



Artículo

Implementación y evaluación del sistema de riego por borboleamiento en el cultivo de café (*Coffea canephora*) en la Estación Experimental de Sapecho

Implementation and evaluation of the irrigation system by tasseling in coffee (*Coffea canephora*) at the Sapecho Experimental Station

Reynaldo Marca Condori, René Chipana Rivera, Carlos Eduardo Choque Tarqui

RESUMEN:

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la Estación Experimental de Sapecho perteneciente a la Facultad de Agronomía - UMSA, situada a 239 km de la ciudad de La Paz, en donde la temperatura promedio fluctúa sobre 26 °C con una precipitación anual de 1500 mm, el objetivo planteado fue implementar y evaluar el sistema de riego por borboleamiento en el cultivo de café (*Coffea canephora*). Para la implementación del sistema se realizó el diseño agronómico e hidráulico que permitió el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo así como los componentes del sistema, la instalación se hizo en una superficie de 720 m², consta de un tanque de 2300 litros que funciona como dispositivo de carga constante, una línea de derivación de 38,1 mm de diámetro con una longitud de 21 m, cuatro laterales de 19,5 mm de diámetro y 28,5 m de longitud cada una y mangueras de distribución de 5 mm de diámetro y 2,5 m de longitud, la misma fue instalada para irrigar a 80 plantas de café de la variedad robusta. Posteriormente, se efectuó la evaluación de funcionamiento del sistema de riego en la cual se comprobó que el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) es de 83% y coeficiente de distribución (CD) es igual a 76%, estos resultados nos indican que el sistema implementado se encuentra entre bueno y aceptable. La evaluación sobre el efecto del riego nos mostró que la aplicación de riego óptimo es positivo en el crecimiento vegetativo, siendo superior en 30% en desarrollo del área foliar, 30,1% en números de nudos, 38,4% de longitud de bandola y se redujo en un 17% en las pérdidas de frutos respecto al testigo.

PALABRAS CLAVE:

Borboleamiento, implementación, sistema de riego, demanda hídrica.

ABSTRACT:

The present research work was developed in the Sapecho Experimental Station belonging to the Faculty of Agronomy - UMSA, located 239 km from the city of La Paz, it presents an average temperature of 26 °C with an annual rainfall of 1500 mm, the objective was to implement and evaluate the sprinkling irrigation system in the coffee crop (*Coffea canephora*). For the implementation of the system, the agronomic and hydraulic design was carried out that allowed the calculation of the water needs of the crop as well as the components of the system, the installation was made on a surface of 720 m², it consists of a 2300-liter tank that works as constant load device, a 38.1 mm diameter bypass line with a length of 21 m, four laterals of 19.5 mm in diameter and 28.5 m in length each and distribution hoses of 5 mm in diameter and 2.5 m in length, it was installed to irrigate 80 coffee plants of the robusta variety. Subsequently, the operation evaluation of the irrigation system was carried out in which it was found that the Christiansen uniformity coefficient (CUC) is 83% and the distribution coefficient (CD) is equal to 76%, these results indicate that the implemented system is between good and acceptable. The evaluation on the effect of irrigation showed us that the application of optimal irrigation is positive in vegetative growth, being 30% higher in the development of the foliar area, 30.1% in number of nodes, 38.4% in length of bandola and it was reduced by 17% in the loss of fruits compared to the control.

KEYWORDS:

Gushing, implementation, irrigation system, water demand.

AUTORES:

Reynaldo Marca Condori: Tesista, egresado de la Carrera de Ingeniería Agronómica, Facultad de Agronomía-UMSA, La Paz – Bolivia. rmarca0912@gmail.com

René Chipana Rivera: Docente Investigador, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y de Recursos Naturales IIAREN, Facultad de Agronomía-UMSA, La Paz – Bolivia. renechipana@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-8676-2660>

Carlos Eduardo Choque Tarqui: Docente Investigador, Estación Experimental Sapecho, Facultad de Agronomía-UMSA, La Paz – Bolivia. eduard.charly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4825-5283>

DOI: <https://doi.org/10.53287/gmxi5787mw47x>

Recibido: 19/10/2022. Aprobado: 23/11/2022.



INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad que impulso a la civilización para desarrollarse y subsistir, y es la responsable del consumo del 70% de agua dulce del planeta, actualmente, el recurso hídrico es la limitante, por lo que la agricultura y sus aplicaciones de agua deben efectuarse con la mayor eficiencia posible, es decir, se debe aprovechar el agua disponible de tal forma que se pueda regar mayor área o cantidad de plantas con la menor cantidad de agua (FAO, 2008).

En muchos países los programas de conservación del agua de riego son parte integral de planes de manejo, nuevas técnicas de riego deben ser introducidas por los agricultores para reducir las pérdidas totales de agua, entre estas tenemos el microriego (riego por goteo y microaspersión), no obstante, los elevados costos que significa la implementación de estos (principalmente los equipos de filtración y bombeo) hace inviable la introducción a nivel de pequeño y medio agricultor. Una de las tecnologías que ha recibido atención últimamente son los sistemas de microriego que no requieren equipos de filtración ni bombeo.

Según Yitayew, *et al.*, (1995), estos sistemas son conocidos como sistemas a baja presión o “borboleamiento” (bubbler), que no precisa sistemas de filtración y requieren presiones bajas para distribuir agua a los cultivos. Este sistema se basa en el flujo gravitacional debido a pequeñas cargas hidrostáticas, donde la distribución del agua se da directamente a la zona radicular a través de orificios relativamente grandes, lo que elimina los problemas de obturación de los emisores.

A la hora de implementar un sistema de riego, se debe de tomar en cuenta diferentes variables, en el caso del café no era común la utilización de los sistemas de riego; sin embargo, debido al cambio climático presentado en los últimos años se vuelve una necesidad. En algunas especies, como Arábica y Robusta, hay retorcimiento de los brotes antes de que se abran, esto se produce cuando el estrés hídrico se crea después de que pequeñas cantidades de lluvia han provocado el crecimiento inicial, como resultado de la torsión, no pueden alcanzar la fase de apertura y por lo tanto se secan (Camargo *et al.*, 2008).

La torsión (yemas sin abrir o flores secas) es un fenómeno típico causado por la escasez de agua, e incluso puede producir una pérdida de rendimiento de hasta el 50%. La introducción del riego reduce el porcentaje de flores secas (estrellas) del 57% a menos de 5%, con algunos porcentajes prácticamente insignificantes (Camargo *et al.*, 2008).

La planta de café se puede considerar como de cierta tolerancia a la sequía, aunque la cosecha se puede ver reducida significativamente cuando el suministro es inadecuado. Debido a la carencia de agua, se merma el crecimiento vegetativo y el hecho de que el café usualmente produce flores y frutos sólo en la madera formada por el crecimiento de ramas laterales durante el año anterior, permite que la disminución de la cosecha por una deficiencia de agua, muy rara vez se observe en el mismo año en que ha ocurrido esa carencia, sino más bien se presenta en la cosecha siguiente (CORECAF, 2000).

En el presente trabajo se muestra las consideraciones teóricas y técnicas para realizar el diseño, instalación y evaluación del sistema de riego por borboleamiento. Así también se conoció el efecto de la aplicación de riego en el crecimiento vegetativo del cultivo de café, tomando en cuenta los requerimientos hídricos del cultivo, esto para mejorar los rendimientos y calidad del producto.

Rawlins (1977), describió por primera vez un sistema de riego de baja carga, sistema de conducto cerrado llamado sistema de riego por burbujeo o borboleamiento que funciona a baja presión, es apto para cultivos de árboles como huertos y viñedos.

Este sistema opera de una manera que es muy similar a un sistema de goteo presurizado, pero entrega tasas de flujo mucho mayores al sistema de riego por goteo, a través de una tubería de diámetro pequeño, denominado manguera de suministro, esta se encuentra conectada a una tubería lateral. Los laterales se entierran entre hileras alternas de árboles, las mangueras de entrega suministran de agua a cada árbol. Se aplica agua a una cuenca alrededor de cada árbol, con este sistema se puede lograr una uniformidad de riego cercana al 100%, dependiendo del tamaño del sistema, la carga de

operación puede variar de 0,5 a 2 metros (Reynolds, 1993).

Los sistemas de riego por borboleamiento son particularmente adecuados para cultivos hortícolas y especies frutales, estos sistemas operan a bajas presiones y sin necesidad de equipos de filtración y bombeo, pero sin embargo pese a estas ventajas y simplicidad, los sistemas de riego por borboleamiento son desconocidos por los técnicos encargados de riego e irrigadores de nuestro país.

Los sistemas de riego localizados, si están bien diseñados y gestionados, permiten alta eficiencia de riego y uso del agua, y entre ellos está el riego por borboleamiento, un tipo de sistema de flujo continuo localizado, considerado el de menor costo de equipo y operación (Abdel, 2016).

Con el presente trabajo de investigación, se implementó un sistema de riego de baja presión para cultivos de campos a nivel que no utilice equipos de filtración y bombeo por lo que requiere un menor costo de inversión, en el caso del café no era común la utilización de los sistemas de riego; sin embargo, debido al cambio climático presentado en los últimos años se vuelve una necesidad.

El alto costo de instalación del riego localizado, es uno de los principales problemas que deben afrontar los medianos y pequeños productores, aunado a ello está la alta demanda de energía para obtener la carga hidráulica necesaria para el funcionamiento del sistema lo que implica gastos por bombeo, por ello se pretende utilizar un sistema de riego localizado a baja presión que contribuya a la satisfacción de los requerimientos hídricos del cultivo de café.

Este trabajo tuvo como objetivo general implementar y evaluar el sistema de riego por borboleamiento en el cultivo de café (*Coffea canephora*) en la Estación Experimental de Sapecho (EES). Para lograr este objetivo se trazaron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar el diseño del sistema de riego por borboleamiento en función de los parámetros agronómicos considerando las condiciones climáticas, propiedades físicas

del suelo y las necesidades hídricas del cultivo de café.

- Elaborar el diseño hidráulico para la implementación del sistema de riego por borboleamiento en el cultivo de café.
- Evaluar la uniformidad de distribución del sistema de riego por borboleamiento.
- Determinar el efecto de la aplicación de riego por borboleamiento sobre el crecimiento vegetativo del cultivo de café.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la Estación Experimental de Sapecho dependiente de la Facultad de Agronomía - UMSA. En el municipio de Palos Blancos cuarta sección de la provincia Sud Yungas del departamento de La Paz, se encuentra localizado a 239 Km de distancia de la ciudad de La Paz (Chipana, 2015).

Las características climáticas en la zona, con amplias variaciones estacionales, la temperatura media anual es de 26 °C, con valores mínimos de 16 °C y una máxima de 36 °C, es común la presencia de heladas entre los meses de julio y septiembre. La precipitación acumulada alcanza un promedio 1500 mm con valores mínimos de 16.3 mm en agosto y máxima de 221,6 mm en enero y una humedad relativa promedio de 78% SENAMHI (2019).

Para el diseño del sistema de riego se siguió la metodología planteada por Fuentes (2004), quien plantea que para implementar un sistema de riego se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos: Recopilación de información básica, diseño agronómico, diseño hidráulico e implementación.

El trabajo de investigación se desarrolló en una parcela que cuenta con un área de 792 m² que constituye una superficie de 0,079 ha. Para realizar el estudio del suelo en el área de la parcela demostrativa se realizó una calicata que permitió identificar las características morfológicas del suelo. Se tomaron muestras a dos profundidades 0 – 30 cm y 30 – 60 cm, y se identificaron los horizontes presentes y posteriormente se analizaron en el laboratorio de suelos de la Estación Experimental de Sapecho.

El diseño agronómico se desarrolló en dos fases: cálculo de las necesidades de agua y

determinación de los parámetros de riego (dosis, intervalo entre riegos, caudal necesario, duración de riego).

El diseño hidráulico se estableció a partir del caudal y la carga determinada en la toma que alimentará a la parcela en estudio, lo que permitió determinar los diámetros de tubería que se utilizó en cada uno de los componentes del sistema, cumpliendo con parámetros hidráulicos establecidos en este tipo de sistemas de riego. Para el cálculo de los diámetros de tubería se consideró el método de pérdida de carga porcentual en el que se establece un límite de pérdida de carga por fricción para cada tubería, esta pérdida de carga porcentual se determinó con la siguiente ecuación:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{(H_u - H_{do}) - \Delta Z}{FL} = \frac{(h_f)_a}{FL} \quad (1)$$

Dónde: h_f/L = Gradiente de pérdida de carga (m/m); H_u = Altura de presión aguas arriba (m); H_{do} = Altura de presión aguas abajo (m); Δz = Cambio de elevación entre aguas arriba y aguas abajo (m); $(h_f)_a$ = Pérdida de carga admisible en la tubería (m); F = Factor de Christiansen.

Se asume que el 50% de la carga de diseño se puede perder en cada componente, por lo cual este es el límite de pérdida de carga permisible en cada una de las tuberías. Para determinar la pérdida de carga en cada componente se utilizó la ecuación combinada de Darcy-Weisbach y Blasius, que es recomendado para el dimensionamiento de tuberías lisas de pequeño diámetro (menores a 128 mm):

$$h_f = 7,89 \times 10^5 * F * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} * L \quad (2)$$

Dónde: h_f = Pérdida de carga (m); Q = Caudal (l/s); D = Diámetro (mm); L = Longitud de la tubería (m).

Para la implementación del sistema se realizó en base a los resultados del diseño agronómico e hidráulico, y se iniciaron desde la implementación del dispositivo de carga constante que fue un tanque de 2.300 litros, luego se realizó la instalación de la línea de derivación, laterales y por últimos las mangueras de entrega, para este último se procedió a calibrar de las elevaciones de las mangueras de entrega, para esto se utilizó el

diagrama piezométrico anteriormente calculado, se usó las elevaciones de la carga de diseño o dispositivo de carga constante como dato de referencia para instalar el sistema para así evitar las ondulaciones que el suelo pueda presentar, después de que se hayan colocado todas las mangueras de entrega en las elevaciones calculadas, el sistema se encendió para realizar una calibración dinámica, para asegurar caudales casi iguales en cada punto de entrega.

La evaluación del sistema se realizó mediante el registro del volumen de agua, que sale por cada emisor evaluado. Esta medición se realizó mediante un recipiente graduado, en un tiempo determinado por un cronometro, y posteriormente los resultados se sometieron a la ecuación de uniformidad de distribución y coeficiente de uniformidad de Christiansen.

La parcela experimental tiene un total de 80 plantas de las cuales se marcaron al azar 20 plantas por tratamiento, en cada una de ellas se seleccionaron 3 bandolas al azar (1 de la parte alta, 1 de la parte media y 1 en la parte baja) por tratamiento de donde se tomaron los datos para evaluar las variables de crecimiento y productivo.

La evaluación del efecto del riego por borboleamiento en el cultivo de café se desarrolló en el marco conceptual de una investigación de tipo experimental de campo, a través de la aplicación de riego y determinar su efecto sobre el crecimiento vegetativo y productivo del cultivo de café. Se utilizó una comparación de medias con prueba t-student, que permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de las poblaciones son iguales, frente a la hipótesis alterna de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Se probaron dos tratamientos, que consistió en determinar el efecto del riego óptimo en el cultivo, frente a un cultivo sin uso del riego, las cuales serán: Sin riego (T0), Con riego (T1), para el tratamiento se aplicó el agua teniendo en cuenta los requerimientos óptimos del cultivo. Para la evaluación del efecto del riego en el cultivo de café, se utilizó el método estadístico de comparación de medias con prueba t-student para dos muestras independientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis climático

En la tabla 1, se muestran la base de datos promedio de los parámetros: precipitación,

temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, registrados por la estación meteorológica de la Estación Experimental de Sapecho, durante los periodos de 1996 a 2015, esto para la determinación de las demandas de evapotranspiración de referencia para cada mes.

Tabla 1. Datos climáticos promedios de la Estación Experimental de Sapecho (1996 - 2015).

Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)	Velocidad viento (km/h)
Enero	32,3	21,3	26,8	207,9	83,6	4,0
Febrero	31,6	21,4	26,5	190,8	85,5	3,6
Marzo	31,9	21,1	26,5	190,9	84,6	3,8
Abril	31,9	20,1	26,0	87,4	84,9	3,4
Mayo	29,3	18,4	23,9	52,3	85,4	2,8
Junio	28,4	17,7	23,1	40,0	85,5	2,9
Julio	28,9	16,6	22,7	40,2	83,0	3,1
Agosto	31,2	16,6	23,9	37,5	80,9	3,1
Septiembre	32,9	17,3	25,1	74,1	78,0	3,3
Octubre	33,3	19,8	26,6	144,3	78,3	3,8
Noviembre	33,0	20,4	26,8	113,9	80,5	3,2
Diciembre	32,7	21,1	26,9	164,8	82,4	3,4

Fuente: Estación climática de la Estación Experimental de Sapecho.

En base a los datos históricos de la estación climatológica de la Estación Experimental de Sapecho se ha construido el diagrama bioclimático que se muestra en la figura 1, relacionando la evapotranspiración y la precipitación. El mismo que refleja elevadas precipitaciones desde enero hasta

marzo, mostrando un exceso de humedad por las precipitaciones elevadas durante el periodo vegetativo, paralelamente a esta situación, el periodo de estiaje (época seca) es desde abril a diciembre, teniéndose así una precipitación anual media de 1344,1 mm.

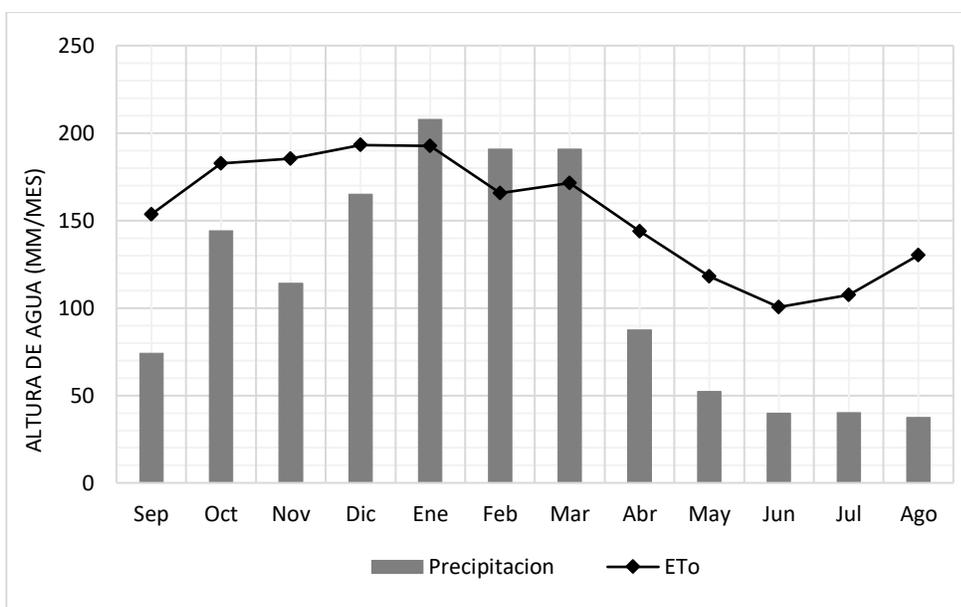


Figura 1. Diagrama bioclimático.

Propiedades físicas e hidro físicas del suelo

En la tabla 2, se observan los resultados de las muestras de suelo tomadas de la parcela en estudio y analizadas en el laboratorio de la Estación Experimental de Sapecho, donde se pudo determinar

los parámetros como la textura, densidad aparente, humedad a capacidad de campo y humedad a punto de marchitez permanente.

Tabla 2. Propiedades físicas e hidro físicas del suelo.

	Parámetro	Unidad	Profundidad	Resultado	Método
Textura	Arena	%	0 - 30	31,6	Bouyoucos
			30 - 60	29,6	
	Limo	%	0 - 30	43,6	
			30 - 60	46,6	
	Arcilla	%	0 - 30	24,8	
			30 - 60	23,8	
	Clase textural		0 - 30	Franco	
	Clase textural		30 - 60	Franco	
Densidad aparente		g/cm ³	0 - 30	1,37	Cilindro
			30 - 60	1,35	
Humedad a capacidad de campo		%	0 - 30	31,5	Soil water de USDA (2006)
			30 - 60	15,5	
Humedad a punto de marchitez permanente		%	0 - 30	31,5	
			30 - 60	15,5	

En la tabla 2, se observan los resultados de textura del suelo en el área de estudio, con arena 29,6 a 31,6%, limo 43,8 a 46,8% y arcilla 23,8 a 24,8% en proporciones óptimas para que el suelo se clasifique con una clase textural franco, que es un suelo de elevada productividad agrícola óptima para la mayoría de los cultivos.

Por otro lado, la tabla 2 también muestra que la densidad aparente es de 1,35 y 1,37 g/cm³ menor a 1,9 g/cm³, lo cual indica que no es un suelo compacto, favoreciendo a las raíces que necesitan poca energía para su desarrollo y poco oxígeno (Miranda, 2004).

También se observan los resultados de humedad a capacidad de campo 31,5% y humedad a punto de marchitez permanente 15,5%, a partir de estos valores se puede obtener la disponibilidad de agua en el suelo, haciendo una diferencia entre el porcentaje de humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), teniendo como resultado 16% de disponibilidad de agua en el

suelo dentro de ese rango, pero no toda esa cantidad de agua es aprovechado por la planta, lo aprovechado es lo que está a su alcance y es tomado por las raíces sin ningún esfuerzo denominado agua fácilmente disponible.

Infiltración del suelo

Los resultados de la práctica de infiltración se ven reflejados en la figura 2, a medida que incrementa el tiempo de infiltración del agua en el suelo, la tasa de infiltración va disminuyendo hasta llegar a ser constante. Esto se determinó cuando el intervalo de tiempo que tardó en infiltrar a una lámina constante, a partir de este instante se obtuvo una velocidad de infiltración básica igual a 6,92 mm/h (0,692 cm/h), según USDA (1999), indica que la infiltración en el suelo es moderadamente lenta, esto significa que por cada metro cuadrado de suelo la cantidad de agua infiltrada será de 6,92 litros en una hora. La velocidad de infiltración del agua en el suelo es moderadamente lenta lo que implica una alta capacidad de retención de agua.

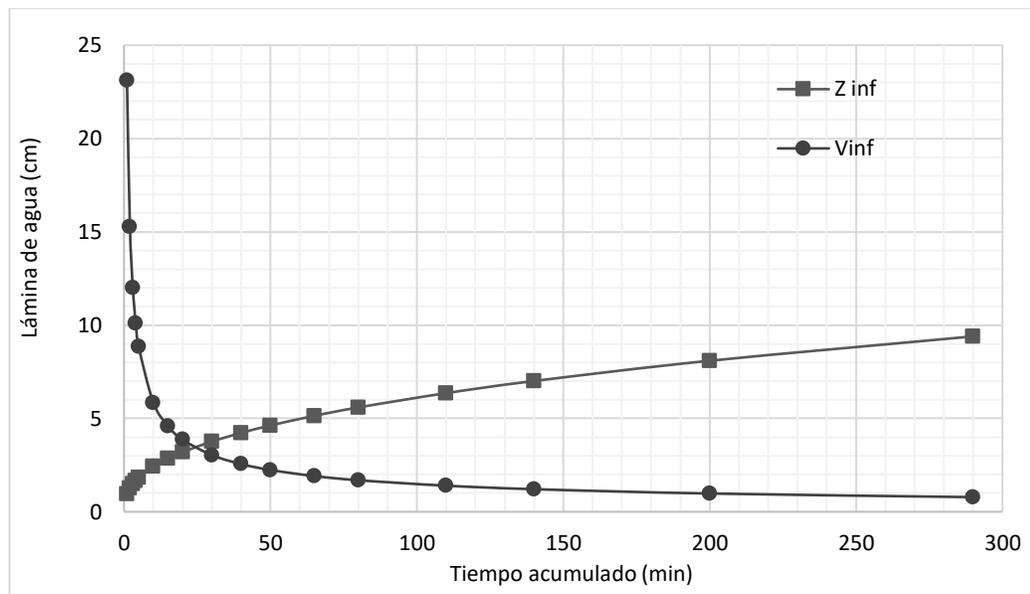


Figura 2. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada del suelo.

La parcela en estudio presenta característica de suelo con clase textural franco, con una velocidad de infiltración baja, por lo tanto, la retención de humedad del suelo es alta, lo que nos indica que este suelo es apto para el riego por borboleamiento, ya que este tipo de riego no está recomendado para suelos con velocidades de infiltración alta, esto por la las grandes tarifas de descarga que tienen.

Según Berlín (1982), la velocidad de infiltración depende principalmente de la porosidad y permeabilidad del suelo. A su vez depende de la estructura del suelo y por lo tanto, de su textura, su contenido de materia orgánica y de la labranza.

CENTA (2002), explica que el agua que se infiltra en el suelo, puede tomar tres caminos: una parte queda almacenada en la zona de raíces y es el agua aprovechada por la planta, para realizar sus funciones fisiológicas y su desarrollo; otra se evapora desde la superficie del suelo y otra parte se desplaza hasta una profundidad mayor que la profundidad de raíces; a esta última se le conoce como filtración profunda o percolación, esta agua tampoco es utilizada por las plantas para su desarrollo. Esta última condición es más frecuente en suelos con altas tasas de velocidad de infiltración y baja capacidad de retención de humedad.

Diseño agronómico

El cálculo de la evapotranspiración de referencia se realizó utilizando el programa CROPWAT 8,0, a partir de los datos históricos obtenidos de la estación climatológica de la Estación Experimental de Sapecho, para el diseño del sistema se tomó la evapotranspiración de referencia del mes con el valor más alto del año, con un valor igual a 6,24 mm/día.

Para el dato del coeficiente del cultivo fue considerada en base al manual N° 56 de riego y drenaje, FAO (1998), para este estudio se eligió para un suelo con cobertura vegetal, los valores van de 1,05 a 1,10 en todo el desarrollo de la planta, para el diseño del sistema de riego se consideró el valor máximo.

Se tomó un caudal por emisor igual a 0,009 l/s, este caudal fue determinado al inicio del diseño del sistema de riego. Para irrigar el área de estudio se ha propuesto un solo turno de riego de una hora con 26 minutos con un intervalo de riego de tres días. Las necesidades hídricas requeridas por el cultivo se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Necesidades hídricas requeridas por el cultivo

Descripción		Unidad	Valores
Evapotranspiración de referencia	Eto	mm/día	6,24
Coeficiente del cultivo	Kc		1,1
Evapotranspiración del cultivo	Etc	mm/día	6,86
Evapotranspiración reducida	ETcred	mm/día	4,12
Coeficiente de cobertura	Kr		0,6
Frecuencia de riego	F	días	3
Lámina neta	Zn	mm	12,36
Lámina bruta	Zb	mm	14,54
Volumen bruto por árbol	Vba	l/planta	45,66
Tiempo de riego	Tr	min	85

Diseño hidráulico

Determinación de parámetros y criterios de diseño

Tabla 4. Parámetros y criterios de diseño.

Descripción		Unidad	Valores
Dispositivo de carga constante			
Carga de diseño	Hd	m	1,5
Criterios de diseño			
Espacio entre planta	Sp	m	3
Espacio entre hileras de árboles	Sr	m	3
Espaciamento entre laterales	Sl	m	6
Espacio entre emisores	Se	m	3
Elevación máxima de la manguera de entrega	Hmax	m	1
Elevación mínima de la manguera de entrega	Hmin	m	0,30
Longitud y el número de tuberías			
Longitud de la línea de derivación	Ld	m	21
Longitud de los laterales	Ll	m	28,5
Longitud de las mangueras de suministro	Le	m	2,5
Número de emisores por lateral	Ne	unid	20
Número de laterales	Nl	unid	4
Número total de árboles	Nt	unid	80
Tasas de flujo de diseño para las tuberías			
Caudal del emisor	Qe	l/s	0,009
Caudal del lateral	Ql	l/s	0,18
Caudal de la línea de derivación	Qd	l/s	0,72

Diámetro de la línea de derivación

La pérdida total de carga permitida dentro del sistema por borboleamiento, se debe disipar mediante la fricción, dentro los accesorios, línea de derivación, laterales y mangueras de distribución, esta se obtuvo mediante la ecuación 1:

$$(h_f)_a = 1,50 \text{ m} - 0,30$$

$$(h_f)_a = 1,20 \text{ m}$$

Se asume que el 50% de la pérdida de carga permitida se puede perder dentro de la línea de derivación:

$$(hf)_{ad} = 0,50 * 1,20$$

$$(hf)_{ad} = 0,60 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga en la línea de derivación

Tabla 5. Pérdidas de carga en la línea de derivación.

Lateral	Longitud parcial (m)	Longitud acumulada (m)	Diámetro tubería (mm)	Caudal (l/s)	Pérdida de carga parcial (m)	Pérdida de carga acumulada (m)
1	4,5	4,5	38,1	0,72	0,062	0,062
2	6	10,5	38,1	0,54	0,050	0,112
3	6	16,5	38,1	0,36	0,025	0,136
4	4,5	21	38,1	0,18	0,005	0,142

Mediante la ecuación 2, para un diámetro de 38,1 mm (1,5"), para un caudal de 0,72 l/s y una longitud de 21 m, para 4 salidas se obtuvo una pérdida de carga $H_f = 0,14$ m en la línea de derivación.

Diámetro del lateral y mangueras de entrega

Dentro de la línea de derivación, se calcularon las pérdidas de carga por fricción a la entrada de los laterales, a través de la ecuación 2, y mediante el método tramo a tramo, es decir, calculando la pérdida de carga entre la salida y los laterales, los resultados se observan en la tabla 6:

Tabla 6. Pérdidas de carga en la entrada de los laterales.

Lateral	Longitud (m)	Caudal (l/s)	hf (m)
1	4,5	0,72	0,062
2	6	0,54	0,050
3	6	0,36	0,025
4	4,5	0,18	0,005
Total			0,142

Por lo tanto, los anteriores deben ser sustraídos de la presión de diseño, para conocer la presión de entrada en cada lateral:

Cálculo de pérdidas de carga en los laterales

Tabla 8. Pérdidas de carga en los laterales.

Emisor	Longitud parcial (m)	Longitud acumulada (m)	Diámetro tubería (mm)	Caudal (l/s)	Perdida de carga parcial (m)	Perdida de carga acumulada (m)
1	1,5	1,5	19,05	0,18	0,049	0,049
2	3	4,5	19,05	0,162	0,082	0,131
3	3	7,5	19,05	0,144	0,066	0,197
4	3	10,5	19,05	0,126	0,053	0,249
5	3	13,5	19,05	0,108	0,040	0,290
6	3	16,5	19,05	0,09	0,029	0,319
7	3	19,5	19,05	0,072	0,020	0,338
8	3	22,5	19,05	0,054	0,012	0,350
9	3	25,5	19,05	0,036	0,006	0,356
10	3	28,5	19,05	0,018	0,002	0,358

Tabla 7. Presión de entrada en cada lateral.

Lateral	hd – hf (m)
1	1,44
2	1,39
3	1,36
4	1,36

Se determinó los diámetros de los laterales y emisores, así como la altura para el cuarto lateral, la pérdida de carga permitida dentro el lateral y en las mangueras de distribución se obtuvo mediante la ecuación 1, y es la diferencia entre la presión de entrada en el lateral y la altura mínima de los emisores:

$$(h_f)_a = 1,36 \text{ m} - 0,30 \text{ m}$$

$$(h_f)_a = 1,06 \text{ m}$$

El diámetro de los laterales y emisores es uno de los aspectos más críticos en el diseño de los sistemas por borboleamiento. Para determinar estos factores, se calculó la pérdida de carga permitida en el lateral y emisores, asumiendo un 50% de hfa:

$$(hf)_{ad} = 0,50 * 1,06 \text{ m}$$

$$(hf)_{ad} = 0,53 \text{ m}$$

Mediante la ecuación 2, para un diámetro de 19,05 mm (3/4”), para un caudal 0,18 l/s y una longitud de 28,5 m, para 10 salidas se obtuvo una pérdida de carga $H_f = 0,36$ m, este valor se encuentra dentro de la pérdida de carga permitida en el lateral que era igual a 0,53 m.

Cálculo de pérdida de carga en las mangueras de distribución

$$(hf)dh = 7,89 \times 10^5 * \frac{(0,009 \text{ l/s})^{1,75}}{(4,9 \text{ mm})^{4,75}} * 2,5 \text{ m}$$

$$(hf)dh = 0,27 \text{ m}$$

Mediante la ecuación 2, para un diámetro de 4,9 mm se obtuvo una pérdida de carga $H_f = 0,27$ m, lo que totaliza una pérdida de carga total en el lateral igual a $h_{ft} = 0,63$ m.

Cálculo de la altura de los emisores

Tabla 9. Altura de los emisores para un lateral.

Número de salidas	Caudal (l/s)	Longitud (m)	Longitud acumulada (m)	(hf)l (m)	Presión disp. en lateral(m)	(hf)e (m)	Pérdida accesorios (m)	Pérdida total (m)	Presión disp. en emisor (m)	Altura emisor (m)	Punto referencia (m)
0					1,36						0
1	0,180	1,5	1,5	0,049	1,31	0,27	0,012	0,32	1,04	1,04	-0,46
2	0,162	3	4,5	0,082	1,23	0,27	0,012	0,40	0,96	0,96	-0,54
3	0,144	3	7,5	0,066	1,16	0,27	0,012	0,47	0,89	0,89	-0,61
4	0,126	3	10,5	0,053	1,11	0,27	0,012	0,52	0,84	0,84	-0,66
5	0,108	3	13,5	0,040	1,07	0,27	0,012	0,56	0,80	0,80	-0,70
6	0,090	3	16,5	0,029	1,04	0,27	0,012	0,59	0,77	0,77	-0,73
7	0,072	3	19,5	0,020	1,02	0,27	0,012	0,61	0,75	0,75	-0,75
8	0,054	3	22,5	0,012	1,01	0,27	0,012	0,62	0,74	0,74	-0,76
9	0,036	3	25,5	0,006	1,00	0,27	0,012	0,63	0,73	0,73	-0,77
10	0,018	3	28,5	0,002	1,00	0,27	0,012	0,63	0,73	0,73	-0,77
				0,358							

Una vez determinados los diámetros de los laterales y emisores se calculó la altura de los emisores, tal como se muestra en la tabla 9, las columnas 5 y 7 son calculadas a partir de la ecuación 2.

Trazado del diagrama piezométrico

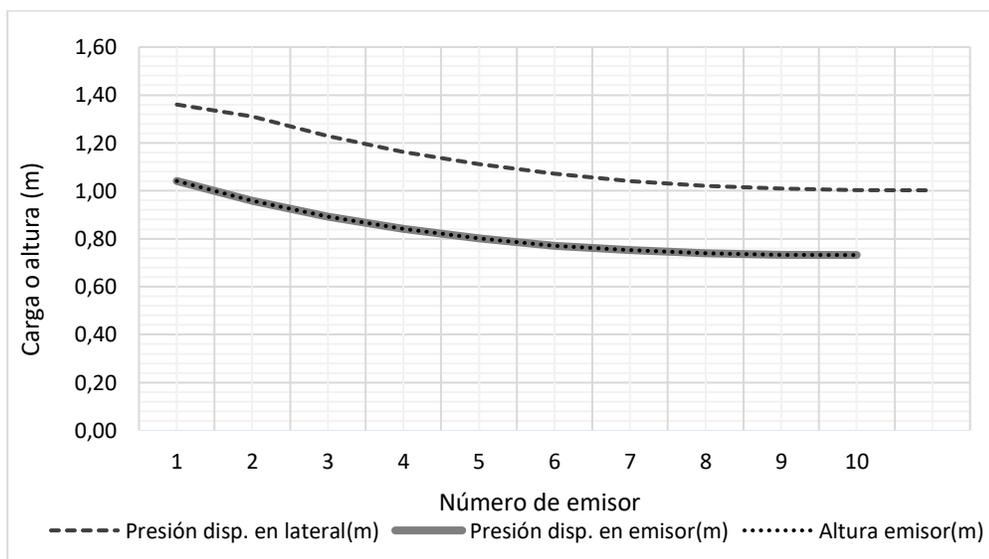


Figura 3. Diagrama piezométrico para un lateral.

La figura 3, muestra el diagrama piezométrico que sirve de mucha ayuda para la instalación del sistema, la carga de diseño mantenida constantemente a través de un flotador, se tomó como punto de referencia para la instalación del sistema esto para evitar ondulaciones superficiales que pudiera afectar la altura de los emisores. En la columna punto de referencia de la tabla 9, muestra la diferencia de alturas entre el emisor y la carga de diseño que es el punto de referencia. Después que los emisores fueron instalados se procedió a poner en funcionamiento el sistema, esto para hacer una calibración dinámica a las alturas de los emisores para asegurar un caudal uniforme en todos los puntos.

Evaluación

Evaluación del coeficiente de uniformidad del sistema de riego

Las evaluaciones se realizaron mediante el registro del volumen de agua, que sale por cada emisor del sistema, posteriormente se determinó el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) y coeficiente de distribución (CD):

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum |0,1711|}{1,0419} \right] * 100$$

$$CU = 83\%$$

$$CD = \frac{0,0066 \text{ l/s}}{0,0087 \text{ l/s}} * 100$$

$$CD = 76\%$$

La interpretación del funcionamiento de los emisores basados en la uniformidad de distribución, es posible realizarla en base a las categorías de funcionamiento de riego de Merriam y Keller (1978).

De acuerdo a los resultados obtenidos de coeficiente de uniformidad CUC = 83% y coeficiente de distribución CD = 76%, este resultado nos indica que el sistema de riego tiene una buena y aceptable uniformidad de distribución.

Evaluación del efecto de aplicación de riego por borboleamiento

La evaluación del riego en el cultivo de café para determinar su efecto sobre el crecimiento vegetativo y productivo del cultivo de café, se desarrolló aplicando riego complementario según el

requerimiento óptimo del cultivo. En todo el desarrollo del estudio se aplicó 1.369,8 l/planta, los resultados de las variables estudiadas se muestran a continuación:

Área foliar de la planta

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que, en la medición realizada, el área foliar de la planta de café se vio favorecida por la aplicación de riego.

Tabla 10. Prueba de medias en la variable área foliar de la planta.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	2,01	0,45	a
T1	2,86	0,36	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable área foliar de la planta, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que el área foliar del testigo sin aplicación de riego alcanza un incremento promedio de $2,01 \pm 0,45 \text{ m}^2$, y con el tratamiento aplicación de riego alcanza un incremento promedio de $2,86 \pm 0,36 \text{ m}^2$.

El comportamiento de la primera medición y la última medición en el área foliar del café, muestra que la aplicación de riego con una lámina óptima requerida por el cultivo supera en un 30% más de área foliar que en el tratamiento que no se aplicó riego.

Valencia (1973), concluye que la hoja es el principal órgano donde se realiza la fotosíntesis, por lo que el conocimiento de este carácter es un índice adecuado para estimar la capacidad de la planta para transformar la energía luminosa en energía química; también que el área foliar del café al igual que en todas las plantas constituye una de las características más importantes, ya que la misma ha resultado ser un adecuado indicador de productividad o rendimiento.

En estudios se ha comprobado que el área foliar es una variable relacionada directa o indirectamente con los procesos de crecimiento vegetativo, tasa de desarrollo, eficiencia sintética, evapotranspiración, uso de nutrientes y agua. En el

proceso de producción de la planta, la superficie foliar disponible está relacionada con la asimilación de carbono durante su ciclo de vida (Arcilla y Chávez, 1995).

Número de nudos y longitud de bandolas

Los nudos productivos varían cada año hacia el extremo de las bandolas (crecimiento plagiotrópico) y en sentido vertical del tallo (crecimiento ortotrópico), acumulando números de nudos improductivos y defoliados de la cosecha anterior (Ramírez, 1996).

Los nudos producen frutos solo una vez (Palma 2001), en cada ciclo de producción los nudos productivos se localizan hacia los extremos de las ramas, cada año de producción queda mayor área de tejido improductivo en la planta (Ramírez 1996).

Tabla 11. Prueba de medias en la variable número de nudos.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	2,81	0,16	a
T1	3,29	0,16	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable número de nudos, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que el número de nudos del testigo sin aplicación de riego alcanzo un promedio de $2,81 \pm 0,16$, y con el tratamiento aplicación de riego alcanzo un promedio de $3,29 \pm 0,16$, lo que equivale a un 30,10% de diferencia en el número de nudos con la aplicación de riego respecto al testigo.

Tabla 12. Prueba de medias en la variable longitud de bandolas.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	24,85	2,61	a
T1	40,32	2,03	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable longitud de bandolas, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que las bandolas del testigo sin aplicación de riego

alcanzo un incremento promedio de $24,85 \pm 2,61$ cm de longitud, y con el tratamiento aplicación de riego alcanzo un incremento promedio de $40,32 \pm 2,03$ cm de longitud, lo que equivale a un 38,37% de diferencia en el crecimiento de las bandolas con la aplicación de riego respecto al testigo.

El número promedio de nudos en el testigo es inferior estadísticamente con respecto al tratamiento con irrigación, el promedio más alto obtenido en el estudio corresponde a la aplicación de riego óptimo requerido por el cultivo.

Este indicador es de suma importancia, pues al formarse nuevos nudos, significan que para el siguiente ciclo de producción se garantizará la floración y fructificación en las bandolas que durante este ciclo se obtendrán; en este caso se ha demostrado que el aporte del riego influye, pues supera hasta en un 30,1% en comparación al testigo.

La formación de nuevos nudos permitirá un incremento en la producción (Mestre y Ospina, 1994). Según Balladares y Calero (2005), los nudos son importantes porque de este se originan las ramas primarias que son el tejido nuevo y productivo en los primeros años de vida de un cafeto, al aumentar los nudos aumentan el número de ramas en la planta y por ende la productividad del cafeto a largo plazo ya que estos aumentan conforme la longevidad de la planta.

El crecimiento de las bandolas está directamente relacionado con el indicador anterior, pues lógicamente al darse mayor crecimiento plagiotrópico de las bandolas, mayor sería el número de nudos potencialmente productivos formados, para ambos casos existe la misma tendencia mostrándose valores que demuestran esta relación, en la variable longitud de bandolas se observa un mayor desarrollo con la aplicación de riego con un promedio de 40,32 cm, el testigo fue el que obtuvo el promedio más bajo igual a 24,85 cm, esto nos dice que el tratamiento tuvo un 38,65% de incremento respecto al testigo. Estos resultados son similares a los que obtuvieron Cisneros y Martínez (2001), en este caso el crecimiento fue proporcional a la cantidad de agua aplicada y el valor más bajo perteneció al testigo ubicándose en la categoría más baja.

Esta comparación permite afirmar que el riego localizado influye en el aumento del crecimiento vegetativo, en dependencia de la cantidad de agua que se aplique. Según Borges (2000), el riego en el cafeto proporciona un mejor crecimiento de los cultivos, lo que garantiza vigor de la planta.

Por otra parte, Rubens (1988), indica que cuando el café se somete a un mayor contenido de humedad de suelo mayor será el desarrollo vegetativo.

Derrame productivo o purga del cafeto

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que en la medición realizada, la variable derrame productivo tuvo un efecto favorable con la aplicación de riego óptimo.

Tabla 13. Prueba de medias en la variable derrame productivo.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	3,04	0,12	a
T1	1,98	0,18	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable derrame productivo, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que el promedio de frutos del testigo sin aplicación de riego alcanzo un promedio de $3,04 \pm 0,12$, y con el tratamiento aplicación de riego alcanzo un promedio de $1,98 \pm 0,18$.

A los cinco meses de aplicación de riego se evaluó el derrame o purga de los frutos, pero en este caso el tratamiento con riego lo hace con menor intensidad. El tratamiento con la lámina de riego óptimo pierde un 13%, y el testigo pierde más del 30% de sus frutos.

Arcila (2008), considera que el impacto de la radiación solar y el déficit hídrico pueden ocasionar secamiento de los botones florales, abscisión o caída de flores, pérdida o reducción de la capacidad de floración. La caída de frutos ha sido asociada a la falta de agua al comienzo de la etapa de crecimiento acelerado del fruto (CATIE, 2002).

Una planta de café florece en diferentes épocas, en una misma rama se pueden encontrar frutos con distintos estados de desarrollo, principalmente en climas tropicales que no están bien marcada las estaciones del año (Puerta, 2000). En una planta se pueden encontrar, frutos maduros, verdes, medianos, pequeños y flores, ocurriendo todas estas etapas en el mismo nudo productivo (Crisosto *et al.*, 1992).

Campbell (1987), afirma que la deficiencia de agua en la maduración y la formación de los botones no puede afectar a la productividad en el año, pero dificulta seriamente la producción del año siguiente, conclusión que nos hace pensar que el comportamiento de la producción del testigo en nuestro estudio podría tener esta tendencia.

CONCLUSIONES

De acuerdo al estudio realizado se derivan las siguientes conclusiones:

- La parcela en estudio presenta característica de suelo con clase textural franco, con una capacidad de campo de 31,5% y una infiltración básica de 6,92 mm/h.
- siendo un suelo con una velocidad de infiltración moderadamente lenta lo que implica una alta capacidad de retención de agua.
- Se realizó el diseño agronómico e hidráulico para la implementación del sistema de riego en el cultivo de café, a partir del cual se determinaron los parámetros hidráulicos que permitió el cálculo de los componentes del sistema de riego y poder satisfacer las necesidades hídricas del cultivo.
- La implementación del sistema de riego de baja presión como el borbolleamiento, demostró ser adecuado para irrigar cultivos con grandes demandas de agua, de fácil manejo, operación y mantenimiento, además este puede ser implementado y operado sin grandes inversiones económicas, siendo una alternativa tecnológica para pequeños y medianos productores.
- La evaluación realizada al sistema implementado en la parcela en estudio arrojó un coeficiente de uniformidad de Christiansen igual a 83% y coeficiente de uniformidad de distribución igual a 76%, estos resultados nos indican que el sistema de riego se encuentra entre bueno y aceptable.
- El uso de riego complementario en el cultivo de café tiene un efecto positivo en el crecimiento

vegetativo del cultivo, superando hasta en más del 30% respecto al testigo, además se redujo en un 17% en las pérdidas de frutos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel, N. 2016. Diseño de sistema de riego por burbujeo de baja carga. En: goyal, m. R; chavan, vk; tripathi, vk (eds.). Innovaciones en tecnología de micro riego. Nueva york: apple academic press., 2016. Cap. 5, pág. 101-172.
- Arcila, P. J. 2008. Crecimiento y desarrollo de la planta de Café, Capitulo. Bogotá, Col. 40p.
- Arcilla, P. J. y Chávez, B. 1995. Derrame foliar del cafeto en tres densidades de siembra. *Cenicafe* 46(1): 5-20.
- Balladares, D. y Calero, J. 2005. Efecto de la Sombra y Fertilización sobre el Crecimiento, Estructura Productiva, Rendimiento y Calidad del Café. Managua, Nicaragua UNA. 69 p.
- Berlín, A. 1982. Riego y drenaje. Manual para educación agropecuaria. Editorial trillas. México. p. 13-41.
- Borges, J. T. S. 2000. Propiedades de cozimento e caracterização físico-química de macarrão pré-cozido à base de farinha integral de quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd) e de farinha de arroz (*Oryza sativa*), polido por extrusão termoplástica. *Boletim do Centro de Pesquisas e Processamento de Alimentos*, v. 21, n. 2, p. 303-322.
- Camargo, A. P., Camargo, M. B. y Pereira, A. R. 2008. Agrometeorología del Café en Brazil. Brazil: Soform Formularios.
- Campbell, A. 1987. Balance hídrico, floración y necesidad de agua para el Café. En: Simposio sobre la gestión del agua en la agricultura, 1987, de Campinas. Fundación Cargill.
- CATIE. 2002. Estudio de factibilidad para la implementación de seguros basados en Índices climáticos en el cultivo de Café en Honduras y Nicaragua Pp .67.
- CENTA. (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal). 2002. Guía técnica del cultivo de plátano. Disponible en: <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/frutales/platano.pdf>.
- Chipana, G. 2015. Comportamiento agronómico de ocho variedades de soya (*Glycine max*) en relación las tres densidades de siembra, en la Estación Experimental de Sapecho Alto Beni – La Paz. Facultad de Agronomía – UMSA. La Paz – Bolivia. 85 p.
- Cisneros, E. y Martínez, R. 2001. Respuesta del cafeto al riego por goteo en plantaciones de fomento. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 10. Universidad Agraria de La Habana, Cuba.
- CORECAF. (Corporación Ecuatoriana de Cafetaleros y Cafetaleros). 2000. Determinación de los parámetros técnicos para plantaciones tradicionales y plantaciones tecnificadas de Café arábico y robusta. Disponible en: <http://www.corecaf.org/>.
- Crisosto, C. H., Grantz, D. A. y Meinzer, F. C. 1992. Effects of water deficit on flower opening in coffee (*Coffea arabica* L.). *Tree Physiology* 10(2):127.
- FAO. 1998. Evapotranspiración del cultivo, estudio de riego y drenaje. Guía 56 para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma-Italia.
- FAO (2008). Obtenido de <http://www.fao.org/3/>.
- Fuentes, J. 2004. Técnicas de Riego. 4 ed. España. Mundi-prensa Madrid. p. 45.
- Merriam, J. L. y Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: A guide for management, USA.
- Mestre, M. A. y Ospina H. F. 1994. Manejo de los cafetales para estabilizar la producción en las fincas cafeteras. *Avances Técnicos Cenicafé*. No. 201:1-8.
- Miranda, R. 2004. Introducción a la geología agrícola. La Paz – Bolivia. 29 pp.
- Puerta, G. I. 2000. Influencia de los granos de Café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida. *Cenicafé* 51(2):136-150.
- Ramírez, J. E. 1996. Estudios de Sistemas de Podas de Café Por Hileras y Por Lotes. *Agronomía Costarricense* 20(2):167-172.
- Rawlins, S.L. 1977. Riego uniforme con sistema de burbujeo de baja carga. *Gestión de la agricultura y el agua*. ed. El sevier. Ámsterdam. Vol. 1, p. 166-178.
- Reynolds, C.A. 1993. Diseño y evaluación de sistema de riego por burbujeo. M.SC. inédito Tesis, Universidad de Arizona. Departamento de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería.
- Rubens, S. 1988. Crecimiento e producao de cafeeiro e cultivos intercaleres sub diferentes regímenes hídricos. *Anais do VIII Congresso*

- Nacional de Irrigación e Drenaje, vol. 1, 41-46, 1988.
- SENAMHI. (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2019. Datos climáticos de Alto Beni. La Paz, Bolivia. 18 p.
- USDA. 1999. Un cultivo de cobertura para los sistemas tropicales y del sur. Instituto de calidad del suelo, nota técnica agronómica N° 10.
- USDA. 2006. Requerimiento de Agua para Riego. Parte 623. Manual Nacional de Ingeniería S/F.
- Valencia, A. 1973. Relación entre el índice de área foliar y la productividad del cafeto. Cenicafe 24(4): 79-89.
- Yitayew, M. 1995. Sistemas de irrigación con burbujeador de baja carga. Parte II: Problemas de las esclusas de aire. Agricultura y gestión de agua. Vol. 29: 25-35 p.