



**Evaluación de la eficiencia del sistema de riego por manguera perforada en  
dos tipos de surcos**

**JOHN JAIRO LASSO LASSO**

Universidad Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Agronomía

CEAD Palmira

2019

**Evaluación de la eficiencia del sistema de riego por manguera perforada en  
dos tipos de surcos**

**JOHN JAIRO LASSO LASSO**

Trabajo de grado en la  
modalidad de “Proyecto  
Aplicado” Para optar al título de  
agrónomo

Director  
**MILTON CESAR ARARAT OROZCO**  
Ingeniero Agrónomo, *Ph. D.*

Co-Director  
**CHRISTIAN JOSÉ MENDOZA CASTIBLANCO**  
Ingeniero Agrícola, *D.Sc.*

Universidad Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Agronomía

CEAD Palmira

2019

## **Dedicatoria**

A Dios por darme la oportunidad de vivir y compartir mi vida con los padres que siempre quise, por darme una esposa idónea, que me ama y a quien amo, por mi hijo y mi pequeña hija, por quienes he soportado y superado muchos contratiempos y hoy tengo la oportunidad de mostrarles la obtención de un logro muy importante en mi vida; por mis hermanos a los que quiero mucho y los llevo en mi corazón. A un amigo especial que me ha dado la mano cuando necesite ayuda. A mi jefe que ha puesto su confianza en mí, facilitando mi crecimiento laboral y profesional. A las personas que tuve la oportunidad de conocer y han impactado mi vida.

## **Agradecimientos**

- A CENICAÑA, por darme la oportunidad de aprender, por creer en mis habilidades, por permitir mi superación personal y escalar laboralmente, por ser una gran institución y ser la mejor en todo.
- Al Dr. Christian Mendoza, del área de aguas de CENICAÑA, por su orientación, enseñanzas y tiempo invertido en el desarrollo de este trabajo de investigación.
- Al Dr. Milton Cesar Ararat, profesor de la UNAD, por su comprensión, confianza y sobre todo por motivarme a llevar a buen término esta investigación.
- A mi amigo Andrés por sus consejos y por su colaboración con algunos aspectos técnicos de la investigación.

## **Contenido**

<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
4.1 Objetivo general .....	13
4.2 Objetivos específicos.....	13
<b>5. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>6. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>19</b>
6.1 Descripción del sitio de evaluación y del muestreo.....	19
6.2 Metodología para evaluar la uniformidad .....	23
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>25</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>32</b>
<b>9. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>33</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>34</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Porcentaje de área por cada sistema de riego utilizado por el sector azucarero colombiano. (Cenicaña, 2019). .....	<b>11</b>
<b>Figura 2.</b> Descripción del sistema de evaluación de manguera perforada.....	<b>20</b>
<b>Figura 3.</b> Adecuación del área para realización de los ensayos .....	<b>21</b>
<b>Figura 4.</b> Área establecida para ensayos con MP y micro pluviómetros.....	<b>22</b>
<b>Figura 5.</b> Dispositivo para controlar la presión de entrada y medir el caudal.....	<b>22</b>
<b>Figura 6.</b> Formato para colecta y simulación del CUC.....	<b>26</b>
<b>Figura 7.</b> Distribución espacial de las láminas colectadas para la presión de 5 psi. .....	<b>30</b>
<b>Figura 8.</b> Coeficiente de variación del caudal por efectos hidráulicos para las presiones evaluadas. ....	<b>30</b>
<b>Figura 9.</b> Imágenes ampliadas de los errores de fabricación en los orificios presentes en la MP .....	<b>31</b>

## 1. RESUMEN

Todo sistema de manejo o conservación de agua para riego debe tener como propósito conocer el desempeño hidráulico del sistema utilizado, determinando la eficiencia en la cual opera el sistema de riego. La evaluación del desempeño, o evaluación de un sistema de riego, es un proceso que se realiza para examinar los componentes de éste y para cuantificar que tan eficientemente se está aplicando el agua en un área específica. El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de un sistema de micro aspersión por manguera perforada de fabricación nacional, utilizado para la operación del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca. Se evaluarán los dos modelos de manguera fabricados por el fabricante local, con diámetros de 1 y 1.5 pulgadas. La evaluación se hará mediante el uso de pluviómetros de 100 mL, probetas y cronometro. En ese sentido, se colectaron las láminas de agua distribuidas en un área específica y los caudales aplicados por cada emisor (agujero) en un tiempo estándar (1 hora) para la evaluación de la distribución del agua en campo y de 60 segundos para la determinación del caudal aplicado por cada emisor de la línea, en 3 repeticiones y con 6 presiones diferentes. Con los datos obtenidos se calcularon los valores del Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC) y Coeficiente de Uniformidad de Distribución (CUD) para los modelos evaluados. El sistema de riego por manguera perforada presentó bajo desempeño debiendo ser evaluado rigurosamente su uso para riego del cultivo de la caña de azúcar. Este proyecto hace parte de las actividades del Semillero de Investigación en Producción Agropecuaria Sostenible (SIPAS) perteneciente al Grupo de Investigación: Producción Sostenible de la UNAD.

**Palabras claves:** micro aspersión, eficiencia, Coeficiente de Uniformidad de Christiansen, Coeficiente de Uniformidad de Distribución.

## ABSTRACT

Every water management or conservation system for irrigation must have the purpose of knowing the hydraulic performance of the system used, determining the efficiency in which the irrigation system operates. Performance evaluation, or evaluation of an irrigation system, is a process that is performed to examine its components and to quantify how efficiently water is being applied in a specific area. The objective of this work is to evaluate the performance of a micro-spray system by perforated hose manufactured nationally, used for the operation of irrigation in the cultivation of sugarcane in the Cauca river valley. The two hose models manufactured by the local manufacturer, with diameters of 1 and 1.5 inches, will be evaluated. The evaluation will be done through the use of 100 mL rain gauges, test tubes and chronometer. In that sense, the water sheets distributed in a specific area and the flows applied by each emitter (hole) in a standard time (1 hour) were collected for the evaluation of the distribution of water in the field and of 60 seconds for the determination of the flow rate applied by each emitter of the line, in 3 repetitions and with 6 different pressures. With the data obtained, the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) and Distribution Uniformity Coefficient (CUD) values were calculated for the models evaluated. The perforated hose irrigation system presented poor performance and its use for irrigation of sugarcane cultivation must be rigorously evaluated. This project is part of the activities of the Sustainable Agricultural Production Research Seedbed (SIPAS) belonging to the Research Group: Sustainable Production of UNAD.

**Key Words:** micro sprinkling, efficiency, Christiansen Uniformity Coefficient, Distribution Uniformity Coefficient.

## 2. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el cultivo de la caña de azúcar abarca 47 municipios pertenecientes a los departamentos de Caldas, Risaralda, Valle del Cauca y Cauca, comprendiendo todo el valle geográfico del río Cauca, con un área sembrada en caña de azúcar de 225.500 hectáreas aproximadamente. Donde se producen unos 2,12 millones de toneladas de azúcar a partir de 21,56 millones de toneladas de caña. Generando para la región 265 mil empleos en toda su cadena de valor. (Asocaña, 2019).

Debido a que la región posee un clima privilegiado, la siembra y cosecha de caña puede realizarse durante todos los meses del año, con esta condición agroclimática más el avance tecnológico desarrollado para este cultivo a través de su Centro de Investigación de la Caña (Cenicaña), este cultivo deja a la región en a la cabeza de la productividad a nivel mundial, con más de 14 toneladas de azúcar por hectárea al año.

De todas las áreas de manejo de la caña de azúcar como cultivo principal de la región, este trabajo se centra en la implementación de sistemas de riego, debido a la importancia del uso del agua como práctica rutinaria en el desarrollo fenológico de la planta. Pues según la FAO los requerimientos de agua para la caña de azúcar a nivel mundial oscilan entre 15,000 a 20,000 m<sup>3</sup> por hectárea por año (FAO, 2012).

En el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca son varios los sistemas de riego utilizados para suplir las necesidades hídricas del cultivo, entre los cuales está el riego por gravedad por ventanas o compuertas, tradicionalmente utilizado y con la mayor cantidad de área bajo este sistema, el riego por aspersión por pivote central, lineal y el cañón viajero, y los sistemas de riego localizado, como el goteo y más recientemente el riego por manguera

perforada, se están implementando con gran acogida debido a los bajos requerimientos de agua para su uso. (Figura 1).

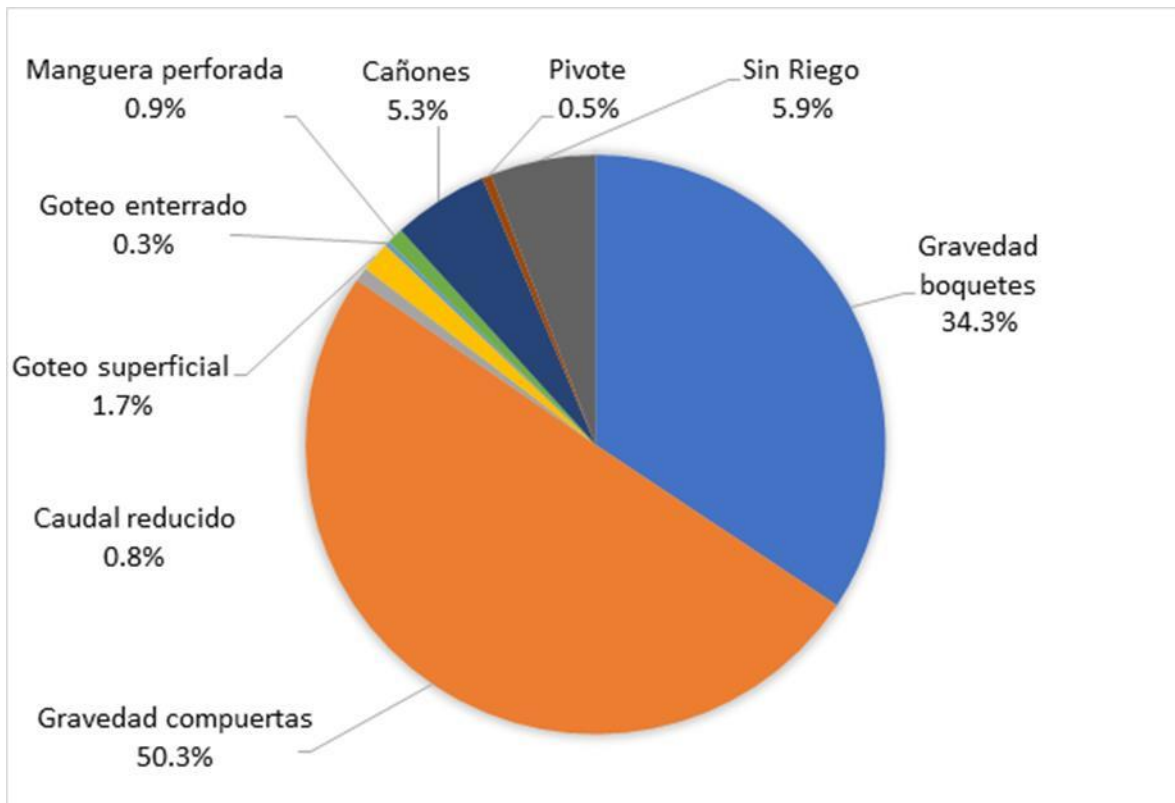


Figura 1. Porcentaje de área por cada sistema de riego utilizado por el sector azucarero colombiano. (Cenicaña, 2019).

El riego localizado no es más que la aplicación del agua de forma puntual y lo más cercana a la zona de raíces, El objetivo de un sistema de riego es proporcionar los requerimientos hídricos de la planta con el fin de maximizar la producción, buscando realizar esta operación de la forma más eficiente posible, evitando al máximo crear grandes impactos en el medio ambiente.

El funcionamiento hidráulico de las mangueras de plástico perforadas (MP) se asemeja a goteros tipo orificio, sin embargo con la particularidad que su sección de salida aumenta con la presión en su interior, en función de la elasticidad de su

pared. Las MP pueden gotear en presiones muy bajas, sin embargo, si la presión es inferior a 11 PSI, las gotas se convierten en pequeños chorros continuos (López et al., 1992).

### 3. JUSTIFICACIÓN

Conocer el desempeño hidráulico del sistema de riego utilizado en un sistema de cultivo, determina la eficiencia del sistema productivo en el manejo del agua.

En el mercado nacional hay fabricantes capaces de producir MP con las características necesarias para que puedan ser utilizadas en los sistemas de cultivo de caña de azúcar del valle del río Cauca. Básicamente, este producto es manufacturado utilizando material plástico de baja densidad, utilizan materia prima virgen y los micro-orificios son hechos con agujas metálicas. Los orificios distribuyen el agua en chorros finos en forma de spray. Trabaja con una presión de servicio de máximo 8 PSI, de acuerdo con la información suministrada por el fabricante.

Las ventajas de este tipo de sistemas se asocian con la calidad de los emisores, dispositivos dimensionados para disipar presión, que en los sistemas de micro riego deben presentar descarga uniforme y constante, además de suficiente abertura para no provocar taponamientos. Dichos dispositivos deberían tener un muy bajo costo, ser robustos y dispersar el agua con alta uniformidad en el terreno (Frizzone, 2012). La uniformidad de aspersion determina en gran medida la eficiencia, razón por la cual se hace necesario evaluar este tipo de riego por micro aspersion para conocer de forma experimental su uniformidad (Keller y Bliesner, 1990; Pereira, 1999; Pereira, *et al.*, 2002a).

La uniformidad de distribución funciona como el indicador que caracteriza el sistema mientras la eficiencia de aplicación caracteriza la gestión en la dependencia de las limitaciones impuestas por el sistema (Pereira, 1999; Pereira *et al.*, 2002a). Esta información está relacionada con el planteamiento de Ararat & Sanclemente (2015) en las cuales se mencionan el uso de sistemas de monitoreo y seguimiento para la implementación de agricultura específica por sitio.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

- Evaluar la eficiencia del sistema de riego por manguera perforada en dos tipos de surcos en el cultivo de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L.

### 4.2 Objetivos específicos

- Establecer las diferencias en eficiencia de dos tipos de mangueras perforadas, considerando su desempeño bajo condiciones controladas del cultivo de *Saccharum officinarum* L.
- Comparar cuantitativamente dos tipos de manguera perforada a diferentes presiones de bombeo con respecto a la uniformidad de humedecimiento de la superficie de cultivo.

## 5. MARCO TEÓRICO

El riego ha impulsado el incremento de la producción mundial de alimentos en los últimos tiempos. Sin embargo, sólo el 20% de las tierras cultivables del planeta están adecuadas para el uso de algún sistema de irrigación. No obstante, en estas se produce el 40% de los alimentos disponibles para la humanidad (FAO, 2003). Pese a que es clara la diferencia entre la productividad de los cultivos de secano y los irrigados, la agricultura bajo riego no puede seguir extendiéndose como antes, debido al costo. De hecho, la irrigación se ha considerado «una de las actividades más subsidiadas del mundo», y algunos estudios ponen en duda el beneficio económico de la inversión en grandes sistemas de riego. El riego convencional también tiene costos ambientales elevados. Muchas veces se ha acusado a los usuarios de sistemas de irrigación de gran intensidad de generar anegamiento y de salinizar el suelo, condiciones que hoy afectan al 30% de las tierras irrigadas del mundo. La salinización está reduciendo la superficie cultivada a una velocidad del 2% anual. Por estas razones los expertos consideran que para incrementar la contribución del riego a la producción de alimentos se necesita incrementar la eficacia y la eficiencia de la irrigación. (FAO, 2003).

La eficiencia de riego es la relación establecida entre la cantidad de agua aprovechada por las plantas y la cantidad de agua surtida desde una bocatoma. Dicha cantidad de agua captada de alguna fuente natural en un sistema de riego es transportada a través de un canal primario y luego desviada por un canal secundario de distribución y para finalmente ser llevada hasta la parcela o sitio del cultivo. Para determinar la eficiencia de riego es necesario conocer cuánto

volumen de agua captada en la bocatoma es utilizada realmente por el riego efectuado en el campo. Es decir, la eficiencia de riego está dada por la eficiencia de conducción en el canal primario o principal, la eficiencia de distribución en los canales secundarios o laterales y la eficiencia de aplicación en parcelas o sitio del cultivo. El producto de estas tres eficiencias determina la eficiencia general de riego de un sistema, como se establece en la ecuación 1. (Núñez et al., 2015).

$$E_{fr} = E_{fc} \times E_{fd} \times E_{fa} \text{ (Ec. 1)}$$

Dónde:

Eficiencia de conducción ( $E_{fc}$ )

Eficiencia de distribución ( $E_{fd}$ )

Eficiencia de aplicación ( $E_{fa}$ )

A continuación, se describen algunas características de los métodos de riego más importantes usados en los cultivos:

Los métodos de riego tradicional, basados en el uso de la gravedad, tales como el riego por melgas y el riego por surcos manejan eficiencias generales de entre el 60 y el 65%. No obstante, debe anotarse que tal eficiencia se alcanza en sistemas muy bien diseñados y manejados. De todos los sistemas basados en la distribución de agua por gravedad, el más eficiente es aquel en el que se combinan pulsos en sistemas de riego por surcos, alcanzando eficiencias de hasta 70%. Si se tiene como objetivo principal el de asegurar que un sistema de riego debe aportar las mejores condiciones de utilización del agua y un perfecto aprovechamiento de esta por la planta, lo que se logra aplicando el agua oportunamente y de forma homogénea en el suelo, teniendo en cuenta los requerimientos de la planta (Salcedo *et al*, 2005). De otro lado, el método más ineficiente de riego por gravedad es aquel en el que se hace irrigación subsuperficial usando curvas de nivel. En este método la distribución de agua para

riego se realiza por canales excavados o terraplenados siguiendo las líneas de menor pendiente (curvas de nivel), y la aplicación de agua a la parcela se realiza directamente por infiltración desde los laterales del canal (FAO, 2015).

En forma general, los métodos que utilizan presurización para entregar el agua de riego al cultivo, tales como el goteo, la micro aspersion y la aspersion tienen mayores eficiencias que los sistemas basados en la gravedad. En todos ellos la distribución de agua se realiza por medio de tuberías y válvulas de sectorización. Muchos de estos sistemas permiten la incorporación de fertilizantes en conjunto con el agua de riego (fertirriego). En el caso del goteo, la eficiencia puede ser superior al 90%. En este caso, el agua de riego y los fertilizantes se aplican gota a gota por medio de emisores denominados goteros, por lo general de bajo caudal (entre 0,5 a 4 l/h) y baja presión (entre 0,2 y 1 kg/cm<sup>2</sup>). Estos goteros están dispuestos a lo largo de tuberías de distribución colocadas en la superficie del suelo en cada hilera de cultivo o cada dos hileras (para hortalizas y frutales), suspendidas de un alambre ubicado a baja altura (frutales y algunos frutos finos) o incluso enterrados (frutales, hortalizas y cereales) (FAO, 2015).

Los sistemas de micro aspersion aplican agua a los cultivos por dispositivos emisores hidráulicos y mecánicos denominados micro aspersores, con caudales de entre 20 a 120 l/h y presiones de 1,5 a 2 kg/cm<sup>2</sup>. Bajo estas características un sistema de este tipo puede alcanzar eficiencias que varían entre 85 y 90%. Por su parte, los sistemas de aspersion tienen eficiencias de aplicación de agua que oscilan entre 75 y 80 % en sistemas bien diseñados y manejados (FAO, 2015). Sin embargo, los sistemas de riego presurizados se caracterizan por algún grado de desuniformidad en la aplicación de agua. Potencialmente, esta falta de uniformidad en la aplicación puede afectar el rendimiento de la cosecha y eficiencia de uso de agua, lo que ha sido demostrado por diferentes investigadores (Warrick y Gardner, 1983; Letey *et al.*, 1984; Montovani *et al.*, 1995; Li, 1998).

La mayoría de los sistemas de riego por aspersión requieren un valor mínimo de uniformidad de distribución de agua de 80% (Keller y Bliesner, 1990). La uniformidad de irrigación por micro aspersión normalmente es cuantificada por el coeficiente de uniformidad propuesto por Christiansen (Christiansen, 1942). Ecuación 2:

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N\bar{x}}\right) \times 100$$

Ec. 2

Dónde:

CUC = Coeficiente de uniformidad de Christiansen

$x_i$  = Cada uno de las observaciones desde  $i=1$  hasta  $N$

$\bar{x}$  = Promedio de las observaciones

$N$  = Número de observaciones

(Haman *et al*, 1997) indican que coeficientes de uniformidad bajos en sistemas de micro aspersión se deben a numerosos factores, tales como:

- La selección inadecuada de diámetros de tubería de entrega (tubería principal, secundaria y/o laterales).
- La selección inadecuada de emisores para la micro aspersión.
- El traslape inadecuado de emisores.
- Los efectos del viento en los emisores.
- Los cambios en los componentes del sistema con tiempo (disminución de eficiencia de la bomba, fallas en la regulación de presión, desgaste de boquillas, entre otros).

- Obstrucción de boquilla del emisor.
- Alteraciones en la presión de operación.

En los sistemas de micro aspersión, el agua es aplicada sobre una superficie limitada del terreno en forma pulverizada y se desplaza en el suelo en función de tres factores fundamentales: a) las propiedades y características del perfil físico del suelo; b) el volumen de agua aplicado y c) el caudal del emisor (Gispert y García, 1994). Las raíces del cultivo, en un sistema de micro-irrigación, ocupan una disposición tridimensional más o menos densa que, generalmente, coincide con la distribución volumétrica de la humedad generada por un emisor en el suelo (Goode *et al.*, 1978; Levin *et al.*, 1979; Willoughb y Cockroft, 1974), de allí se deriva la importancia que a nivel fisiológico y de nutrición hídrica puede ejercer el volumen húmedo del suelo.

El coeficiente de Uniformidad de Chistiansen (Christiansen, 1942) es un buen indicador para expresar la distribución del agua aplicada por emisores sobre una superficie, pero resulta insuficiente para hacer inferencias acerca de la distribución en el perfil del suelo y para cuantificar la influencia en el rendimiento de la cosecha.

Por otro lado, el conocimiento de la estructura del balance hídrico de lagos, cuencas superficiales y cuencas subterráneas, es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo, así como para mejorar el control y redistribución de los mismos; por ejemplo: trasvases de cuencas, control de máximas crecidas, etc. El balance hídrico ayuda en la predicción de las consecuencias debidas a cambios artificiales en el régimen de ríos, lagos y cuencas subterráneas. La información que proporciona el balance hídrico de las cuencas de ríos y lagos para cortos periodos de tiempo (estaciones, meses, semanas y días) se utiliza para explotación de embalses y para predicciones hidrológicas.

El conocimiento del balance hídrico es también muy importante para el estudio del ciclo hidrológico. Con los datos del balance hídrico es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema, en diferentes períodos de tiempo, y establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural.

Después del análisis inicial, utilizado para estimar los componentes del balance hídrico y su ajuste en la ecuación, es posible detectar deficiencias en la distribución de estaciones de observación y descubrir errores sistemáticos de medición.

Finalmente, el conocimiento del balance hídrico permite una evaluación indirecta de cualquier componente desconocido dentro de él, por diferencia entre los componentes conocidos; por ejemplo, la evaporación a largo plazo, en una cuenca de un río, puede calcularse por diferencia entre la precipitación y el caudal.

## **6. MATERIALES Y METODOS**

### **6.1 Descripción del sitio de evaluación y del muestreo**

Mapa de procesos para la “Evaluación De La Eficiencia Del Sistema De Riego Por Manguera Perforada En El Cultivo De La Caña De Azúcar” (Figura 2).

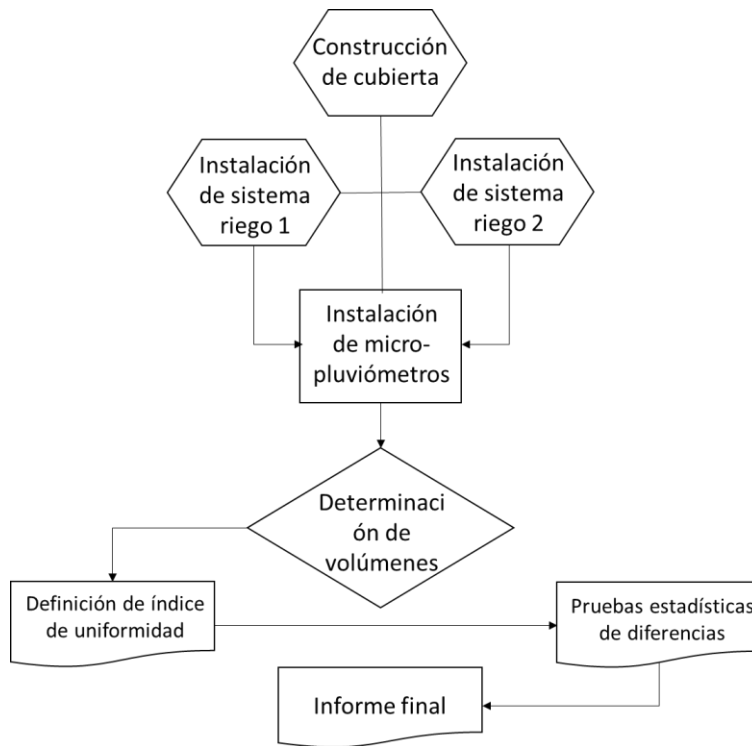


Figura 2. Descripción del sistema de evaluación de manguera perforada.

La evaluación del desempeño fue realizada en las instalaciones de la Estación Experimental del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), ubicada en San Antonio de los Caballeros, Florida, Valle del Cauca. Donde fue adecuada un área (Figura 3) para, de esa forma, tener condiciones contraladas en la evaluación y la menor interferencia sobre el desempeño del sistema de riego. Con el área cubierta se minimizaron las interferencias ocasionadas por el viento que afectan la distribución de las gotas sobre el área de influencia del sistema. Igualmente, la cubierta permitió reducir los efectos de la radiación sobre la superficie de agua colectadas en los micro pluviómetros, evitando la evaporación de la misma.

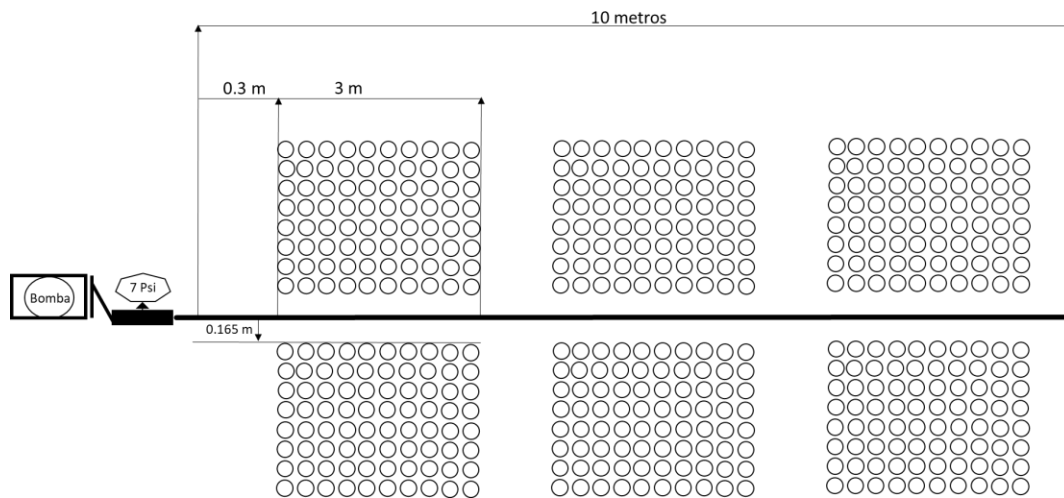


Figura 3. Adecuación del área para realización de los ensayos.

Cada micro pluviómetro tendrá un diámetro de 7 cm y capacidad volumétrica de 100 ml. Los micro pluviómetros serán construidos en plástico transparente, lo cual minimiza la evaporación de la lámina de agua colectada durante el periodo de evaluación. Adecuación de área y elementos para la realización del ensayo (Figura 4).



Figura 4. Área establecida para ensayos con MP y micro pluviómetros.

Para controlar la presión de entrada (PE) en la manguera perforada (MP) se usará un manómetro de glicerina con capacidad de medida de 0 a 35 PSI que se instalará en una tubería de PVC de  $\frac{3}{4}$ ". En dicha tubería se instalará también un sensor de flujo para la medición del caudal, modelo FS300A, con capacidad de medición aproximada de 1 a 60 l/min (Figura 5).



Figura 5. Dispositivo para controlar la presión de entrada y medir el caudal.

Las PE en cada una de las evaluaciones fueron desde 8 PSI, presión recomendada por el fabricante de mangueras como presión de servicio de la MP. La evaluación de presiones se hará variando en 1 PSI hasta una presión mínima de entrada de 3 PSI totalizando 6 PE (8, 7, 6, 5, 4 y 3 PSI). Cada evaluación se realizará por un tiempo de una (1) hora, en 3 repeticiones y para una longitud de la MP de 10m.

Los micro pluviómetros se dispondrán en el área de influencia de la MP. Los micro pluviómetros se separarán longitudinalmente y transversalmente entre cada uno de ellos 33 cm, siendo este valor un múltiplo de la separación entre laterales de 1,65 m, separación entre surcos comercial en el cultivo de la caña de azúcar y por donde se colocará la línea lateral de riego en campo. Ese valor de separación entre los pluviómetros permitirá realizar posteriormente a las evaluaciones controladas la simulación del coeficiente de uniformidad con las dos posibles disposiciones en campo que sería posible, siendo surco alterno (SA) y surco continuo (SC).

## **6.2 Metodología para evaluar la uniformidad**

Existen diferentes coeficientes para expresar la uniformidad de aplicación de un sistema de riego, tales como el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), el Coeficiente de Uniformidad de Distribución (CUD), recomendado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, el Coeficiente Estadístico de Uniformidad (CUE) y el Coeficiente de Uniformidad de Hart (CUH), entre otros, siendo los tres primeros, CUC, CUD, CUE, los más utilizados en la actualidad.

Para determinar la uniformidad del sistema de micro riego por MP se utilizará el CU propuesto por Christiansen (1942), definido en la norma ASABE S. 436.1, la cual es dada por la siguiente ecuación 3:

$$CUC = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - \bar{X}|}{N \cdot \bar{X}} \right) \cdot 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

CUC: Coeficiente de Uniformidad de Christiansen, %

N: Numero de recipientes

X<sub>i</sub>: Lámina colectada en el punto "i", mm

X: Lámina media de todas las observaciones, mm

Otra medida de eficiencia que permite evaluar el desempeño de un sistema de micro riego es la Uniformidad de Emisión (UE), determinando que tan uniforme es el sistema en cada uno de los emisores en relación a la media de los valores de los caudales aplicados, tal como propone la norma ASABE EP 458 (ASABE, 2008) para la evaluación de la uniformidad en los sistemas de micro riego.

La UE es similar a la UD para aspersión, siendo definida de forma que muestra la variación de la aplicación de agua a través de la razón entre el caudal mínimo y medio de los emisores. Siendo calculada por la ecuación 4 y 5:

$$UE = \frac{q_{\min}}{q} \quad \text{Ec.4}$$

$$UE = \frac{\bar{q}_{25}}{q} \quad \text{Ec.5}$$

Dónde:

q<sub>mín</sub>: es el caudal mínimo del conjunto de emisores evaluados.

q: promedio de los caudales de los emisores evaluados.

q25: promedio del 25% de los menores valores de los caudales de los emisores evaluados.

Para poder determinar los valores de UE y posteriormente el Coeficiente de Variación del caudal por efectos hidráulicos ( $CV_{q(H)}$ ), se colectarán los caudales de los orificios presentes en la longitud de la MP, por un tiempo de 1 min y en 3 repeticiones, de esa forma se utilizará la siguiente ecuación 6, para el cálculo.

$$CV_{q(H)} = 0,3783 q_{var(H)}^{0,9869} \quad \text{Ec.6}$$

Dónde:

qvar(H): es la variación de los caudales de los diferentes emisores.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente fueron determinadas las características generales del sistema de riego, Tabla 1, lo que permitió identificar el área de influencia de la MP en aplicación y distribución del agua.

**Tabla 1.** Características del sistema y operación del sistema de riego por MP, según el fabricante.

CARACTERÍSTICA / TIPO	ECORIEGO (1")	ECORIEGO (1 ½")
PS (psi)	3 - 8	3 - 8
Diámetro (pulg.)	1	1 ½
Longitud disponible (m)	7500	7500
Radio de alcance (m)	2,6	3,35
Altura de los micro chorros (m)	1,92	2,35
Distancia patrón de los emisores (cm)	20	7

El cálculo del CUC fue realizado con un formato en una hoja de Excel (Figura 6), elaborada para poder realizar el proceso con los datos obtenidos en campo y los datos simulando las disposiciones de SA y SC que se tendrían como posibles arreglos en el campo.

### Formato para colecta de los datos del Ensayo de Desempeño de la Manguera Perforada

Fecha (D/M/A): 26/10/2017      Responsable: John Jairo Lasso  
 Presión de entrada en la manguera (psi): 5  
 Caudal total en el Ensayo (L/h): \_\_\_\_\_  
 Tiempo del Ensayo (h): 1  
 Velocidad del Viento (m/s): \_\_\_\_\_

Manguera															
Laminas registradas en los pluviómetros (ml)															Inicia
0	0	0	0	55	37	0	0	0	29	55	16	0	15	17	9
0	13	35	56	28	89	28	0	0	37	79	37	78	90	40	30
0	17	72	100	30	26	0	0	0	8	104	10	24	18	0	0
2	13	19	23	35	13	2	0	0	17	33	2	58	33	3	0
9	103	209	172	228	29	0	0	2	77	99	13	83	72	30	2
0	4	17	44	46	12	0	0	1	70	27	14	110	27	16	0
5	23	37	43	75	1	0	0	35	69	11	10	93	73	1	0
2	33	53	99	31	7	0	0	18	71	35	180	78	85	24	0
0	11	47	81	114	14	0	0	50	6	11	34	11	17	4	0
1	26	60	24	25	23	24	8	159	3	0	13	48	5	0	0
10	58	67	58	85	4	0	6	56	148	55	6	44	72	20	1
9	35	46	123	135	3	0	2	17	93	15	0	25	86	50	3
6	33	66	75	42	8	7	14	37	52	175	8	93	110	9	0
27	33	15	12	5	0	0	3	4	27	50	5	106	147	26	2
75	110	45	132	101	2	0	39	4	115	175	58	8	10	86	43
38	96	13	6	10	0	2	42	5	17	32	103	202	25	30	8
0	2	17	54	35	10	0	2	0	0	0	6	37	175	76	3
30	74	57	75	205	51	0	0	5	75	110	2	9	3	0	0
25	125	112	108	14	11	2	45	24	14	2	45	78	24	0	0
0	0	2	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6. Formato para colecta y simulación del CUC.

En la Tabla 2 son presentados los diferentes valores del CUC resultantes de los datos obtenidos en las diferentes evaluaciones realizadas.

**Tabla 2.** CUC para datos obtenidos en las evaluaciones y los simulados para SA y SC.

Presión (psi)	Repetición	CUC (%)	CUC (%) SA	CUC (%) SC
8	1	26,62	44,43	44,83
	2	24	45,13	48,54
	3	19,18	35,44	42,79
7	1	1,82	29,1	33,83
	2	14,34	33,95	42,8
	3	30,25	49,98	51,74
6	1	3,44	29,25	33,44
	2	16,38	38,91	40,4
	3	13,96	37,36	42,02
5	1	3,28	24,73	32,19
	2	24,16	42,45	49,52
	3	-4,57	24,07	27,47
4	1	-44,12	-16,92	-4,74
	2	-21,95	2,23	12,41
	3	-13,74	12,57	17,91

Los valores del CUC para los datos colectados en la evaluación realizada son muy variables entre las presiones y entre las repeticiones realizadas. La presión que resulta en un CUC mayor es la de 7 psi en su tercera repetición, con un valor de 30,25%, pero al mismo tiempo en la primera repetición realizada presenta uno de los valores más bajos de uniformidad, resultado en CUC de tan solo 1,82%.

Si se verifican los datos para la disposición en campo de SA, la presión que presenta el CUC más elevado es la de 7 psi, nuevamente en la tercera repetición y al mismo tiempo en la disposición de SC también presenta el valor más alto, siendo de 51,74%.

La presión en la cual los CUC son más homogéneos durante todas las repeticiones realizadas es la presión de 8 psi, con valores de 26,62%, 24,00% y 19,18%. Contrario a esto, la presión que más variación del CUC presentó es la presión de 7 psi con los valores presentados anteriormente.

De acuerdo con estos hallazgos encontrados, se puede deducir que la eficiencia de distribución y la emisión de agua por el sistema de riego no cumplen con el valor mínimo de uniformidad considerado por Keller y Bliesner (1990), cuando el CUC está por debajo del 80%.

Sin embargo, la importancia del sistema radica en que la aplicación de agua se hace cerca de la raíz del cultivo. Por lo tanto y aunque el suelo del cultivo tenga cordones de arena, las producciones tienen una mejora sustancial; ya que el cultivo tiene una mejor oportunidad para que el agua llegue a lo largo de todo el surco.

Para (Pereira, 1999; Pereira et al., 2002a) lo que más caracteriza a un sistema de riego por micro aspersión es la uniformidad de distribución. También le da una marcada relevancia a la eficiencia de aplicación pues esta depende de las posibles limitaciones que pueda tener el sistema; Para este caso estudio, se encontró que la fabricación de los orificios perturba un poco la distribución de uniformidad por efecto de su salida, puesto que los orificios son perforados por una aguja metálica que por uso y desgaste al final de un proceso; Es decir que no puntúan el material de la manguera de forma uniforme, afectando la eficiencia de aplicación del agua.

Aunque para (Frizzone, 2012) en su descripción de este tipo de sistemas destaca la calidad de los emisores, que en el micro riego deben presentar una descarga de agua uniforme y constante, evitando taponamientos y dispersando el agua con gran uniformidad por todo el terreno.

Según (Warrick y Gardner, 1983; Letey et al., 1984; Montovani et al., 1995; Li, 1998) virtualmente la cosecha y la eficiencia del uso del recurso hídrico se ven perjudicadas en el rendimiento cuando hay algún grado de des uniformidad.

Las diferencias de eficiencia no se notaron en los dos modelos de manguera utilizados, solo se demostró que la manguera con diámetro de una pulgada y media tuvo una mayor descarga de agua debido a la cantidad de emisores tenían una menor distancia el uno del otro, patrón de distanciamiento dado por el fabricante.

Para visualizar espacialmente los valores de las evaluaciones se hizo a través de un programa de sistemas de información geográfica y geoestadística. En la (Figura 7), Se presenta la distribución de las láminas colectadas en la evaluación la cual permite visualizar la gran variabilidad que presenta la distribución de las láminas colectadas en la evaluación, resultado de la variabilidad en cada uno de los orificios de la MP.

En algunos pluviómetros se concentran altas láminas de agua y en otros muy cercanos la lámina llega a ser muy baja, lo que representa que una porción del suelo estará siendo altamente humedecida y una adyacente, por el contrario, esta con un alto déficit de agua.

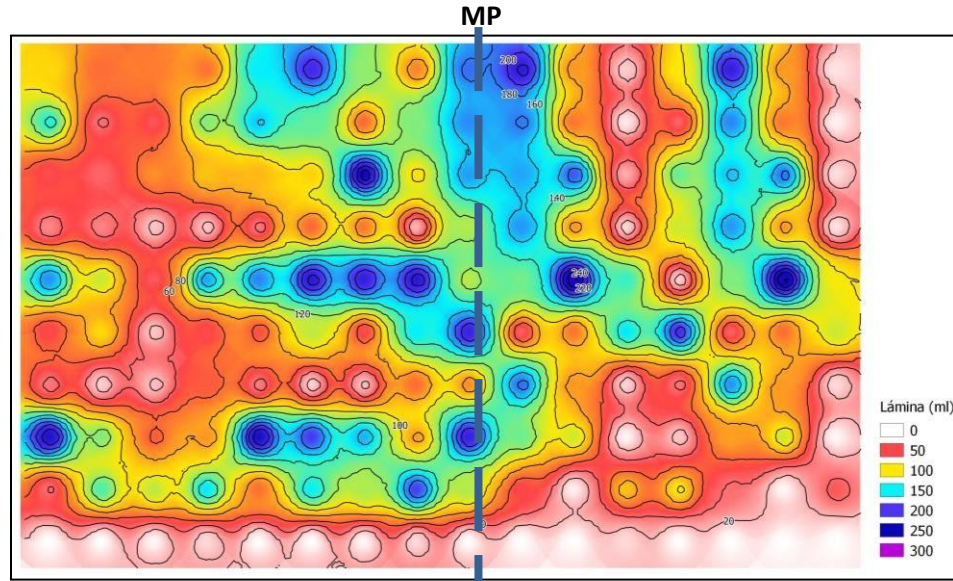


Figura 7. Distribución espacial de las láminas colectadas para la presión de 5 psi.

El valor de los CVq(H) se muestran en la Figura 8. La variación del caudal por efectos hidráulicos está muy por encima de los valores recomendados por la norma para los sistemas de micro riego y localizados. Valores por encima del 15%, en un sistema como el que se está evaluando, es considerado no recomendado.

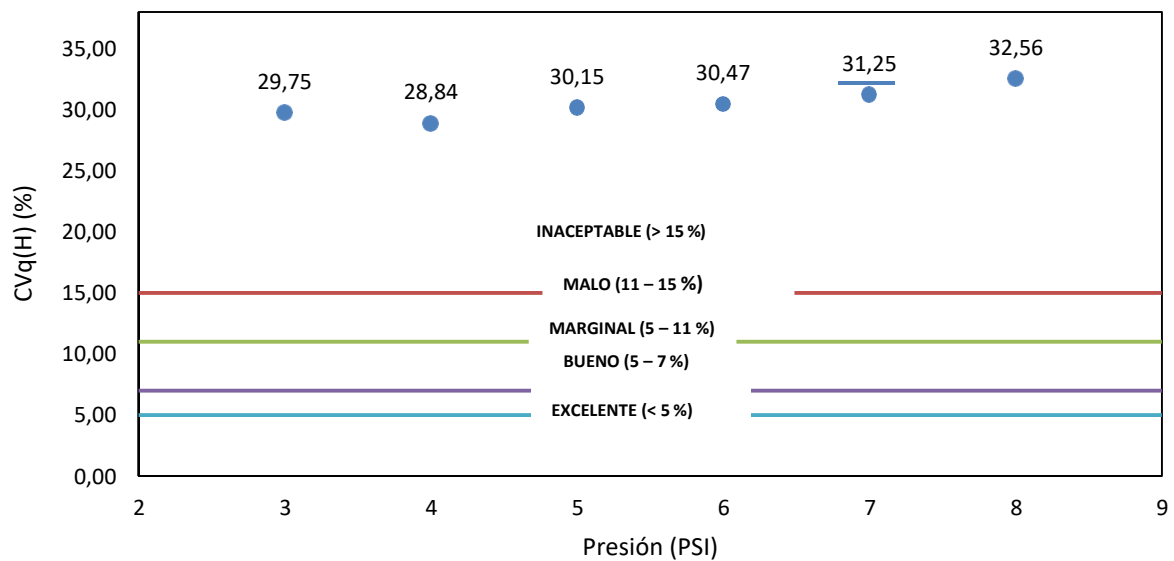


Figura 8. Coeficiente de variación del caudal por efectos hidráulicos para las presiones evaluadas.

Para poder entender mejor el comportamiento del sistema en la distribución y emisión fue realizada una revisión de los orificios mediante el uso de un microscopio de alta resolución para conocer la forma específica de los orificios y ver si presentaban variabilidad en su forma, dada por la forma de su fabricación.

En la figura 9. Se presentan imágenes de algunos de los orificios presentes en la MP que permiten visualizar esa alta variabilidad en la forma, lo que incide directamente en la uniformidad de emisión y por consiguiente en la forma en la que distribuyen el agua.

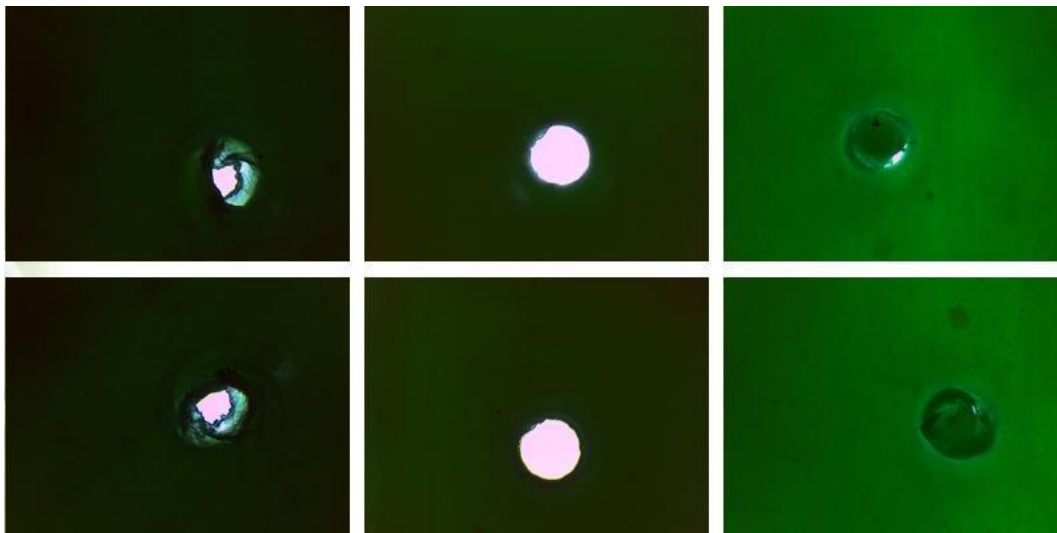


Figura 9. Imágenes ampliadas de los errores de fabricación en los orificios presentes en la MP.

## 8. CONCLUSIONES

- El sistema de MP desde la evaluación de la Uniformidad de Distribución presenta valores muy variables, inclusive bajo iguales presiones de operación.
- El CUC presenta valores muy bajos, por debajo de los recomendados para un sistema de aspersión y todavía aún más para un sistema de microriego.
- Desde el punto de vista del Coeficiente de Variación los valores resultantes son demasiado elevados, afectando la uniformidad de emisión del sistema.
- La disposición de los emisores no favorece la UD pues no permiten una aplicación más localizada y uniforme del agua en el suelo.

## 9. RECOMENDACIONES

- Se sugiere modificar la disposición y el número de emisores en la línea para localizar más la aplicación de agua en el suelo y mejorar la uniformidad.
- Mejorar la realización de los orificios (emisores) para disminuir la variación en la emisión de agua.
- Realizar, si modificada la disposición y número de emisores en la línea, nuevas evaluaciones de uniformidad.
- Validar en campo el sistema de MP bajo condiciones controladas y experimentales.

## 10. BIBLIOGRAFIA

ASABE (2008). EP-458: Field evaluation of microirrigation systems. ASABE, St. Joseph, USA.

Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, Asocaña, (2019). El sector azucarero colombiano en la actualidad. Recuperado de: <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>. Consultado en agosto 10 de 2019.

Ararát O., Milton; Sanclemente R., Oscar E.; De La Cruz C., Cristihan A. 2015. Contribución de *Vigna unguiculata* L. a la sustentabilidad de sistemas de cultivo de caña de azúcar. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. [S.l.], v. 6, n. 2, p. 47 - 56, enero. ISSN 2145-6453. Disponible en: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1404/1728>

Banco Mundial (2018). Agua: Panorama General. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>. Consultado en noviembre 25 de 2018.

Centro de Investigación de la caña de Azúcar de Colombia, Cenicaña, (2019) Recuperado de: <https://www.cenicana.org/>. consultado en septiembre 06 de 2019.

Christiansen, J. E. 1942. The uniformity of application of water by sprinkler systems. Agricultural Engineering 22: 89-92.

Europa Press (2018). La OCDE alerta de que la demanda de agua a nivel mundial aumentará en un 50 por ciento para 2050. Recuperado de <https://www.europapress.es/internacional/noticia-ocde-alerta-demanda-agua-nivel-mundial-aumentara-50-ciento-2050-20171023144538.html>. Consultado en agosto 12 de 2018.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2003), Descubrir el potencial del agua para la agricultura, Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-bl043s.pdf>. Consultado en marzo 14 de 2018.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>. Consultado en abril de 2018.

FAO, FIDA y PMA. 2015. El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo 2015. Cumplimiento de los objetivos internacionales para 2015 en relación con el hambre: balance de los desiguales progresos. Roma, FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i4646s.pdf>. Consultado en marzo 18 de 2018.

FRIZZONE, J. A. Microirrigacao, Gotejamento e Microaspersao. 2012.

GISPERT, J. R. y J. A. García. 1994. El volumen húmedo del suelo. Aspectos agronómicos relacionados con la microirrigación (b). Riegos y Drenajes XXI/77, 16-28.

GOODE, J. E., K. H. Higgs and K. J. Hyricz. 1978. Trickle irrigation of apple tree and the effects of liquid feeding with NO<sub>3</sub> and K<sup>+</sup> compared with normal manuring. J. Hort. Sci. 53. USA. 307-316.

HAMAN, D. Z., A. G. Smajstrla and D. J. Pitts. 1997. Uniformity of Sprinkler and Microirrigation Systems for Nurseries. Bulletin 321, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Keller, J. and R. D. Bliesner. 1990. Sprinkle and Trickle Irrigation. AVI Book. Van Nostrand Reinhold. New York.

Lathem, K. W. (1977). THE WORLD WATER CONFERENCE AT MAR DEL PLATA. Canadian Water Resources Journal, 2(2), 74–81. doi:10.4296/cwrj0202074

Letey, J., H. J. Vaux and E. Feinerman. 1984. Optimum crop water application as affected uniformity of water infiltration. *Agronomy Journal* 76: 435-441.

Levin, I., R. Assaf and B. Bravdo. 1979. Soil moisture and root distribution in an apple orchard irrigated by tricklers. *Plant and Soil*, 52. USA. 3140.

LÓPEZ, J.R.; ABREU, J.M.H.; REGALADO, A.P.; HERNÁNDEZ, J.F.G. Riego localizado. Madrid: Mundi-Prensa, 405 p. 1992.

Manuales en tema de riego (2015). <http://www.minagri.gob.pe/portal/manuales-en-tema-de-riego>. Recuperado de

[http://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual\\_determinacion\\_eficiencia\\_riego.pdf](http://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual_determinacion_eficiencia_riego.pdf). Consultado en agosto 28 de 2018.

Montovani, E. C., F. J. Villalobos, F. Orgaz and E. Fereres. 1995. Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agricultural Water Management* 27: 243-257.

Salcedo, Francisco & Barrios, Renny & García, Moraima & Váldez, Tomás. (2005). Distribución de agua en un sistema de microaspersión sobre un ultisol cultivado con Lima Tahití en el estado Monagas, Venezuela (Distribution of the water for a microsprinkler system on an ultisol cultivated with Tahití Lime in the Monagas State, Venezuela.). *Revista Científica UDO Agrícola*, ISSN 1317-9152, Vol. 5, Nº. 1, 2005, pags. 88-95.

Warrick, A. W. and W. R. Gardner. 1983. Crop yield as affected by spatial variation of soil and irrigation. *Water Resources Research* 19: 181-186.

Willoughb, Y. B. and B. Cockroft. 1974. Change in root patterns of peach trees under trickle irrigation. II International Drip Irrigation Congress Proceeding. California. USA. 439-442.