relacionado con la cantidad de agua presente en la cuenca (dado que se disminuye su extracción), sino también en lo relacionado con la calidad del agua en la cuenca (dado que al no arrojar aguas residuales se disminuye el deterioro de la calidad del agua en la fuente) (Rodríguez *et al.*, 2018).

Por lo anterior, no es viable la caficultura en esta región si se hace necesario realizar riego a partir del agua presente en las fuentes superficiales, dada la baja disponibilidad del recurso, pero para poder determinar las necesidades de riego

es necesario conocer las necesidades hídricas del cultivo a partir de la realización de balances hídricos que permitan determinar la evapotranspiración del mismo.

La evapotranspiración de las plantas está limitada por factores atmosféricos, del cultivo y la humedad del suelo. Por tal razón, se requiere conocimiento sobre las necesidades hídricas del cultivo de café, para este caso, en etapa productiva.

3.1. Pregunta de investigación

¿El implementar predios hidrológicos con y sin control de la humedad deficitaria del suelo y obtener los componentes del balance hídrico permitirá determinar las necesidades hídricas del cultivo de café en la etapa productiva?

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

- Determinar las necesidades de agua en el cultivo de café en etapa productiva a partir de la realización del balance hídrico.

4.2 Objetivos específicos

- Conocer la distribución de los componentes del balance hídrico en un cultivo de café en etapa de productiva.
- Calcular la Evapotranspiración del cultivo a través de la medición de los componentes de balance hídrico.
- Estimar el uso consuntivo del agua en el cultivo del café en etapa productiva sobre la base de los valores de la evapotranspiración y plantear estrategias para su uso eficiente.

5. HIPÓTESIS DE TRABAJO

“La demanda evapotranspirativa en la Estación Experimental Paraguaicito de Cenicafé, para un cultivo de café en producción a libre exposición solar, se satisface con una precipitación de al menos 6 mm diarios”.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Marco contextual

Balance Hídrico; su nombre o definición para muchos pueden ser simple, pero lograr su cuantificación no es tan fácil por la variación en ET (evapotranspiración), además la parte vegetal también actúa como barrera capaz de interceptar la precipitación, generando una variación en su efecto y distribución bajo el área que cubre, alterando los valores que determinan el aprovechamiento de la planta, la humedad del suelo, los aportes de agua por lluvia, las pérdidas por evapotranspiración, la retención de agua. Con todas estas variables se podría deducir las necesidades hídricas en un cultivo en etapa productiva y se hace necesario contar con conocimientos básicos que ayuden a dilucidar estas necesidades y establecer una aproximación.

Actualmente la variabilidad climática indica que se debe estructurar estas necesidades y con este conocimiento el productor agrícola podría garantizar el uso racional del agua necesaria para obtener el mayor beneficio en la productividad de su cultivo.

Para determinar la evapotranspiración de referencia (ETo), para el cálculo, y producir valores más consistentes con datos reales de uso de agua por diversos cultivos, se recomienda la adopción del método estandarizado combinado de Penman-Monteith (Allen, *et al.*, 2006).

6.1.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico puede ser imaginado como una gigantesca bomba de agua, la

cual es potenciada por la radiación solar, la gravedad, donde cada molécula de agua hace parte de este ciclo, el cual es continuo, y cualquier modificación en su circulación, distribución; por sus propiedades físicas y químicas, y su relación con el medio ambiente, lo afecta en su totalidad.

La (UNESCO, 1978), publicó un estimativo de 1386 millones de kilómetros cúbicos del agua aproximadamente que participa en el ciclo hidrológico, donde el 97,47% corresponde a agua salada y el 2,53% a agua dulce, de la cual 1,76% está compuesta por glaciares, nieve y humedad atmosférica, 0,76 % corresponde el agua subterránea y sólo el 0,008% está en ríos, lagos y pantanos y se considera disponible, es por ello que el agua es un recurso finito y vulnerable” (Cuellar & Duarte, 2001).

De otro lado, los patrones de asentamiento humano y los procesos de cambios en el uso del suelo, reforzados por el patrón de crecimiento económico, han alterado el funcionamiento del ciclo hidrológico, generando variabilidad en el uso del agua y por ende su disponibilidad. (Bruijnzeel, 2004) determina que el desarrollo de las plantaciones, su estado y su manejo, ejercen una influencia fuerte sobre la variación en las proporciones de los componentes del ciclo hidrológico. Los cambios más grandes sobre el rendimiento hídrico, asociados con las plantaciones, usualmente ocurren cuando el bosque natural es convertido a plantación y la escasez del agua es un punto fundamental para la implementación de estrategias en la agricultura, reducción en su uso y el aprovechamiento racional para la economía y seguridad.

La parte aérea de la vegetación juega un papel fundamental ya que tiene la propiedad de actuar como barrera capaz de interceptar las diferentes precipitaciones, variando su efecto y distribución bajo el área de su cobertura (Schnabel & Mateos Rodríguez, 2000). Por lo cual la capacidad de campo del

suelo está ligada al paso de la precipitación a través de la vegetación. La vegetación arbórea ejerce una marcada influencia sobre la cantidad y redistribución de la lluvia. Una parte de la precipitación total en un ecosistema es retenida por las copas y troncos de los árboles (interceptación del dosel), y reintegrada a la atmósfera por evaporación. Del agua que alcanza el piso, una fracción proviene del goteo de las hojas, otra directamente de los espacios entre el dosel (precipitación directa); el resto llega al suelo mediante los troncos (Hanchi & Rapp, 1997).

De la lluvia neta (aquella que alcanza la superficie del suelo), una parte se evapora, una proporción corre superficialmente (escorrentía), otra es retenida por el suelo (humedad del suelo) o pasa a través del perfil del suelo (percolación) (Jaramillo-Robledo & Cháves-Córdoba, 1999). Una fracción de la lluvia neta es absorbida por las raíces y luego transpirada por las plantas.

En general, los ecosistemas forestales interceptan una fracción importante del agua de lluvia que no llega al suelo y cuentan con un sistema radicular capaz de absorber mayor cantidad de agua que otros cultivos (Lin, 2010).

Son varios los factores que intervienen en el proceso de redistribución de la lluvia dentro de un sistema vegetal y la cantidad de precipitación interceptada por las plantas varía con el tipo de hoja, la arquitectura del dosel, la velocidad del viento, la radiación disponible y la humedad de la atmósfera (Chen et al., 2016). A su vez, una variable definitiva en la dinámica de redistribución e interceptación de la lluvia es la capacidad de almacenamiento del dosel, definida como la cantidad de agua que permanece en el dosel sin evaporarse, en contra de la gravedad, luego de terminar la lluvia y cesar el goteo (Klaassen, Bosveld, & De Water, 1998), esta depende de las características de la superficie foliar y de la cubierta vegetal (Division & Collins, 2000).

En estudios realizados los ecosistemas están expuestos a diferentes perturbaciones naturales y antrópicas que afectan en diferentes magnitudes los Balances de Radiación solar, de energía, hídricos y de nutrientes (Bruijnzeel, 2004).

Ensayos realizados por (Veneklaas, 2009) sugieren que la abundancia de plantas epífitas en el dosel del bosque también interviene en la dinámica de los procesos hidrológicos. En términos generales, las modificaciones en las proporciones de agua interceptada por la vegetación originan cambios en las relaciones en el balance hídrico, especialmente en los volúmenes del agua de escorrentía, de infiltración y en la cantidad almacenada en el suelo (Jaramillo-Robledo & Cháves-Córdoba, 1999), y si bien las ganancias o pérdidas de agua del suelo se equilibran a largo plazo, la reserva hídrica fluctúa en respuesta al desequilibrio de corto plazo entre oferta y demanda de agua, que por lo común obedece a variaciones en el régimen de lluvias (Dziegielewski, B., & Baumann, 2011).

6.2. Marco conceptual

6.2.1 Precipitación

En meteorología la precipitación hace referencia a depósitos de agua sólida o líquida que proviene de la atmósfera, en forma de lluvia, nieve, granizo, rocío y neblina. Lluvia se refiere al depósito de agua líquida, y la temperatura, interviene para que las gotas de agua o cristales coalescen, hasta que por su peso y la acción de la gravedad se precipitan a la tierra (Jaramillo-Robledo, 2005). Según estadísticas de la (UNESCO, 1978), se precipitan cerca de 119.000 km³ de agua al año y de estas cerca de 45.000 km³ son transportadas al mar por medio de los ríos y unos 2.000 km³ por los glaciares. De los 45.000 km³ de agua que caen al

suelo, su utilización se torna inadecuada en algunas ocasiones y hace que estas reservas se agoten alterando, ecosistemas por su contaminación y su uso, debido al aumento de la población, el desarrollo industrial y la producción agrícola en los últimos años.

Sin embargo, la disponibilidad del agua depende de las precipitaciones, y su variabilidad. La lluvia al ingresar a un ecosistema presenta variaciones temporales y espaciales dependiendo de su régimen, la posición geográfica de la región, la temperatura, la vegetación, la circulación planetaria de las masas de nubes y aire (Zona de Convergencia Intertropical – ZCIT), entre otros factores (Fassbender, H.W.; Grimm, 1981).

6.2.2 Interceptación

La interceptación es el agua retenida por las hojas y se ha definido como la parte del agua que ingresa al ecosistema, en forma de lluvia, rocío, granizo, neblina y es retenida por las plantas, y se conoce como precipitación incidente, que es agua que cae sobre la cubierta de los árboles, e hidrológicamente es agua que retorna a la atmósfera por evaporación, en función de la temperatura y la radiación solar, es decir, no alcanza el suelo (Fassbender, H.W.; Grimm, 1981); por lo tanto esta fracción de agua no se aprovecha por las plantas, debido a que no alcanza la zona de raíces.

La interceptación también es uno de los mayores componentes de interés en el ciclo hidrológico depende de la cantidad de agua incidente, la intensidad de la lluvia, la distribución, el índice de área foliar, el tipo de vegetación. Para (Cortical *et al.*, 2002) las estimaciones efectuadas ponen de manifiesto la importancia de la interceptación y su influencia en la disponibilidad de agua para las plantas que

originan cambios en las relaciones en el balance hídrico, especialmente en los volúmenes de agua de escorrentía, de infiltración y en la cantidad de agua almacenada en el suelo.

6.2.3 Escorrentía

La escorrentía es la parte de la precipitación que llega al suelo y fluye sobre la superficie del terreno, sin infiltrarse hacia las capas profundas del suelo para llegar a los cauces, alimentando a los corrientes superficiales (Bruijnzeel, 1990). Del concepto de la Escorrentía se deriva varios tipos como: la escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea. Para la Escorrentía Superficial se establece que en ningún momento se infiltra moviéndose sobre el suelo por acción de la gravedad, esto dependiendo del tipo de suelo y la capacidad de infiltración, y la intensidad de la lluvia, esto hace que el agua comience a moverse por la superficie del terreno. La Escorrentía Subsuperficial corresponde al agua infiltrada en el suelo que se mueve subhorizontalmente por los diferentes horizontes del suelo y que reaparece súbitamente al aire libre como manantiales o se incorpora a microsurcos de agua que conducen a fuentes superficiales de agua. La escorrentía subterránea es la infiltrada hasta un nivel freático y alcanza las redes de drenajes.

Los valores de escorrentía están condicionados por factores meteorológicos, geográficos, hidrogeológicos y biológicos, en estudios realizados en la EE Paraguaicito por (Jaramillo, 2005) determinó que la cantidad de lluvia que se desplaza sobre la parte superior del suelo como, escorrentía superficial en un cafetal a libre exposición solar, presenta un valor promedio de 9,4% con un valor máximo de 15,6%.

6.2.4 Infiltración

La infiltración es el flujo de agua que penetra por el perfil del suelo y es distribuida desde las zonas con mayor saturación hacia la zona no saturada dentro del perfil, para que esto se realice, hay factores que afectan esta infiltración, como es el tipo de cobertura, características del suelo, la humedad del suelo, la cantidad e intensidad de la lluvia, el uso del suelo entre otros.

La intensidad de lluvia juega un papel fundamental en el volumen de agua que infiltra en el perfil del suelo, el tipo de cobertura arbórea es trascendental en la infiltración a través del dosel, que se convierte en lluvia neta y llega al perfil del suelo y se infiltra.

Además, por ser el suelo un reservorio de nutrientes y de agua, allí se llevan a cabo procesos o flujos que se convierten en salidas o pérdidas por medio de la escorrentía del subsuelo. La infiltración aumenta el caudal de las quebradas o ríos y contribuyen al arrastre de nutrientes que no han sido almacenados o absorbidos por las plantas, esto puede alterar las características físicas y químicas del suelo, ocasiona perturbaciones en el ecosistema, entre otros. (Allen *et al.*, 2006).

La infiltración está gobernada por dos fuerzas, la gravedad y la acción capilar, estas permiten que el agua infiltre y una forma de medición es mediante lisímetro que puede definirse como recipientes que encierran una determinada porción de suelo, con superficie desnuda o con cubierta vegetal, ubicados en campo para representar condiciones naturales.

6.2.5 Transpiración

La transpiración es la pérdida de agua, en forma de vapor, a través de las distintas partes de la planta, fundamentalmente por las hojas. La transpiración comienza cuando los estomas se abren, lo que produce que se evapore el agua a través de estos poros diminutos que se encuentran en el haz y envés de las hojas que cuando se abren permiten el paso del CO_2 y O_2 , la luz estimula la apertura y cierre de estomas, sobre lo cual también influyen la humedad relativa, y el aire circundante (Lee, 2009).

La transpiración está ligada con una función de vital importancia para el crecimiento de las plantas, la fotosíntesis, debido a la absorción de dióxido de carbono y la pérdida de agua por transpiración simultáneamente. Normalmente es difícil determinar la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo.

Los factores del proceso de transpiración también dependen de la anatomía de la planta y propiedades del agua. A medida que la transpiración de la planta es más intensa, el flujo del agua en el xilema es mayor, y se disminuye la presión, y de esta manera la presión atmosférica se hace mayor con relación a la planta lo que favorece el proceso de transpiración.

6.2.6 Evaporación

Es el proceso donde el agua líquida se transforma en vapor de agua, por medio de la energía. Para (Belén y Maestre, 2008), la evaporación del agua hacia la atmósfera ocurre a partir de superficies de agua libre como océanos, lagos y ríos, de zonas pantanosas, del suelo, y de la vegetación húmeda. La evaporación se

produce cuando el agua es transformada en vapor y la cantidad de agua evaporada es controlada por la energía disponible en la superficie y la facilidad con la cual el vapor de agua puede difundirse en la atmósfera.

La evaporación es una de las variables importantes del balance hídrico, se establece como un proceso físico, por el cual un sólido o líquido se transforma en gas, tras haber adquirido suficiente energía “radiación solar” para vencer la tensión superficial, la evaporación sucede a cualquier temperatura y es rápida dependiendo de la cantidad de energía recibida y la cantidad de agua en el suelo, de esta manera se ejerce un control sobre la evaporación del suelo (Allen *et al.*, 2006).

6.2.7 Evapotranspiración

Es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, esto también incluye la evaporación de agua líquida o sólida directamente desde el suelo o de los vegetales vivos o muertos, (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), esta salida de agua en las plantas se realiza a través de las hojas mediante la transpiración.

Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La evapotranspiración del cultivo (ET_c) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada.

La evapotranspiración se ve afectada por la temperatura del aire cuanto más frío está el aire mayor será la convección térmica hacia el mismo y por tanto menos energía habrá disponible para la evaporación. Cuanto mayor sea la temperatura

del aire, mayor es su presión de vapor de saturación. La humedad atmosférica es otra variable esencial para este proceso. El aire seco se satura más tarde y tiene menor tensión de vapor, por lo que cuanto mayor es la humedad relativa menor será el déficit de saturación.

El viento juega un papel importante en este proceso de transpiración a medida que reduce el vapor de agua posado sobre las hojas facilita la difusión, actuando como refrigerante por el aire húmedo que mueve hacia las hojas disminuyendo la transpiración y aumentando cuando trae aire seco.

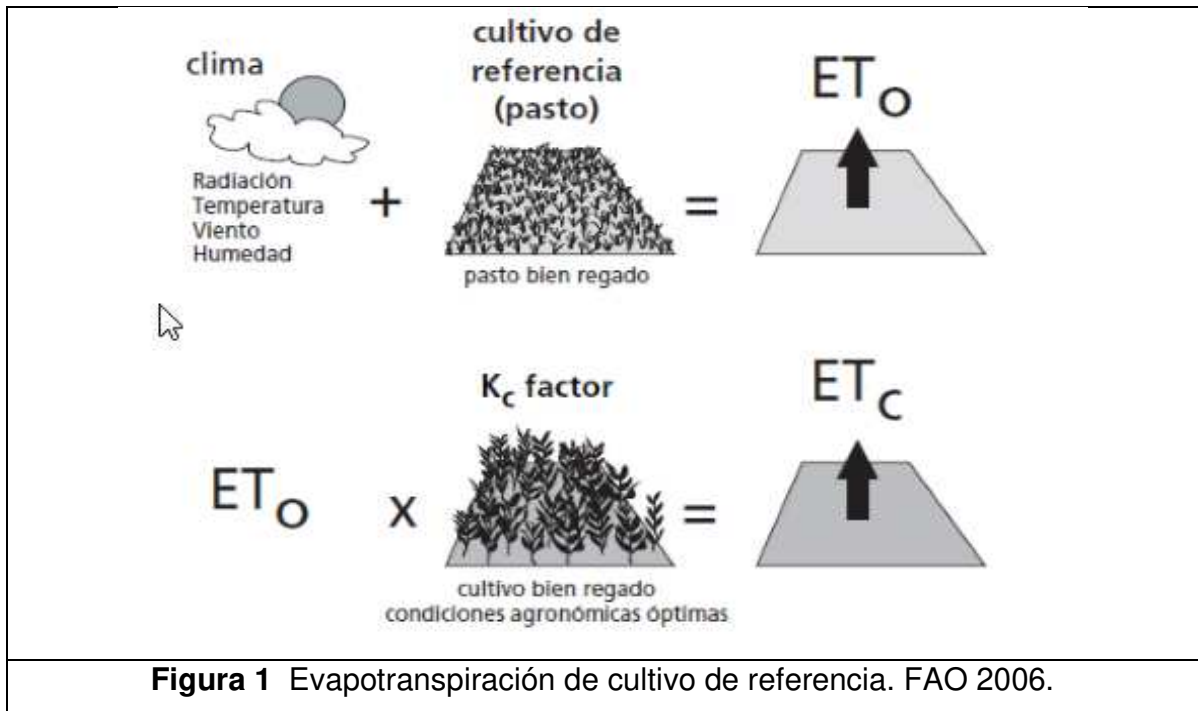
La salinidad también afecta la tasa evapotranspirativa. La evaporación disminuye 1% por cada incremento del 1% de concentración de sal en el agua. La presión de vapor del agua pura está determinada por su temperatura, cuando existen sólidos disueltos en agua, la presión de vapor de la solución se reduce para la misma temperatura, originando una reducción del déficit higrométrico, ya que la evaporación es directamente proporcional a la misma (Allen *et al.*, 2006)

6.2.8 Evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es definida para un cultivo hipotético dentro del modelo de Penman-Monteinth con un crecimiento específico, uniforme y sin ninguna restricción de humedad, donde se relaciona el poder evaporante de la atmósfera, ligada concretamente por factores climáticos, primordialmente de acuerdo al comportamiento de la humedad relativa, velocidad del viento y temperatura del aire (Allen *et al.*, 2006).

Para estimar la ET_o de una manera directa y rápida, se puede instalar un tanque evaporímetro clase A instalado en el sitio de la investigación lo que asemeja las

condiciones que suceden (Allen *et al.*, 2006) pero este método no es muy recomendado ya que puede tener grandes errores de medición, por lo cual la FAO recomienda el método de Penman-Monteith.



6.2.9 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ET_c , hace referencia a la pérdida de agua de un cultivo que no posee enfermedades y que además cuenta con una buena fertilización, se desarrolla en parcelas, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, alcanzando las condiciones de máxima producción de acuerdo con la oferta climática del sitio.

Dado lo anterior la evapotranspiración del cultivo es una variable que depende de las condiciones climáticas y las prácticas agronómicas (Ortega *et al.*, 2012).

Existen diferentes métodos para determinar la evapotranspiración del cultivo (ETc) como es el balance de energía, entre ellos el balance hídrico.

6.2.10 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) corresponde a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar, es decir condiciones de campo, no óptimas con presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento y menor densidad de plantas con una consecuente reducción de la tasa de evapotranspiración.(Allen *et al.*, 2006).

6.2.11 Coeficiente único del cultivo (Kc)

Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se integran en un coeficiente único del cultivo. El coeficiente único Kc incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo.

Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios de cultivo son apropiados y más convenientes que los valores de Kc calculados con base diaria usando coeficientes separados de cultivo y suelo.

Solamente en los casos en que el coeficiente de cultivo sea necesario para

períodos diarios, para cultivos específicos y para años específicos, se requerirá de coeficientes separados de transpiración y evaporación.

Los coeficientes de cultivo tienen una influencia grande sobre la evapotranspiración por los que dichos valores sólo es posible obtenerlos mediante experimentación ya que el crecimiento de las plantas está afectado por las condiciones cambiantes del clima, por las condiciones físicas y químicas del suelo, por el manejo agronómico, por el sistema de riego y por la genética del cultivo (Javier *et al.*, 2005).

En investigaciones realizadas por (Ramirez B., V.H. ; Jaramillo R., A.; Arcila P.,J, 2010) nos indican que “Regularmente, los requerimientos hídricos de los cultivos (ETc) se estiman a partir del producto entre la Evapotranspiración de referencia (ETo), y el coeficiente de cultivo – Kc, que se estima experimentalmente y varía de acuerdo a la edad del cultivo, así: cultivos en etapas iniciales de crecimiento tienen tasas de ETc menores que la ETo, y por lo tanto, el Kc es inferior a 1,0; cultivos en etapas productivas tienen tasas de ETc iguales o mayores que la ETo y en este caso el Kc es igual o mayor a 1.0; y cultivos senescentes presentan tasas de ETc inferiores a la ETo y los valores de Kc son inferiores a 1,0.

La importancia de la estimación del coeficiente de cultivo radica en una buena planificación de los calendarios de riego, y mejor manejo del agua puesto que existen zonas donde se explota un cultivo a escala comercial y del cual no se conoce su consumo de agua (Kelsoet *al.*, 2012)

6.2.12. La importancia del agua en el sector cafetero (Rojas *et al.*, 2018)

La producción de café es posible mediante el uso de recursos naturales y

humanos. Uno de los recursos naturales necesarios para la producción de café y la elaboración de la bebida es el agua. Este recurso es esencial en el proceso de producción del café, siendo requerida en todas las etapas: como riego en las etapas de germinador y almácigo, como precipitación en la etapa de establecimiento y desarrollo del cultivo, y como suministro en la etapa del beneficio del fruto. En esta última etapa se generan además unos efluentes con alta contaminación orgánica, que pueden impactar las fuentes de agua superficiales, contribuyendo a la reducción de la disponibilidad del recurso.

La zona cafetera de Colombia, en su mayor proporción, se encuentra en la cadena montañosa de los Andes, donde también están las principales fuentes de abastecimiento del recurso hídrico. En total, la zona cafetera comprende más de tres millones de hectáreas, donde el sistema de producción de café interactúa con diferentes ecosistemas, que son de alta importancia para la sostenibilidad de la caficultura y del país,

Bajo el entendido de que el recurso hídrico es limitado, el sector cafetero colombiano, a lo largo del tiempo, ha mantenido un compromiso con la conservación y uso adecuado de los recursos naturales mediante diferentes estrategias, una de ellas es la generación de conocimiento y tecnología.

6.3. Marco normativo

En Colombia, los propósitos del desarrollo territorial y en especial en las áreas rurales cafeteras, se busca garantizar la sostenibilidad ambiental y el uso eficiente del agua como estrategia fundamental para la preservación de los recursos naturales.

En el cafeto la floración está determinada por variables ambientales, como el fotoperíodo y la disponibilidad hídrica. La variabilidad climática impacta drásticamente estas necesidades siendo forzoso buscar mecanismos en la agricultura que minimicen estos impactos.

Colombia cuenta con un gran potencial para expandir su territorio agrícola bajo riego más allá de las 900 mil hectáreas en agricultura por sus favorables condiciones de altas precipitaciones y suelos fértiles derivados de cenizas volcánicas generando una oportunidad para el establecimiento de diferentes cultivos. La efectiva aplicación de riego debe contribuir a que no aumente la salinización del suelo y la erosión hídrica.

El riego como parte integral del desarrollo agrícola colombiano, debe contribuir al mejoramiento del potencial productivo de los cultivos. Según la FAO, en Colombia los sectores privados han desarrollado y manejado el 62 % de la superficie regable funcional y el sector público un 38 % con inversiones promedio de 19 millones de USD \$ al año.

Colombia, en la Constitución del 1991 hace responsable al gobierno de garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales incluyendo los hídricos. Es por esto, que, a partir de allí, se inicia todo un proceso en la búsqueda de esa protección.

En 1993 se aprueba la ley 41 de adecuación de tierras, con decretos 1278 y 2135 donde se reduce la intervención pública en riego y se fomenta la intervención privada. Los usuarios son responsables del diseño, creación, sostenimiento mediante un canon de agua que incluya los gastos totales. Mediante la Ley 99 /93 se crea el Ministerio del Medio Ambiente, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), encargado de generar políticas y manejo del recurso hídrico.

Colombia en la legislación ambiental ha tenido un importante desarrollo en las últimas décadas, en especial, a partir de la Convención de Estocolmo de 1972, cuyos principios se acogen desde el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente contenido en el Decreto Legislativo, hoy Decreto Ley 2811 de 1974 (que se constituyó en uno de los primeros esfuerzos en Iberoamérica para expedir una normatividad integral sobre el medio ambiente). Principios que se han expandido gracias a la Ley 99 de 1993 (que incorpora expresa o tácitamente los principios de las Declaraciones de Estocolmo de 1972 y de Río de Janeiro de 1992 según lo dispone el Numeral 1 del Artículo 1); al Decreto 048 de 2001 e incluso a la jurisprudencia de la Corte Constitucional.

La ley 373 de 1997 Artículo 01. Programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Donde se contempla un uso eficiente y ahorro de agua de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación del servicio de todo tipo de consumo.

En 2010 se establece la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, documento que establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Sin embargo, hoy la norma fundamental sobre las aguas no marítimas o continentales se constituye en el Decreto Reglamentario 1541 de 1978, que desarrolla todo lo concerniente a la propiedad privada, los modos de adquirir los usos de las aguas de dominio público, los términos o plazos de las concesiones o

permisos, prioridades, las obligaciones de los usuarios, procedimientos, soportes técnicos, obras hidráulicas, aguas subterráneas, reglamentaciones, aguas termales, aguas para usos mineros, etc. (El Régimen Jurídico De Las Aguas En Colombia).

Crear y desarrollar cambios en los mecanismos de hábitos de uso y consumo de agua permiten la implementación de estrategias que contribuyan con la sostenibilidad del recurso y por ende a mantener el potencial agrícola en Colombia.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Localización – condiciones de clima

Las evaluaciones se realizaron en la Estación Experimental Paraguaicito (EEP) de Cenicafé, ubicada al sur oriente del departamento del Quindío, Jurisdicción del Municipio de Buenavista, a 4 km de la troncal de occidente que une la ciudad de Armenia con Caicedonia.

Las coordenadas son: 04°-23´Latitud Norte, 75°-44´Longitud Oeste y 1204 msnm de altitud (Anuario Meteorológico Cafetero, 2017).

Con una precipitación promedio anual de 2100 mm, repartidos en dos periodos secos o de menor lluvia y dos periodos húmedos que dan origen a una distribución bimodal. Característica típica de la zona cafetera central, debido al doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical (Anuario Meteorológico Cafetero, 2017).

Con una evaporación de 1324 mm, temperatura media 21,3°C, temperatura máxima de 28,1°C, temperatura mínima 16,8°C, humedad relativa promedio, del 77%, y brillo solar de 1720 horas (Anuario Meteorológico Cafetero, 2017).

7.2. Descripción de las características del suelo

El suelo donde se instalaron las parcelas corresponde a la unidad Montenegro:

Localización: Municipio Buenavista (Quindío). Vereda Río Verde bajo, Estación Experimental Paraguaicito.

Posición geomorfológica: Planicie de Río verde

Profundidad efectiva: Profundo

Drenaje: Natural: Bien drenado

Relieve: Plano 3% de pendiente.

Vegetación: Café

Material parental: Cenizas volcánicas.

Erosión: No se percibe

Clasificación taxonómica Typic Udivitrand

Descripción del Perfil (González, 2017)

0-88cm (A): Color Pardo muy oscuro (10 YR 2/2) en húmedo, textura arenoso franco (en campo), estructura Bloques subangulares medios débil. Consistencia en húmedo firme. Consistencia en seco ligeramente dura. Poros Finos y medios abundantes. Presencia de hormigas. Raíces gruesas, medias y finas abundantes. Límite abrupto (DA: 0,92). Reacción NaF fuerte.

88-98cm ((Bw)): Color Pardo amarillo oscuro (10YR 4/6) en húmedo, textura arenosa (en campo), débilmente estructurado. Consistencia en húmedo suelta. Consistencia en seco suelta. Poros medios y abundantes. Presencia de Pedotúbulos medios. Krotovinas. Raíces medias escasas. Límite abrupto. (DA: 0,97) Reacción NaF fuerte.

98-113cm (B1): Color Pardo amarillo (10YR 5/6) en húmedo, textura arenosa (en campo), estructura bloques gruesos débiles. Consistencia en húmedo friable. Consistencia en seco. Poros medios. Pedotúbulos medianos y gruesos. Presenta Krotovinas. Pocas raíces. (DA: 1,18). Reacción NaF fuerte.

>113xcm (Cg): Color oliva (5Y 4/4) (DA: 1,20 kg/L).

7.3. Descripción del lote experimental

Las evaluaciones se realizaron en un lote de 2 Ha, establecido con *Coffea arabica* de la variedad Castillo Paraguaicito® de 36 meses de edad, sembrado a libre exposición solar.

Para la evaluación del balance hídrico en el cafetal, se establecieron tres predios hidrológicos (parcelas) dentro del lote experimental, cada uno con un área de 9 m² y seis árboles de café sembrados a 1,4 m entre surcos x 1,0 m entre plantas. Dos de las parcelas se mantuvieron a capacidad de campo a través de monitoreo constante de la humedad del suelo (previo análisis de las características hidrofísicas) garantizando a través de riego la disponibilidad hídrica. La tercera parcela sirvió como testigo y se mantuvo bajo condiciones de secano (sin riego).

Adicionalmente, se contó con la información de una estación microclimática ubicada dentro del lote experimental, con la cual se midió con una frecuencia de media hora a través del día, las variables temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar global, radiación fotosintéticamente activa, radiación neta y temperatura y humedad del suelo. Esta estación, además, contaba con un equipo de medición de flujos de carbono y vapor de agua que funciona a través del método de "Eddy Covariance, EC" Descrito por (Baldocchi, 2003) Esta estación microclimática complementó información acerca de la evapotranspiración del cultivo del café, la cual fue relacionada con la ET_c medida a partir de las parcelas experimentales.

7.4. Variables hidrológicas

Lluvia Externa (P): Correspondió a la cantidad de lluvia diaria acumulada que ingresó a las parcelas. Se colectó en un pluviómetro, instalado por encima del dosel de los árboles, adicionalmente capturó información de la precipitación de un pluviómetro automático localizado en la parte superior de la estación microclimática, los datos se clasificaron entre diurnos y nocturnos, de acuerdo con los estudios realizados por (María *et al.*, 2016), en la Estación Experimental Paraguaicito, donde se expresa el inicio de la actividad evapotranspirativa y fotosintética de los cafetos, alrededor de las 07:00 horas y finalización alrededor de las 18:00 horas.

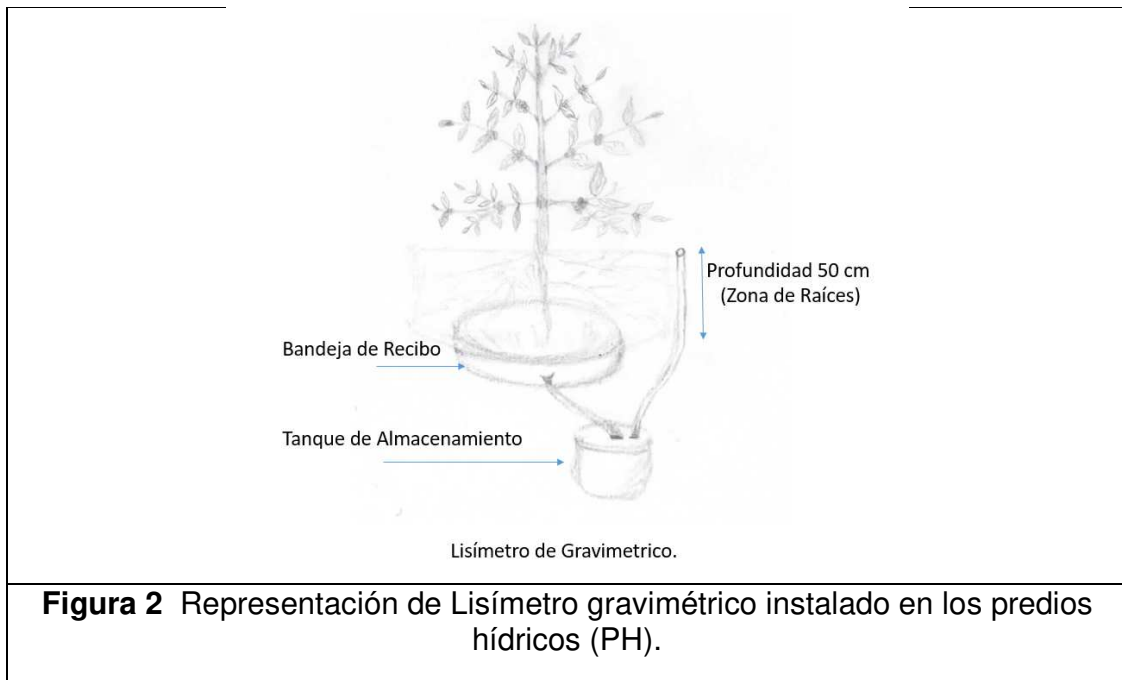
Lluvia neta (Lln): Correspondió a la cantidad de lluvia diaria que ingresó al suelo de la parcela después de atravesar el dosel de los cafetos (lluvia efectiva), se registró mediante seis pluviómetros, ubicados aleatoriamente en el interior del lote debajo del dosel y en las calles del cultivo.

Escorrentía (E): Para la medición de esta variable se realizó un cerramiento en cada parcela con una geomembrana con el fin de aislar el agua de escorrentía del resto del lote. Para ello se construyó una canal de 5 cm de ancho y 50 cm de profundidad. El agua de escorrentía superficial se capturó a través de una canaleta de 3", ubicada en el extremo con mayor pendiente de la parcela (3%), el agua fue conducida desde la canal hacia un tanque colector de agua.

Intercepción por la vegetación (I): Se dispusieron dos pluviómetros a nivel del suelo para la medición directa de la lluvia interceptada a través del dosel. Además, se calculó por método indirecto según lo propuesto por (Rutter *et al.*, 1971) como la diferencia entre los acumulados de lluvia externa y los de lluvia neta ($I = P - Lln$).

Capacidad de almacenamiento del dosel (S) - La cantidad de agua almacenada por el dosel (S), después de cada evento lluvioso, se estimó haciendo uso del Modelo de (Rutter, 1975) para quien la capacidad de almacenamiento del dosel es estimada con el intercepto en un modelo de regresión lineal simple: $I = bP - S$, donde I es la interceptación, P es la lluvia externa y S es la capacidad de almacenamiento.

Percolación (D): La cantidad de agua percolada se midió a través de lisímetros gravimétricos. Este instrumento consistió en un recipiente redondo fabricado en acero inoxidable con fondo cóncavo (pendiente 3%), de 7cm de alto por 50 cm de diámetro. Este recipiente contenía en el fondo una capa de 2 cm de gravilla de diámetro pequeño tapada con tull, de tal manera que no se interfiriera con la presión generada entre el continuo suelo – atmósfera. A este dispositivo se le instaló una salida de agua para recolectar y medir el agua. En cada parcela se dispusieron 2 de éstos lisímetros en cada esquina, justo debajo de la zona de raíces (a 50 cm de profundidad). Las muestras de agua de percolación, se obtuvieron de los recipientes a la salida de los lisímetros.



Humedad del suelo (H). Se dispusieron sensores de humedad y temperatura del suelo, referencia 5TE, marca Campbell Scientific USA, instalados en cada parcela a una profundidad de 15 y 45 cm y se registraron datos cada 5 minutos a través del día.

Evapotranspiración de referencia (ET_o) - Para su estimación se utilizaron las variables medidas a través de la estación climática automatizada de Paraguaicito, utilizando la ecuación de Penman-Monteith de la forma:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

ET_o evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹)

R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹)

G flujo del calor de suelo (MJ m⁻² d⁻¹)

T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂ velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s presión de vapor de saturación (KPa)

e_a presión real de vapor (KPa)

e_s - e_a déficit de presión de vapor (KPa)

Δ pendiente de la curva de presión de vapor (KPa °C⁻¹)

γ constante psicrométrica (KPa °C⁻¹)

Evapotranspiración del cultivo (ET_c) en etapa productiva. Esta variable se halló por despeje de la ecuación del balance hídrico (ecuación X), después de haber medido el resto de variables.

$$ET_c = P + R - (D + E + \Delta) \text{ (Ecuación 2)}$$

En donde:

ET_c: Evapotranspiración del cultivo

P = lluvia externa

R = Riego

D = Percolación

E = Escorrentía

Δ = Variación de humedad en el suelo

Evapotranspiración Real – Esta variable fue determinada a través los mismos componentes del balance hidrológico descritos anteriormente, pero medidos en la parcela de secano.

Coeficiente de cultivo (Kc) en etapa productiva de los cafetos – La demanda hídrica potencial de un cultivo o evapotranspiración máxima del cultivo en una etapa fenológica dada, se puede conocer mediante la siguiente expresión:

$$Etc = Kc * ETo \text{ (Ecuación 3)}$$

Por lo tanto, con las evaluaciones de la evapotranspiración de referencia (ETo) y la evapotranspiración del cultivo (ETc), se pudo obtener el Kc (coeficiente de cultivo) en la etapa productiva del sistema de cultivo de café al sol en etapa productiva.

7.5. Análisis de la información

Los diferentes estudios realizados sobre balance hídrico se basan en la aplicación de los principios del balance de masas, teniendo en cuenta las entradas y salidas del sistema, en un intervalo de tiempo dado. En esta investigación las variables de entrada y salida de agua del sistema cafetero, se midieron a nivel diario.

La investigación es de tipo correlacional en la cual se aplicó estadística descriptiva y modelos de regresión que describieran el comportamiento de la esorrentía (E), la percolación (D), con relación a la lluvia neta (Ln), y la lluvia neta con relación a la Lluvia externa (P). Para relacionar estas variables se utilizaron regresiones lineales o exponenciales simples con intercepto cero, de la forma $Y = bX$, en donde

Y es la variable dependiente (lluvia efectiva, escurrentía, percolación), X es la lluvia externa, y b el coeficiente de regresión (Velásquez-Franco & Jaramillo-Robledo, 2009b).

Con los datos calculados a partir de información suministrada por la estación climatológica automatizada y la estación microclimática (Eddy Covariance), se calculó el Kc (coeficiente que permite conocer el consumo de agua por el sistema).

Balance hídrico. En la parcela de balance hídrico, al desagregar la lluvia externa y calcular su partición al interior, se verificó la ETc y la ETo y se generaron los ajustes del Kc.

Con ETc y Kc validados y con la ETo proporcionada por la estación climática, se obtuvo la validación del modelo de la FAO, para el cálculo del requerimiento hídrico para café.

7.6. Prueba de hipótesis

La evapotranspiración real para un cultivo de café en etapa productiva, es igual a la potencial, con una precipitación de al menos de 6 mm diarios

Ho: (Hipótesis Nula) Con al menos 6 mm diarios la evapotranspiración potencial es igual a la real.

$$ETP - ETR = 0 \text{ (Ecuación 4)}$$

Ha (Hipótesis de Alternativa): Con una precipitación menor a 6 mm la evapotranspiración potencial es mayor que a la real.

$$ETP - ETR > 0 \text{ (Ecuación 5)}$$

Ha será corroborada siempre y cuando con el estadístico de prueba T al 5% se rechace la hipótesis nula en favor de ésta.

7.7. Descripción metrológica

La Gestión metrológica como componente de la investigación debe asegurar la confiabilidad de los instrumentos de medición y sus certificados permiten evidenciar la medición de cada equipo teniendo en cuenta la tolerancia al error de las actividades, es por tal razón que los análisis de suelo se realizaron en laboratorio certificado para su confiabilidad.

Instrumentos que se utilizaron de apoyo en la medición:

- Cuatro Pluviómetros colectores de agua lluvia; New Aerocone TM Rain Colletor.
- Seis sensores de humedad y temperatura del suelo 5TE.
- Tres registradores de datos autónomos para alimentar, leer y registrar cinco sensores Em50 series data collection system.
- Cuatro Pluviómetros de lectura directa.

7.8. Análisis estadístico

Para el registro de la información, análisis de datos para cada variable, generación de tablas y gráficos se utilizó la herramienta informática Microsoft Excel que forma parte de la suite de oficina Microsoft Office. Para el cálculo de promedios y desviación estándar de los datos generados se aplicó una estadística descriptiva y para la determinación de correlaciones se realizaron regresiones lineales, utilizando para ambos casos la herramienta Microsoft Excel.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Condiciones del suelo de los predios hidrológicos

Se realizaron análisis físico químicos, en los tres predios hídricos evaluados para este estudio, en el laboratorio de Suelos Asayma S.A.S – Palmira Valle del Cauca; las muestras tomadas generaron los resultados que se presentan en las Tablas 1,2 y 3.

Los resultados del estudio indican, que la densidad aparente (DA) y densidad real (DR), porosidad, textura del suelo, entre las tres parcelas, bajo las mismas condiciones del cultivo, son similares, conservando en zona de raíces (50 cm), para la densidad aparente (DA) valores de $0,97 \text{ g.cm}^{-3}$ y para la densidad real (DR) de $2,12 \text{ g.cm}^{-3}$, como se observa en la Tabla 1.

Los resultados encontrados en las parcelas experimentales coinciden con los hallados por (Hincapié-Gómez, 2011). En cuanto a la densidad aparente (DA) en la unidad Montenegro fluctuó entre $0,57$ y $1,08 \text{ g.cm}^{-3}$. Según (González-Osorio, 2017) en levantamiento de perfil de suelo realizado en Paraguaicito, en la unidad Montenegro para el horizonte A (0-88cm) determinó una DA de $0,92 \text{ g.cm}^{-3}$; estos suelos por contener menores cantidades de materia orgánica y altos contenidos de arena, los valores de DA se puede determinar que son mayores y aumentando dependiente a la profundidad del perfil, comparadas con las unidades de suelo Chinchiná, Fresno y Timbío.

Análisis de textura parcela 1 (Riego_1), Parcela 2 (Riego_2) y Parcela 3 (Secano): los porcentajes de Arcilla fueron 21,96; 21,41 y 19,25%, respectivamente; los porcentajes de Limo de 39,74; 40,91 y 33,39%, respectivamente, y los porcentajes de Arena de 38,30; 37,69 y 47,35%, respectivamente, determinaron la misma textura para las 3 parcelas: Textura Franca.

En estudio de (Bernal, Grijalba, & Guzman, 1986) identificaron que los suelos en Paraguaicito son derivados de cenizas volcánicas y corresponden a las unidades de suelo Montenegro y Chinchiná. Para la unidad Montenegro se presentan en dos posiciones fisiográficas T1 y la T4; la primera ocupa la casi totalidad de la posición, esta posición identifica las áreas planas altas con pendientes generalmente inferiores a 7%. El drenaje externo es lento pero el interno es rápido y la segunda T4 solamente sectores convexos, esta posición representa áreas onduladas y las pendientes fluctúan entre el 8 y el 25%.

González-Osorio & Salamanca-Jiménez, 2008 en el estudio sobre la zonificación y uso potencial del suelo determinaron que la unidad Montenegro; es material de origen de ceniza volcánica con un grado intermedio de evolución. Presentan un horizonte A oscuro cuyo espesor supera los 20 cm. En él se puede detectarse a simple vista, minerales de mica blanca (moscovita) que constituyen una fuente natural de potasio, con suelos poco estructurados, con texturas de franco a franco arenosa, de mediana a baja retención de humedad y susceptibles a la erosión.

8.2. Medición del contenido de humedad volumétrica del suelo

En cada uno de los predios de escorrentía se realizó la instalación de sensores de humedad y temperatura del suelo (referencia 5TE, marca Campbell Scientific USA), a una profundidad de 15 y 45 cm.

En la Tabla 3 se presenta el promedio encontrado en la humedad volumétrica a una profundidad de 0 a 30 cm, parcelas Riego_1 y Riego_2 fue 0,36 y 0,25 respectivamente y Secano 0,30 y en el rango de profundidad de 30 a 60 cm, un promedio de 0,18; 0,20 y 0,32 respectivamente. La conductividad hidráulica para cada una de las parcelas de acuerdo con los parámetros utilizados por el laboratorio según la Tabla 4, indica que en el rango de 0 a 30 cm es Muy Rápida

asociada a la porosidad encontrada entre 51,14 y 54.24%, para la profundidad de 30 a 60 cm, en las parcelas Riego_1 y Secano, indica Muy Rápida y para Riego_2 fue Rápida, la cual puede estar asociada al 51,14% de porosidad y un 37,69% de contenido de arena.

Parcelas	Análisis físico de Suelo					Contenido de agua en el suelo en fracción volumétrica (cm ³ agua/cm ³ suelo)		
	Densidad Aparente g/cm ³	Densidad Real g/cm ³	Porosidad Total (%)	Humedad de campo (%)	Conductividad Hídrica Saturada (cm/h)	Saturación	Capacidad de Campo	Marchitez Permanen te
Riego_1	1,01	2,12	52,39	34,91	20,08	61,49	34,65	27,56
Riego_2	1,04	2,13	51,14	39,09	23,11	62,07	35,52	24,94
Secano	0,97	2,12	54,24	39,79	11,52	63,25	35,04	26,92

Tabla 1. Características físicas del suelo de estudio en cada una de las parcelas de estudio de acuerdo con los resultados del laboratorio de Suelo Asayma S.A.S – Palmira Valle del Cauca.

Parámetro	Unidad	Riego_1	Riego_2	Secano
pH	Unidades	4,07	4,17	3,62
C. Eléctrica	(dS/m)	0,109	0,082	0,087
NTK	g/kg	3,88	4,15	2,62
N-NO ₃	g/kg	1,35	1,37	0,89
N-NH ₄	g/kg	2,03	2,51	1,49
M. Orgánica	%	5,57	5,48	4,15
P	ppm	42,7	40,8	45,9
S	ppm	11,6	8,1	9,7
Ca	meq/100g	0,87	1,06	0,48
Mg	meq/100g	0,29	0,4	0,19
K	meq/100g	0,32	0,22	0,37
Al	meq/100g	1,05	0,69	1,26
CIC	meq/100g	2,5	2,4	2,3
Fe	ppm	48	44	85
Mn	ppm	4,72	6,58	4,25
Cu	ppm	0,56	0,35	0,69
Zn	ppm	2,71	1,19	1,54
B	ppm	0,21	0,19	0,16

Tabla 2 Características Químicas de cada parcela experimental de acuerdo con resultados del laboratorio de Suelo Asayma S.A.S Palmira Valle del Cauca.

		Riego_1	Riego_2	Secano
HVS_0-30 cm (cm ³ /cm ³)	Promedio	0,36	0,25	0,30
	Límite_ Inf	0,35	0,25	0,30
	Límite_ Sup	0,36	0,26	0,30
HVS_30-60 cm (cm ³ /cm ³)	Promedio	0,18	0,20	0,32
	Límite_ Inf	0,17	0,20	0,32
	Límite_ Sup	0,18	0,20	0,32

Tabla 3 Contenido de humedad volumétrica del suelo en predios de escorrentía.

Conductividad Hidráulica		Interpretación
cm/hora	m/d	
< 0,1	< 0,03	Muy lenta
0,1 – 0,5	0,03 – 0,12	Lenta
0,5 -1,6	0,12 - 0,38	Moderada Lenta
1,6 – 5,0	0,38 – 1,20	Moderada
5,0 – 12,0	1,20 – 2,90	Moderada Rápida
12,0 – 18,0	2,90 – 4,30	Rápida
> 18,0	> 4,30	Muy Rápida

Tabla 4 Calificación de la conductividad hidráulica saturada.

8.3. Comportamiento de la Lluvia externa (P)

En la Figura 3 se indica el comportamiento decadiario (período de 10 días) de la lluvia externa (P) en el sitio del experimento, en el periodo comprendido entre el 20 junio de 2017 y 30 de enero de 2018. Como puede observarse predominaron más eventos nocturnos de lluvia (68,5%), que diurnos (31,5%), correspondiente a una precipitación acumulada de 962,5 mm en la noche y 441,9 mm en el día.

El comportamiento mensual de la lluvia mantiene los patrones históricos registrados en la EE Paraguaicito, tal como puede verse en la Tabla 5. En el período evaluado la mayor precipitación diurna se presentó en noviembre (29,2%) y diciembre (29,6%), y la menor precipitación en julio (0,7%) y agosto (4,0%). Con el fin de establecer los criterios de la demanda evapotranspirativa de los cafetos se clasificó por su ocurrencia en diurna entre las 07:00 horas y las 18:00 horas (María *et al.*, 2016). Se contabilizaron 200 eventos en el rango de lluvia inferior a 5 mm, 11 eventos entre 5 y 10 mm de precipitación y 14 eventos en el rango mayor

a 10 mm de precipitación, con el 10%, 36% y 70%, respectivamente de ocurrencia en el día y el 90%, 64% y 30% de ocurrencia en la noche, como se puede observar en la Tabla 6.

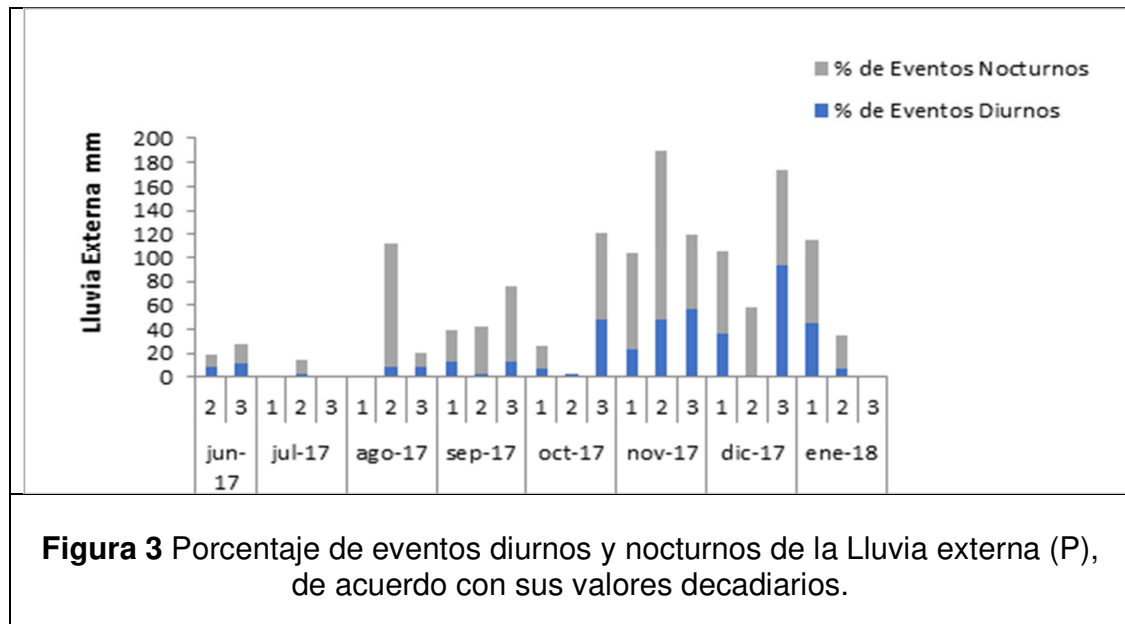


Figura 3 Porcentaje de eventos diurnos y nocturnos de la Lluvia externa (P), de acuerdo con sus valores decadiarios.

Mes	mm Día	% Mes	mm Noche	% Mes	Total Lluvia Externa	% Total del mes
jun-17	20,4	4,6	26,8	2,8	47,2	3,4
jul-17	3,1	0,7	11,2	1,2	14,3	1,0
ago-17	17,6	4,0	116,8	12,1	134,4	9,6
sep-17	30,7	6,9	126,6	13,2	157,3	11,2
oct-17	57	12,9	93,3	9,7	150,3	10,7
nov-17	129,1	29,2	282,6	29,4	411,7	29,3
dic-17	131	29,6	207,2	21,5	338,2	24,1
ene-18	53	12,0	98	10,2	151	10,8
Total	441,9	100	962,5	100	1404,4	100

Tabla 5 Valores de distribución de la lluvia externa mensual, % diurnos y % nocturnos.

		Diurno		Nocturno		
Rango	Eventos	% de eventos de lluvia * Rango	Lluvia Externa día (P) mm	% de eventos de lluvia * Rango	Lluvia Externa noche (P) mm	Total Lluvia Externa (Día + Noche) mm
≤ 5 mm	200	10,1	77,4	89,9	692,3	769,7
$> 5 \leq 10$ mm	11	35,6	84,6	64,4	152,8	237,4
> 10 mm	14	70,5	279,9	29,5	117,4	397,3
TOTAL	225	31,5	441,9	68,5	962,5	1404,4

Tabla 6 Frecuencia del Comportamiento de lluvia diurna y nocturna por rangos en mm.

8.4. Comportamiento de la Lluvia neta (LLn) con relación a la Lluvia externa (Lle)

En la Tabla 7 se presentan los valores de lluvia externa y lluvia neta en las tres parcelas experimentales de balance hídrico. Para obtener las proporciones de lluvia neta se clasificaron los eventos en tres rangos, se descartaron los días sin lluvia. Para el rango > 0 y ≤ 5 mm de lluvia externa, la proporción de lluvia neta obtenida fue inferior, los valores fluctuaron entre 84% (Parcela 3) y 92% (parcela 2). Para el caso del rango > 5 mm ≤ 10 mm de lluvia externa, la lluvia neta obtenida fluctuó entre 89,7% y 95,9%. Para el caso del rango > 10 mm de lluvia externa, la lluvia neta obtenida fluctuó entre 93,9% y 100%. En otros estudios realizados por (Velásquez-Franco & Jaramillo-Robledo, 2009b) en la EE Naranjal en un cafetal de la variedad Tabi de 3 años, con una densidad de 2666 plantas/Ha calcularon una LLn de 92,4%. (Jaramillo-Robledo & Cháves-Córdoba, 1998) en la EE Paraguaicito en una plantación de café Variedad Colombia con una densidad de 4444 plantas/Ha refieren para LLn un 49%, por su parte (Ramírez & Jaramillo-Robledo, 2007) en cafetales a libre exposición reportan datos de lluvia neta del 61% al 85% de la lluvia externa.

La lluvia interceptada se encuentra entre valores 0,3% (Parcela 2) a 6,8% (Parcela 3) (Tabla 8). (Jaramillo-Robledo & Cháves-Córdoba, 1998), encontraron una interceptación de 8,0% para cafetal a libre exposición, definen que no se puede considerar un porcentaje fijo en la interceptación de la lluvia por la vegetación.

Rango		Días	% de eventos de lluvia	Lluvia Externa (P) mm	Lluvia Neta (Ln) mm	% Lluvia Neta (Ln)
P_1	> 0 ≤ 5 mm	103	69	60	51	85,0
	> 5 ≤ 10 mm	13	9	97	87	89,7
	> 10 mm	34	23	1211	1200	99,1
P_2	> 0 ≤ 5 mm	100	68	50	46	92,0
	> 5 ≤ 10 mm	14	9	98	94	95,9
	> 10 mm	34	23	1182	1186	100,3
P_3	> 0 ≤ 5 mm	99	67	50	42	84,0
	> 5 ≤ 10 mm	14	10	100	95	95,0
	> 10 mm	34	23	1184	1112	93,9

Tabla 7 Rangos de lluvia externa con relación a la lluvia neta

Parcelas	P (mm)	Lln (mm)	I = (P – Lln)	%
P_1	1368	1338	30	2,2
P_2	1330	1326	4	0,3
P_3	1334	1249	85	6,8

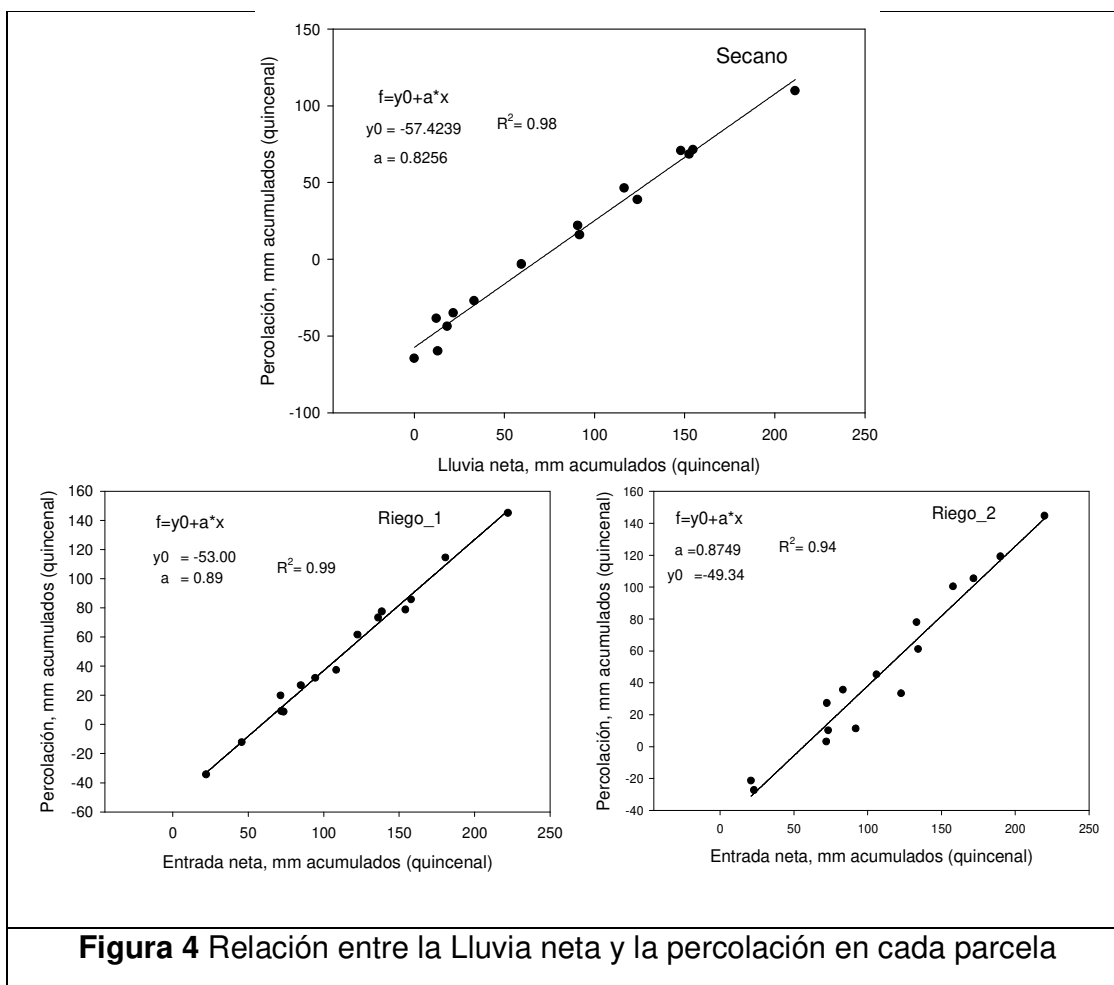
Tabla 8 Valores de Lluvia Neta (Lln) con Relación a la Lluvia Externa (P) y valores y porcentajes de la lluvia interceptada (I).

8.5. Relación entre la lluvia neta y la percolación

Al relacionar la percolación medida a través del lisímetro gravimétrico, con la lluvia neta, se encontró que los valores no superaron el 3% de la lluvia neta, lo cual no es concordante con lo que reporta la literatura; en estudios de (Giraldo-Jiménez & Jaramillo-Robledo, 2004) y (Velásquez-Franco & Jaramillo-Robledo, 2009b) en que se reportan valores superiores a 45%. Por lo cual se determinó incluir los valores de la torre microclimática Eddy Covariance, para los mismos días de evaluación de los predios hidrológicos, ya que se encuentra instalada en el mismo lote objeto de este estudio, accediendo a la información de la ETr del cultivo con la autorización del programa UT RICCLISA 1; cofinanciador de este estudio. Con esta información se calculó la percolación a partir de la ecuación (2) del balance hídrico (BH). La proporción de este componente con relación a la lluvia neta se presentó entre los límites de 42,8% y 43,3%, más acorde a lo encontrado por los autores anteriormente citados.

Con los valores de percolación para cada parcela se establecieron las relaciones matemáticas con la lluvia neta. En la Figura 4 Se observa la relación lineal en las tres parcelas. El valor de la pendiente estuvo entre 0,82 y 0,89 indicando que de 100 mm de lluvia que llegan a la superficie del suelo como lluvia neta, el 86% se percola. Sin embargo, los valores de Y_0 indican que sólo ocurre percolación cuando la lluvia neta es igual o superior 57, 53 y 49 mm, para las parcelas secano, riego 1 y riego 2, respectivamente.

¹ RICCLISA: Red de Cambio Climático y Seguridad Alimentaria, consultar en: <https://www.ricclisa.org/>



8.6. Relación entre la lluvia neta y la escorrentía

La escorrentía dentro del balance hídrico es el componente con menor proporción, para su análisis, se estableció la relación entre lluvia neta integrada (lluvia neta más riego) acumulada quincenal, y la escorrentía acumulada quincenal, en las parcelas con riego, encontrando valores de escorrentía entre 3,2 y 5,4%, como se observa en la Tabla 9. En estudios realizados por (Jaramillo, 2003) para una plantación de variedad Colombia a libre exposición solar, sembrados a una distancia 1,5 m por 1,5 m encontró para la escorrentía un valor promedio de 6% con relación a la lluvia neta. (Velásquez-Franco & Jaramillo-Robledo, 2009b) determinaron para la EC Naranjal, en un cafetal, en producción y a libre exposición

solar, 2,7 % de escorrentía con relación a la lluvia neta. (Arroyave-Zapata, 2012), en su investigación desarrollada en Paraguaicito encontró una escorrentía de 3,9% con relación a la lluvia neta y con relación a la lluvia externa una escorrentía de 4,1%.

No obstante, del total de días evaluados se encontró valores similares a otros estudios de la escorrentía con relación a la lluvia neta, sin embargo, su porcentaje fluctúa con relación a la cantidad de lluvia. En la Figura 5 se puede observar que para valores de lluvia neta menores o iguales a 187mm, el porcentaje de escorrentía fluctuó entre 0,0 y 3,23% y para valores de lluvia neta entre 214,6 mm y 442,3 mm (Valor máximo integrado obtenido), el porcentaje de escorrentía con respecto a la lluvia neta fluctuó entre 1,62 y 10,95 %, indicando que eventos con menor intensidad genera menor riesgo de escorrentía y aguaceros con mayor intensidad generan mayores pérdidas de agua por escorrentía. (Jaramillo, 2005) en las observaciones realizadas, determinó que la cobertura vegetal, textura y contenidos de materia orgánica y otros factores influyen en la dinámica del agua y su variación.

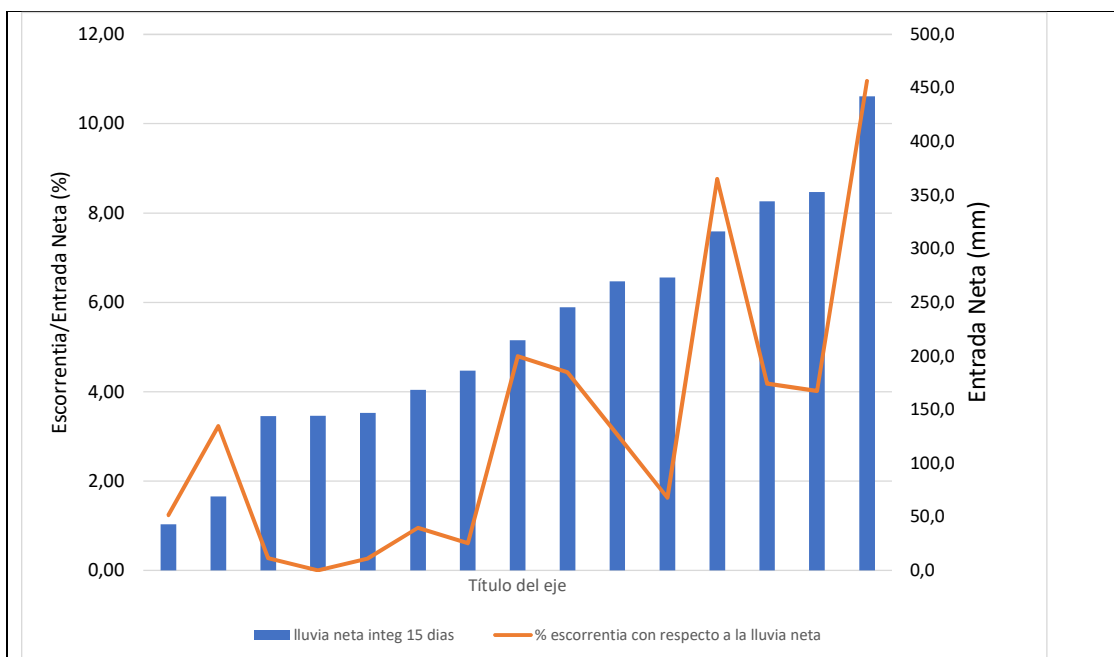


Figura 5 Lluvia neta integrada en relación a la escorrentía de parcelas en evaluación del balance hídrico (Riego_1 y Riego_2), establecidas en un cafetal a libre exposición solar en etapa reproductiva.

Parcelas	Lluvia neta Integrada (mm)	Escorrentía (mm)	Escorrentía (% Lln)
Riego_1	1686	91,6	5,4
Riego_2	1674	53,2	3,2

Tabla 9 Distribución de la lluvia neta más riego con relación a la escorrentía

8.7. Relación entre la lluvia efectiva y la evapotranspiración real del cultivo.

La Figura 6 muestra el comportamiento de los valores acumulados cada quince días de la humedad del suelo con y sin riego, en función de la lluvia neta y la evapotranspiración del cultivo. Se puede observar que, en la mayoría del tiempo evaluado, la lluvia neta estuvo por encima de los valores de la evapotranspiración real, es decir, no se presentaron condiciones hídricas limitantes con respecto a la

evapotranspiración del cultivo; sólo se observa nivel deficitario en el periodo comprendido entre la segunda quincena de junio de 2017 - hasta la primera de agosto de 2017, y en la primera quincena de octubre de 2017 y segunda de enero de 2018. En estos periodos, se tomó la decisión de no aplicar riego en ninguna de las dos parcelas con riego, con el fin de inducir a la floración de los cafetos por estrés hídrico como se observa en la Figura 7. Las demás quincenas fueron cubiertas con la cantidad de riego aplicado (6 mm diarios cuando la humedad del suelo estaba por debajo del punto de marchitez permanente), que presentó valores de 27,56%, 24,94% y 26,92%, para las parcelas 1, 2 y 3 respectivamente, como pudo observarse en la Tabla 1.

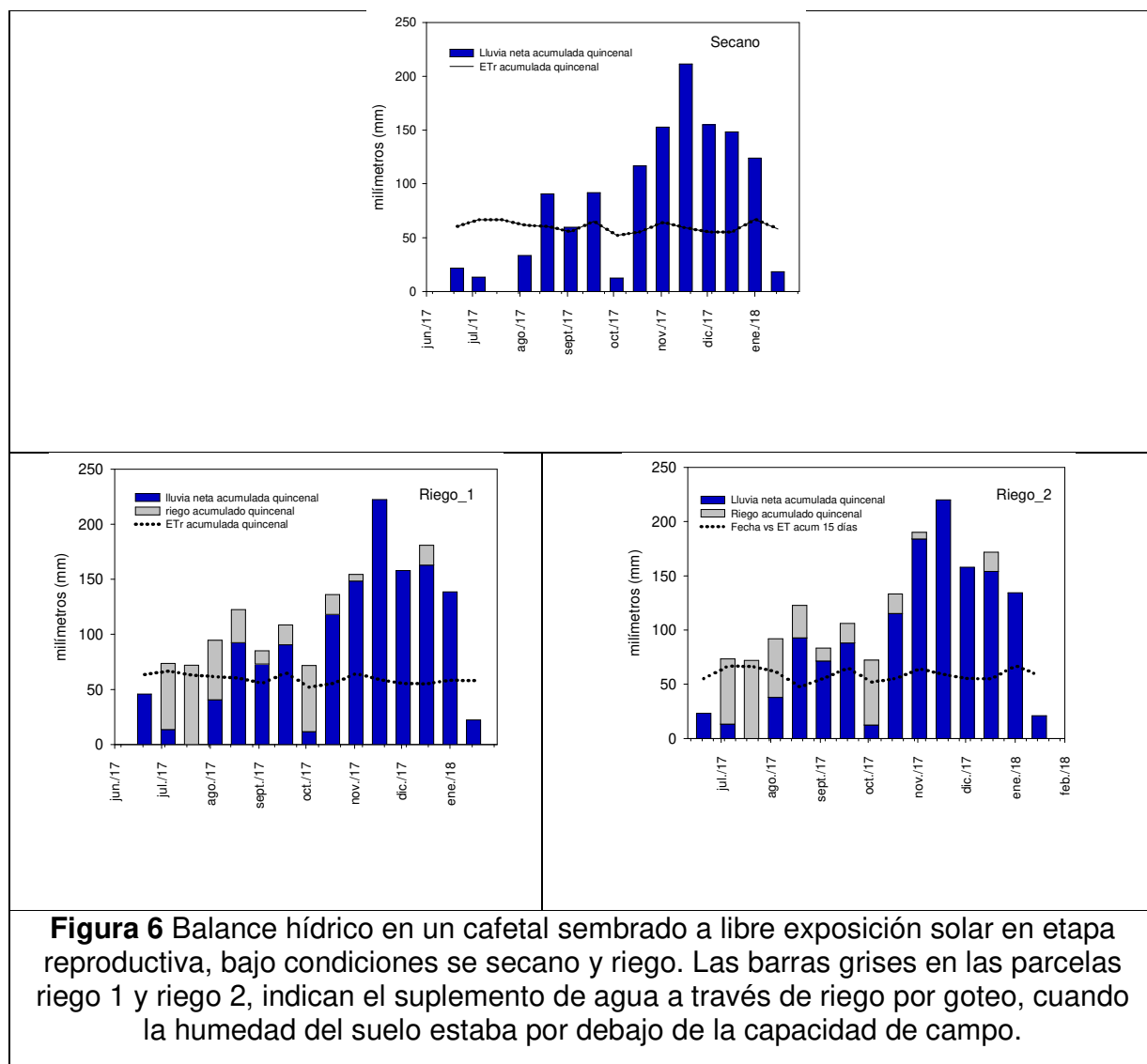
Se puede observar en la Figura 8 que los valores de evapotranspiración real acumulada quincenal, no se redujeron a pesar de que no hubo suficiente lluvia, y en esos mismos periodos se mantuvo agua en el suelo en un rango disponible para la planta en los primeros 30 cm de profundidad (valores de humedad volumétrica entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente).

(Kelso Bucio *et al.*, 2012) consideran que el coeficiente de desarrollo del cultivo y la evapotranspiración de referencia, son los dos factores indispensables para la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos. Determinar el K_c es un factor clave que ayuda a identificar las necesidades que requiere la planta, contribuyendo o permitiendo que las producciones sean más eficientes, ya que se puede determinar la transpiración de las plantas con relación a la evaporación del suelo. En la Tabla 10 se muestran los valores calculados, de coeficiente de cultivo (K_c) los valores fluctuaron entre 0,77 y 0,95 en el periodo evaluado. Estos valores contienen a los encontrados por (Zayas *et al.*, 2014; Zayas *et al.*, 2015) donde el valor del K_c global fue de 0,86 y donde también hay relevancia en las etapas de floración y fructificación con valores 1,04 y 0,49, para un cafetal de 12 años de variedad caturra rojo. De igual manera, en la Figura 9 los valores obtenidos de K_c presentan las mayores variaciones asociadas a las etapas de floración y

producción, definiendo un patrón de mayor requerimiento de agua en estas etapas del cultivo. En el estudio realizado por (Allen, *et al.*, 2006) definen que la variación del coeficiente del cultivo K_c , expresa los cambios en la vegetación y el grado de cobertura del suelo que está representada por la curva del coeficiente del cultivo por etapa fisiológica.

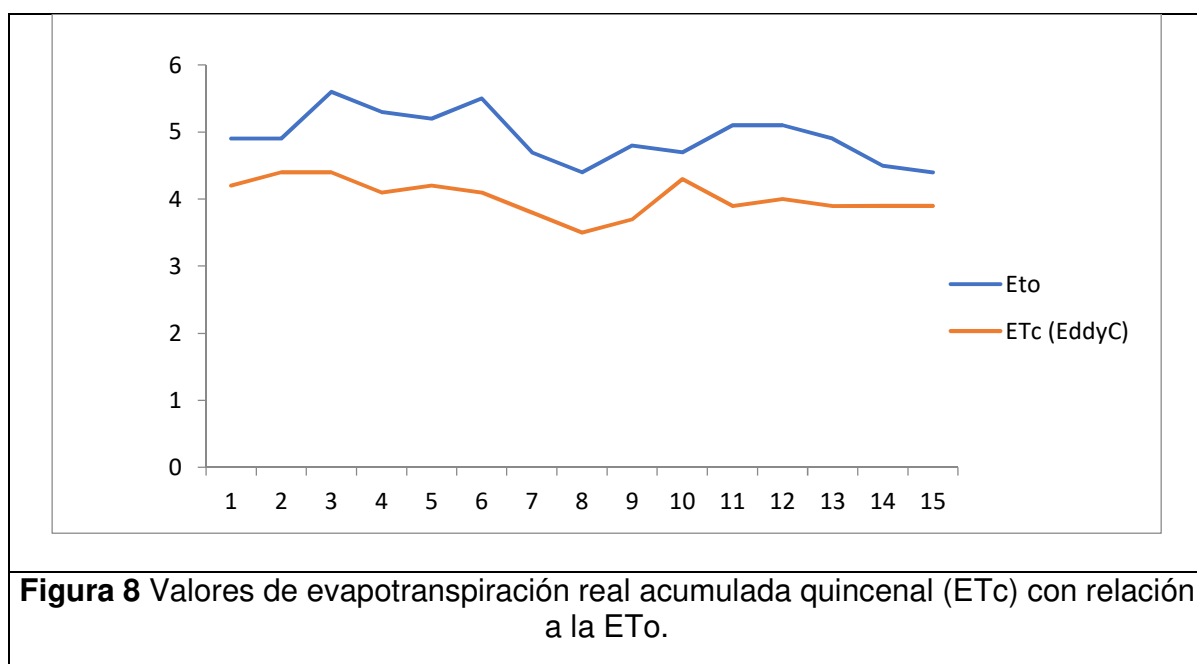
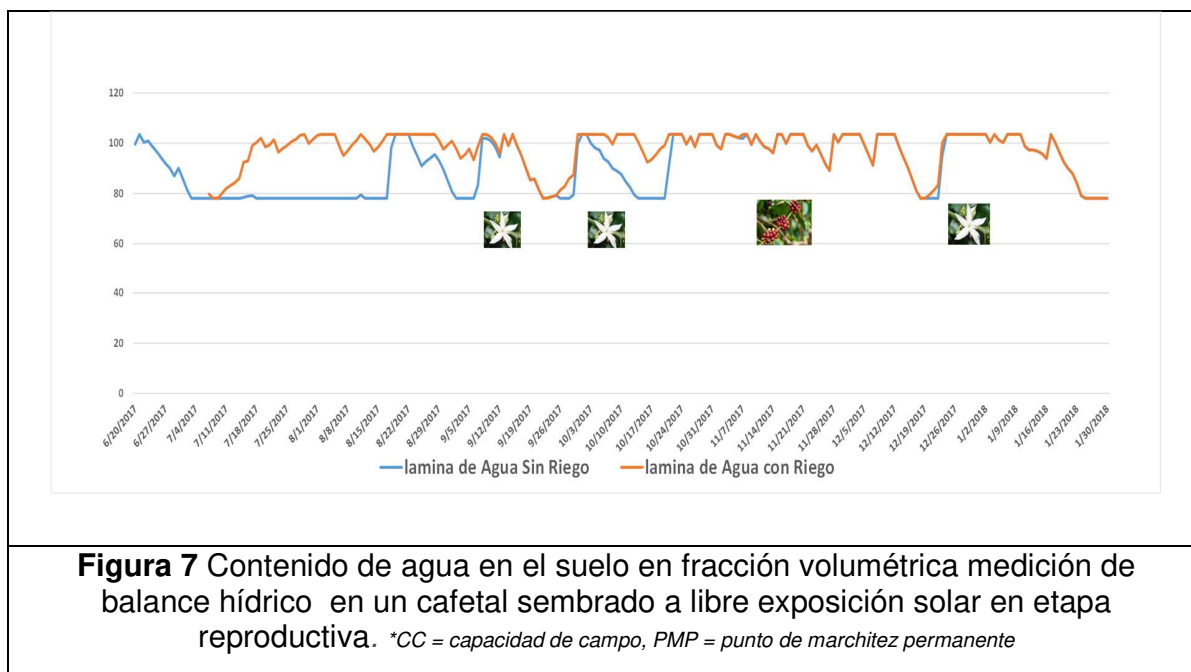
En la Tabla 10 también se describen los valores registrados del comportamiento de la humedad del suelo con y sin riego (lámina de agua), en función de la lluvia neta y la evapotranspiración del cultivo, y en la Figura 10 se presenta la variación del contenido de agua en el suelo en fracción volumétrica de las parcelas, en un cafetal sembrado a libre exposición solar en etapa reproductiva.

A partir de Balance Hidrico propuesto por Deooremmbos y Pruit se estableció la lámina de agua en el suelo teniendo en cuenta la (CC) capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) en los 30 cm de profundidad, en la cual se encuentra la mayor proporción de las raíces del cafeto. A partir del análisis físico se definió que, en las parcelas, a la profundidad citada, presentan límites de PMP y CC en contenidos volumétricos de suelo de 78 y 103,5 mm, respectivamente, lo cual le confiere una capacidad de almacenamiento de 25,5 mm.



*Quincena	LL Externa (LI Ext) mm	Lluvia Neta (LI _n) mm	Riego (R) mm	Eto mm quincena	ETc (EddyC) mm quincena	Kc	lámina de Agua Sin Riego mm	lámina de Agua con Riego mm
1	34,5	34,5	0	73,2	63,4	0,9	91,7	91,7
2	13,6	13,4	60	74,1	66,7	0,9	78,2	86,3
3	0,3	0,1	72	78,3	66,5	0,8	78	100,9
4	41	39,4	54	79,2	61,6	0,8	79,4	100,4
5	92,4	92,7	30	73,5	63,3	0,9	93,8	102,1
6	72,7	72,2	12	82,4	60,8	0,8	92,9	99
7	93,5	89,2	18	66,4	56,7	0,8	85,1	87
8	16,1	12,0	60	61,4	52,0	0,8	87,1	101,1
9	120,2	116,7	18	72,6	55,3	0,8	96,6	101,3
10	170	166,2	6	69,8	64,2	0,9	101,2	101,3
11	222,5	221,2	0	76,7	58,9	0,8	99,8	99,8
12	157,3	158,0	0	71,5	60,0	0,8	98,9	98,9
13	188,8	189,5	18	69,0	58,9	0,8	92,9	93,9
14	103,1	105,4	0	66,8	58,5	0,9	100,8	100,8
15	22,7	22,1	0,0	65,5	58,1	0,9	86,3	86,3

Tabla 10 Descripción del comportamiento de la humedad del suelo con y sin riego (lámina de agua), en función de la lluvia neta y la evapotranspiración del cultivo.
(*corresponde a la integración de los datos de 15 días consecutivos)



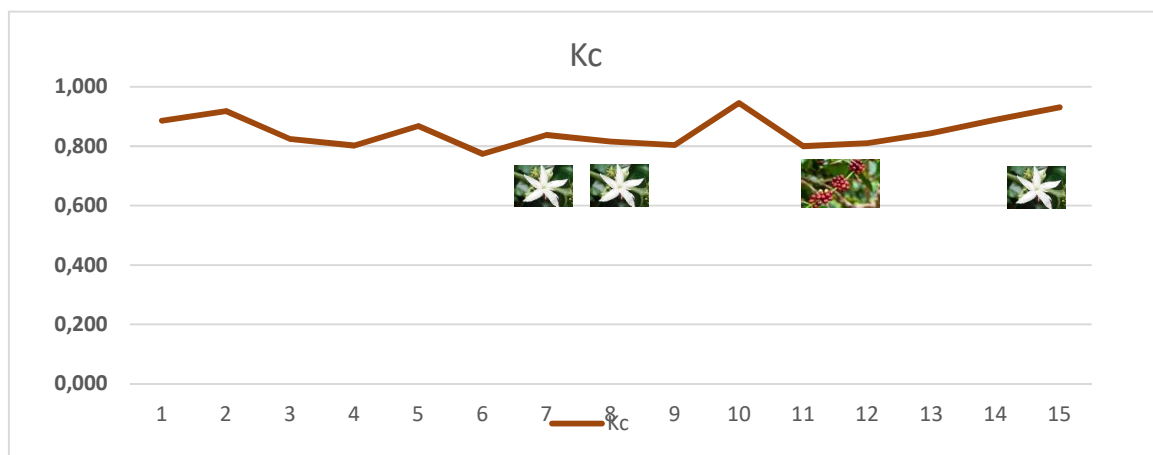


Figura 9 Kc de un cafetal sembrado a libre exposición solar en etapa reproductiva.

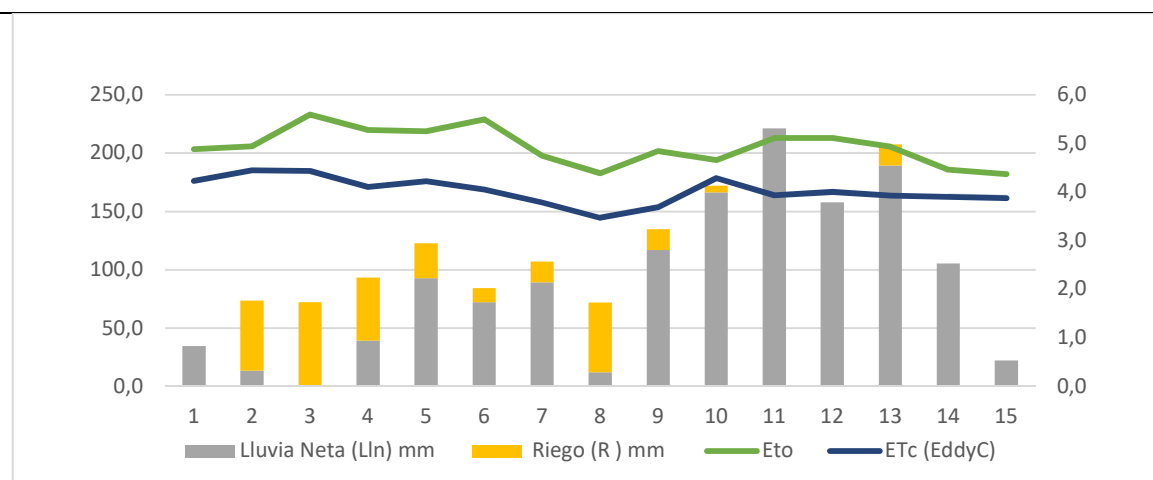


Figura 10 Descripción del comportamiento de la lluvia neta con riego (lámina de agua), evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del cultivo

8.8. Respuesta a la pregunta de investigación.

“La presente investigación buscó responder a la pregunta: ¿El implementar predios hidrológicos con y sin control de la humedad deficitaria del suelo y obtener

los componentes del Balance Hídrico permitirá determinar las necesidades hídricas del cultivo de café en la etapa productiva?”.

La respuesta obtenida fue que a través de la implementación de los predios hidrológicos y la determinación del balance hídrico se pudo determinar las necesidades hídricas del cultivo del café en la fase de producción a través del coeficiente del cultivo K_c , el cual varió en el rango entre 0,70 y 0,95

La presente investigación permitió determinar, en promedio, que a las parcelas hidrológicas ingresó una lluvia externa de 1404 mm en los 7,5 meses de monitoreo del experimento, de la cual se convirtió en lluvia neta (que llegó al suelo), entre el 84 y el 100%, y la lluvia interceptada por los árboles de café varió entre el 0,3 y el 6,8% de la lluvia que ingreso al predio.

La percolación representó entre el 42,8% y el 43,3% de la lluvia neta que llegó al suelo (entre el 46,5% y el 47,07% de la lluvia externa).

La escorrentía representó entre el 3,2% y el 5,4% de la lluvia neta que llegó al suelo (entre el 3,5% y el 5,9% de la lluvia externa).

A partir del análisis físico se definió que, en las parcelas, a la profundidad de 30 cm se presentan límites del punto de marchitez permanente (PMP) y de la capacidad de campo (CC) en contenidos volumétricos de suelo de 78 y 103,5 mm, respectivamente, lo cual le confiere, al suelo, una capacidad de almacenamiento de 25,5 mm.

En promedio, en las parcelas experimentales la evapotranspiración de referencia fue 1080 mm en los 7,5 meses que duró la experimentación, siendo el valor de la

evapotranspiración del cultivo de 905 mm.

La presente investigación permitió determinar, en promedio, un uso consuntivo de 0,84 el valor de la evapotranspiración de referencia, a través del coeficiente de cultivo (K_c).

El riego realizado durante la experimentación, cuando la humedad del suelo estuvo por debajo del punto de marchitez permanente fue de 348 mm, es decir, el 25% de la oferta hídrica de la zona en forma de lluvia externa.

Dado que esta agua de riego es necesario extraerla de fuentes superficiales o subterráneas, afectando la disponibilidad hídrica de la zona cafetera, la cual se caracteriza por tener la mayor demanda hídrica de Colombia y una de las menores ofertas, junto a la región caribe, se plantean las siguientes estrategias para contribuir a la disponibilidad del recurso hídrico en la zona:

1. Aumentar la densidad de siembra por área para optimizar el uso del agua y disminuir las pérdidas por evaporación.
2. Establecer sistemas agroforestales con el café para regular el balance hídrico.
3. Mantener la cobertura del suelo utilizando coberturas muertas que no demandan consumo de agua y disminuyen las pérdidas por evaporación.
4. Almacenar agua lluvias para realizar el riego cuando lo requiera el cultivo.
5. Reusar las aguas residuales tratadas, tanto domésticas como de producción animal y del café generadas en la finca para el riego de los cafetales.

8.9. Corroboración de la hipótesis de trabajo.

“La demanda evapotranspirativa en la Estación Experimental Paraguaicito de Cenicafé, para un cultivo de café en producción a libre exposición solar, se

satisface con una precipitación de al menos 6 mm diarios”.

De acuerdo con los datos obtenidos en la presente investigación se encontró una demanda evapotranspirativa promedio de 4 mm/d', por lo que se acepta la hipótesis de trabajo planteada.

9. CONCLUSIONES

1. Los resultados del estudio indican, que la densidad aparente (DA) y densidad real (DR), porosidad, textura del suelo, entre las tres parcelas, bajo las mismas condiciones del cultivo, son similares, conservando en zona de raíces (50 cm), para la densidad aparente (DA) valores de $0,97 \text{ g.cm}^{-3}$ y para la densidad real (DR) de $2,12 \text{ g.cm}^{-3}$.
2. La implementación de predios hidrológicos ayuda a determinar las mediciones del balance hídrico en un cultivo del cafeto.
3. La capacidad de campo en las 3 parcelas experimentales varió entre $34,65$ y $35,52 \text{ cm}^3 \text{ agua/cm}^3 \text{ suelo}$, y el punto de marchitez permanente en las 3 parcelas experimentales varió entre $24,94$ y $27,56 \text{ cm}^3 \text{ agua/cm}^3 \text{ suelo}$.
4. Durante el período de experimentación (7,5 meses) predominaron los eventos nocturnos de lluvia (68,5%), sobre los eventos diurnos (31,5%), correspondiente a una precipitación acumulada de $962,5 \text{ mm}$ en la noche y $441,9 \text{ mm}$ en el día. Se contabilizaron 200 eventos en el rango de lluvia inferior a 5 mm , 11 eventos entre 5 y 10 mm de precipitación y 14 eventos en el rango mayor a 10 mm de precipitación, con el 10%, 36% y 70%, respectivamente de ocurrencia en el día y el 90%, 64% y 30% de ocurrencia en la noche.
5. Se encontró una la relación lineal entre la lluvia neta y la percolación en las tres parcelas. El valor de la pendiente estuvo entre $0,82$ y $0,89$ indicando que de 100 mm de lluvia que llegan a la superficie del suelo como lluvia neta, el 86% se percola. Sin embargo, los valores de Y_0 indican que sólo ocurre percolación

cuando la lluvia neta es igual o superior 57, 53 y 49 mm, para las parcelas secano, riego 1 y riego 2, respectivamente.

6. La escorrentía dentro del balance hídrico es el componente con menor proporción, se estableció la relación entre lluvia neta integrada (lluvia neta más riego) acumulada quincenal, y la escorrentía acumulada quincenal, en las parcelas con riego, encontrando valores de escorrentía entre 3,2 y 5,4%.

7. Se pudo determinar que, en la mayoría del tiempo evaluado, la lluvia neta estuvo por encima de los valores de la evapotranspiración real, es decir, no se presentaron condiciones hídricas limitantes con respecto a la evapotranspiración del cultivo, debido a que los valores encontrados de la evapotranspiración real acumulada quincenal, no se redujeron a pesar de que no hubo suficiente lluvia, y en esos mismos periodos se mantuvo agua en el suelo en un rango disponible para la planta en los primeros 30 cm de profundidad (valores de humedad volumétrica entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente).

8. La presente investigación permitió determinar, en promedio, que a las parcelas hidrológicas ingresó una lluvia externa de 1404 mm en los 7,5 meses de monitoreo del experimento, de la cual se convirtió en lluvia neta (que llegó al suelo), entre el 84 y el 100%, y la lluvia interceptada por los árboles de café varió entre el 0,3 y el 6,8% de la lluvia que ingreso al predio. La percolación representó entre el 42,8% y el 43,3% de la lluvia neta que llegó al suelo (entre el 46,5% y el 47,07% de la lluvia externa).

9. Se encontró, en promedio, un uso consuntivo de agua de 0,84 el valor de la evapotranspiración de referencia, a través del coeficiente de cultivo (K_c), el cual varió entre 0,77 y 0,95.

10. Algunas estrategias para optimizar el uso del agua en la etapa productiva del cultivo son: Aumentar la densidad de siembra por área, Establecer sistemas agroforestales con el café, Mantener la cobertura del suelo utilizando coberturas muertas, Almacenar agua lluvias, Reusar las aguas residuales tratadas.

10. REFERENCIAS

1. A. J. Rutter, A. J. M. and P. C. R. (1975). A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests II. Generalization of the Model and Comparison with Observations in some Coniferous and Hardwood Stands.
2. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. <https://doi.org/M-56>
3. Allen, R. G., University, U. S., Logan, Utah, E. U., Pereira, L. S., Agronomia, I. S. de, Lisboa, P., FAO. (2006). ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE_Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.
4. Arroyave Zapata, M. A. (2012). Dinámica del agua y los nutrientes solubles en agrosistemas cafeteros, 95.
5. Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems. Global Change Biology.
6. Belén Gallego Elvira, José Francisco Maestre Valero, V. M. Á. (2008). Evaluación de las pérdidas por evaporación en embalses de riego de la cuenca del Segura.
7. Bernal, R. F., Grijalba, E. B., & Guzman, O. (1986). Estudio Detallado de suelos de la Subestación Paraguaicito.
8. Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment (Vol. 104). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
9. Chen, B., Liu, J., Chen, J. M., Croft, H., Gonsamo, A., He, L., & Luo, X. (2016). Assessment of foliage clumping effects on evapotranspiration estimates in forested ecosystems. Agricultural and Forest Meteorology, 216(October), 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.017>
10. Cortical, E., El, E. N., Árias, M. L., Uso, D. De, & Natural, M. (2002). Sobre interceptación, trascolación, 66, 55–66.
11. Cuellar & Duarte. (2001). Alteración del ciclo hidrológico en El Salvador: Tendencias y desafíos para la gestión territorial. Prisma, (44),. Alteración

- Del Ciclo Hidrológico En El Salvador: Tendencias Y Desafíos Para La Gestión Territorial. Prisma, (44), 44(Alteración del ciclo hidrológico en El Salvador: Tendencias y desafíos para la gestión territorial. Prisma, (44),), 16p.
12. de Souza, A. P., Pereira, J. B. A., da Silva, L. D. B., Guerra, J. G. M., & de Carvalho, D. F. (2011). Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e eficiência do uso da água da cultura do pimentão em diferentes sistemas de cultivo. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 33(1), 15–22. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.5527>
 13. Division, E. S., & Collins, F. (2000). A Statistical–Dynamical Parameterization of Interception and Land Surface–Atmosphere Interactions, (1983), 4050–4063.
 14. Dziegielewski, B., & Baumann, D. D. (2011). Predicting Future Demands for Water. *Treatise on Water Science*, 163–188.
 15. Enrique Cisneros Zayas, C. Reinaldo Rey García, C. Roberto Martínez Varona, C. Teresa López Seijas, C. F. G. R. (2014). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el café.
 16. Fassbender, H.W.; Grimm, U. (1981). Modelos edafológicos de sistemas agroforestales.
 17. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFÉ. (2017). Anuario Meteorológico Cafetero 2017. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ. 507 p.
 18. Giraldo-Jiménez, J. F., & Jaramillo-Robledo, Á. (2004). Ciclo hidrológico y transporte de nutrientes en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo. *Cenicafé*, 55(1), 52–68.
 19. González Osorio, H., & Salamanca Jiménez, A. (2008). Unidades suelo región cafetera colombiana. *Cenicafé*, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Retrieved from <https://es.slideshare.net/pipe69/unidades-de-suelo>
 20. Hanchi, A., & Rapp, M. (1997). Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management*. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00066-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00066-2)

21. Hincapié Gómez, E. (2011). Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera, 63–111.
22. Jaramillo-Robledo, Á., & Cháves-Córdoba, B. (1998). Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L.
23. Jaramillo-Robledo, Á., & Cháves-Córdoba, B. (1999). Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café *Coffea arabica* L. al sol y bajo sombra. *Cenicafé*, 50(2), 97–105.
24. Jaramillo, R., A. (2005). Clima andino y café en Colombia.
25. Jaramillo, A. (2003). La Lluvia Y El Transporte De Nutrientes Dentro De Ecosistemas De Bosque Y Cafetales. *Cenicafé*, 54(2), 134–144. Retrieved from <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/249>
26. Javier, Z., Villalobos-reyes, S., Castellanos-ramos, J. Z., & Tijerina-chávez, L. (2005). Crop Coefficient in Broccoli under Drip Irrigation.
27. Kelso Bucio, H. A., Bâ, K. M., Sánchez Morales, S., & Reyes López, D. (2012). Estudio experimental para la determinación de los coeficientes de cultivo de la vainilla (*Vanilla* spp.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263125299007>
28. Klaassen, W., Bosveld, F., & De Water, E. (1998). Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 212–213(1–4), 36–50. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00200-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00200-5)
29. Lee, A. (2009). El movimiento del agua a través de las plantas, 1–13.
30. Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 510–518.
31. María, A., Marín, C., Miguel, N., Herrera, R., Javier, A., Quiñones, P., ... Vinasco, G. (2016). Energy , water vapor and carbon fluxes in Andean agroecosystems : conceptualization and methodological standardization Flujos de energía , vapor de agua y carbono en agroecosistemas andinos : conceptualización y estandarización metodológica *Resumen Introd*, 66, 1–26. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/acag.v66n1.52543>

32. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Retrieved from <http://faolex.fao.org/docs/pdf/col146504.pdf>
33. Ortega, A. F., Soto, G. M., Ramírez, J. C. Q., Serrano, R. D., Enrique, M., & Valdez, R. (2012). Análisis de la transmitancia de luz en un invernadero para producción de jitomate. *Acta Universitaria*, 22(1), 5–10.
34. Ramirez, V. H., & Jaramillo-Robledo, Á. (2007). Distribución de la lluvia en cuatro coberturas vegetales de la zona andina Colombiana.
35. (Ramirez B., V.H. ; Jaramillo R., A.; Arcila P.,J, 2010) Rangos Adecuados de lluvia para el cultivo del café en Colombia. *Avt* 395., Pag. 2
36. Rodríguez V., N.; Quintero Y., L.V.; Osorio O., A. F.; Castañeda, S. A. De Miguel G., A.; Harmsen, J.; Bisschops. Tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas en fincas cafeteras. *Cenicafé*. 2018. 136p. Proyecto GIA.
37. Rojas A., J. M.; Rodríguez V., N.; Romero S., M. A.; De Miguel G., A.; Montes A., M. A.; Quintero Y., L. V. Guía para la evaluación de la huella hídrica de café en Colombia. Proyecto GIA. *Cenicafé*. 2018. 140 p.
38. Rutter, J., Kershaw, K., Robins, P. and Morton, A. J. (1971). A Predictive Model of Rainfall Interception in Forest, 1. Derivation of the Model from Observations in a Plantation of Corsican Pine. *Agricultural Meteorology*.
39. Schnabel, S., & Mateos Rodríguez, B. (2000). Hidrología superficial en ambientes adherados, cuenca experimental Guadalperalón. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. Universidad de La Rioja, XXVI, 113–130.
40. UNESCO. (1978). *El correo de la Unesco*_Un mundo sin agua.
41. Velásquez-Franco, S., & Jaramillo-Robledo, A. (2009a). Redistribución De La Lluvia En Diferentes Coberturas Vegetales De La Zona Cafetera Central De Colombia 1. *Cenicafé*, 60(2), 148–160. Retrieved from [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/213/1/arc060\(02\)148-160.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/213/1/arc060(02)148-160.pdf)
42. Velásquez-Franco, S., & Jaramillo-Robledo, A. (2009b). Redistribución De La Lluvia En Diferentes Coberturas Vegetales De La Zona Cafetera Central De Colombia 1. *Cenicafé*, 60(2), 148–160.

43. Veneklaas, E. J. (2009). Litterfall and nutrient fluxes in two montane tropical rain forests, Colombia (a1), Erik J. Veneklaas 2009, <https://doi.org/10.1017/S0266467400005587> Published online: 01 July
Abstract Litterfall was sampled during one year in two undisturbed Andean forest.