

**Contribución de abonos verdes a la producción sostenible de caña de azúcar  
Saccharum Officinarum (L.), en la hacienda La Floresta del municipio de  
Bugalagrande -Valle del Cauca.**

**Cristihan Andrés De la cruz Cardona.**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia  
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente  
Palmira, Colombia  
2015**

**Contribución de abonos verdes a la producción sostenible de caña de azúcar  
Saccharum Officinarum (L.), en la hacienda La Floresta del municipio de  
Bugalagrande -Valle del Cauca.**

**Cristihan Andrés De la cruz Cardona.**

**Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al  
Título de Agrónomo.**

**Director:**

**Oscar Eduardo Sanclemente Reyes. PhD.**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia**

**Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente**

**Palmira, Colombia**

**2015**

### **Dedicatoria.**

**Al arquitecto de todas las cosas**, que me ha fortalecido en aquellos momentos donde he estado a punto de caer; por esto y por permitirme hoy estar terminando mis estudios de pre grado, desde el fondo de mi ser y con la mayor de las humildades, dedico primeramente mi tesis **a Dios**.

De igual manera, dedico mi trabajo a mis padres **Martha Cardona y Sebastián De la cruz**, por siempre creer en mí, por sus voces de aliento en todo mi proceso de formación.

**A mi abuela, a mi querida abuela Libia Cardona**, que desde niño siempre me enseñó buenos valores, a ser responsable y colaborador, por eso y más quiero dedicarle mi tesis.

**A mi hermana Claudia y sobrino Santiago**, porque son parte fundamental de mi vida, por siempre estar a mi lado compartiendo buenos y malos momentos, por ese apoyo incondicional.

**A mis primos y tíos** que siempre me han enseñado el gran valor de la humildad, ya que sin él, no podríamos respetar y ser respetados.

**A mis amigos** a todos ellos, a los que tengo cerca y no tanto, a todos lo que he hecho a lo largo de este transitar por la vida, por su paciencia y por su apoyo y conocimientos ya que con esto hicieron de esta experiencia una de las mejores de mi vida profesional.

Con mucho cariño,

Cristihan De la cruz, *KINI!*

## **Agradecimientos.**

Agradezco de todo corazón...

Gracias a:

Mi maestro, Dr. Oscar Eduardo Sanclemente, quien estuvo siempre orientándome y aportando su consejo y sabiduría, a lo largo de este trabajo de investigación; lo cual me ha permitido enamorarme aún más de esta ciencia.

Al programa de financiamiento para semilleros de investigación de la Universidad Nacional Abierta y Distancia (UNAD), a través del proyecto PS-15-14 de convocatoria 04 de 2014, por su apoyo económico a esta investigación.

A Producciones Agrícolas CAVI, en cabeza de su gerente Oscar Flores Caicedo, al I.A Carlos Alberto Izquierdo, al Ms Juan Fernando Suarez, al T.A Edilson Orjuela, al Lab del CIAT, a los compañeros de campo en la hacienda la Floresta; por su apoyo profesional e importantes concejos.

A mis compañeros y amigos, Diego Fernando Brand, Jonatán Mina, Sindi Marcela González, Luis Enrique Ramírez, Luis Alfonso Obando, Esteban Berón, Juan Pablo Núñez, Emanuel Berón, Andrés Álzate, Carolina Flórez,... por estar pendiente siempre de mi trabajo.

A todos ellos muchas gracias.

## Resumen.

En un Vertisol del Valle del Cauca (Colombia) se evaluó entre 2015 I y 2015 II, la contribución del sistema intercalado frijol Caupí (*Vigna Unguiculata* L.) - caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L.), a la producción sostenible del agroecosistema. El Caupí se usó como abono verde AV en prefloración, permitiendo su aporte de biomasa y nutrientes al suelo. En diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones, se probaron los siguientes tratamientos: (ST) siembra de monocultivo de caña sin ninguna fuente de fertilización y suelo desnudo, (AV<sub>1</sub>) siembra en surcos 1X1 Caupí- caña, (AV<sub>2</sub>) siembra en surcos 2X1 Caupí- caña, (AV<sub>1</sub> +R) siembra en surcos 1X1 Caupí- caña + cepa de *Rhizobium sp.*, y (AV<sub>2</sub> + R) siembra en surcos 2X1 Caupí- caña + cepa de *Rhizobium sp.* Se evaluó el aporte de biomasa de Caupí, la biomasa de arvenses asociadas, la humedad del suelo, el contenido de nitratos del suelo y el desarrollo fisiológico del cultivo de caña durante los primeros meses, como efecto de los tratamientos. Se registró aporte significativo ( $p < 0.05$ ) de materia seca de Caupí en AV<sub>2</sub> con 14.5 t/ha, siendo importante para el mejoramiento de la materia orgánica del suelo y sus efectos sobre otras propiedades, como lo evidenció la diferencia de retención de humedad (173 m<sup>3</sup>/ha) frente al ST. De igual forma, el AV<sub>2</sub> redujo totalmente las arvenses asociadas al cultivo de caña, siendo esto favorable en términos de eliminar la aplicación de herbicidas al suelo. Luego de la incorporación de los AV, se registraron contenidos significativamente ( $p < 0.05$ ) altos de nitratos en ST, pudiendo explicarse por procesos de mineralización y pérdida del nitrógeno orgánico de reserva del suelo. El uso de la cepa comercial de *Rhizobium sp.* En AV<sub>1</sub>+R y AV<sub>2</sub>+R no tuvo efectos aparentes sobre las variables evaluadas, por su baja especificidad simbiótica con Caupí, que pudo realizar fijación de N<sub>2</sub> con bacterias nativas del suelo. Las variables fisiológicas en caña no difirieron estadísticamente ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos. Estos resultados muestran las bondades del uso de sistemas intercalados leguminosas- caña de azúcar, sobre la economía y sustentabilidad agroecosistémica.

**Palabras clave:** sustentabilidad, agroecosistema, conservación de agua, economía de cultivo, cambio climático.

### Abstract.

In a Vertisol of Valle del Cauca (Colombia) was evaluated between 2015 I and 2015 II, the contribution of intercropping system cowpea (*Vigna unguiculata* L.) - Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), to the sustainable production of agroecosystem. Cowpea was used as green manure GM at flowering, allowing input of biomass and nutrients to the soil. In completely randomized design with five replicates blocks, the following treatments were tested: (T) monoculture planting cane without any source of fertilization and bare soil (GM<sub>1</sub>) Cowpea- 1X1 row planting cane (GM<sub>2</sub>) Cowpea- 2X1 row planting cane (GM<sub>1</sub> + R) bed planting 1X1 Cowpea- cane + strain of *Rhizobium* sp. , and (GM<sub>2</sub> + R) bed planting cane + Cowpea- 2X1 strain of *Rhizobium* sp. The contribution of cowpea biomass, the biomass of associated weeds, soil moisture, the soil nitrate content and the physiological cane crop development during the first months, the effect of the treatments was evaluated. Significant contribution ( $p < 0.05$ ) dry matter of cowpea GM<sub>2</sub> with 14.5 t / ha and is important for the improvement of soil organic matter and its effect on other properties was recorded, as evidenced by the difference in moisture retention (173 m<sup>3</sup>/ha) compared to T. Similarly, the GM<sub>2</sub> completely cut weeds associated with the cultivation of sugarcane, this being favorable in terms of removing the application of herbicides to the ground. After incorporating the GM content significantly ( $p < 0.05$ ) higher in T nitrate, can be explained by loss processes mineralization of organic nitrogen and reserve soil were recorded. The use of commercial strain of *Rhizobium* sp. GM<sub>1</sub>+R and GM<sub>2</sub> + R had no apparent effect on the evaluated variables, symbiotic its low specificity with cowpea, which could make N<sub>2</sub> fixation with native soil bacteria. The physiological variables did not differ statistically cane ( $p < 0.05$ ) between treatments. These results show the benefits of using sugar cane interspersed legumes- systems, the economy and sustainability agroecosistémica.

**Keywords:** sustainability, agroecosistema, water conservation, growing economy, climate change.

## Contenido

1. <b>Introduccion.</b> .....	13
2. <b>Objetivos del proyecto</b> .....	16
2.1. <b>Objetivo general</b> .....	16
2.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	16
3. <b>Marco teorico</b> .....	17
3.1. <b>Antecedentes.</b> .....	17
3.1.1. <b>Origen de la caña de azúcar.</b> .....	17
3.1.2. <b>Botánica caña de azúcar.</b> .....	18
3.1.3. <b>Origen del frijol caupí vigna unguiculata.</b> .....	19
3.1.4. <b>Algunas características morfológicas y agroecológicas del frijol caupí.</b> ...	19
3.2. <b>Marco conceptual</b> .....	20
3.2.1. <b>Importancia de la materia orgánica del suelo mos, para la agricultura del valle del cauca.</b> .....	20
3.2.2. <b>Bondades del uso de abonos verdes av</b> .....	21
3.2.3. <b>Importancia del nitrógeno en la naturaleza</b> .....	22
3.2.4. <b>Ciclaje del nitrógeno</b> .....	22
3.2.5. <b>Antecedentes de la investigación</b> .....	24
4. <b>Materiales y metodos.</b> .....	30
4.1. <b>Localización y estado inicial del suelo.</b> .....	30
4.1.1. <b>Lámina de agua en el sistema.</b> .....	30
4.2. <b>Establecimiento del ensayo en campo.</b> .....	30
4.2.1. <b>Diseño experimental.</b> .....	31
4.2.2. <b>Aplicación del inóculo y labores de siembra.</b> .....	32
4.2.3. <b>Riego y segunda aplicación de rhizobium.</b> .....	33
4.3. <b>Evaluación del aporte de biomasa de frijol caupí.</b> .....	34
4.4. <b>Evaluación de la población de caña de azúcar</b> .....	35
4.5. <b>Evaluación de altura de tallos de caña de azúcar</b> .....	35
4.6. <b>Evaluación del área foliar de caña de azúcar</b> .....	36

4.7.	<b>Estimación de la población de arvenses.</b>	37
4.8.	<b>Evaluación de humedad del suelo</b>	38
4.9.	<b>Estimación del efecto de los tratamientos, sobre el contenido de nitratos del suelo</b>	38
4.10.	<b>Análisis estadístico de los datos</b>	39
5.	<b>Resultados y discusion</b>	40
5.1.	<b>Análisis físico y químico del suelo</b>	40
5.2.	<b>Aporte de biomasa de frijol caupí al suelo</b>	41
5.3.	<b>Incidencia de los tratamientos sobre la población de arvenses en el sistema de cultivo</b>	42
5.4.	<b>Estimación del efecto de los tratamientos, sobre el contenido de nitratos del suelo.</b>	43
5.5.	<b>Lámina de agua en el sistema.</b>	45
5.6.	<b>Evaluación de la población de caña de azúcar.</b>	46
5.7.	<b>Evaluación de altura de tallos de caña de azúcar.</b>	48
5.8.	<b>Evaluación del área foliar de caña de azúcar</b>	49
5.9.	<b>Discusión general.</b>	50
6.	<b>Conclusiones.</b>	52
7.	<b>Recomendaciones.</b>	53
8.	<b>Anexos</b>	54
9.	<b>Bibliografía</b>	57

## Lista de figuras.

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Ciclo del nitrógeno.	23
<b>Figura 2.</b> Descripción gráfica del balance hídrico del cultivo, entre los meses de febrero y julio de 2015.	32
<b>Figura 3.</b> Distribución de los tratamientos experimentales en cada uno de los bloques en campo.	32
<b>Figura 4.</b> Incolulación de las semillas de Frijol caupí. A) Producto <i>Rhizobacter</i> sp. suministrado por le empresa Hongos de Colombia Fungicol S.A.S. B) Semilla imbibida con inóculo.	33
<b>Figura 5.</b> Siembra del Frijol Caupí. A) Sembradora de cadena con 4 tarros. A) semilla depositada en uno de los tarros, a punto de ser sembrada.	33
<b>Figura 6.</b> Riego y reinoculación de cepa de <i>Rhizobium</i> sp., posterior a la siembra. aplicación de riego de germinación por aspersion. B) Desarrollo del intercultivo, 13 días después de la siembra en las parcelas experimentales. C) Aplicación de Rhizobium en la parcelas tratadas, 13 días después de la siembra del frijol Caupi. D) Aplicación de del inóculo por metro lineal.	34
<b>Figura 7.</b> Toma de muestras de biomasa de caupí. A) Ubicación del marco aforador para tomar muestras de biomasa. B) Corte de Caupi a ras de piso después de la ubicación dentro del cuadrante.	35
<b>Figura 8.</b> Evaluación de altura de tallos de caña de azúcar. A) selección de plantas al azar. B) Medición.	36
<b>Figura 9.</b> Evaluación del área foliar de caña azúcar en campo. A) Medición de ancho foliar. B) Medición de longitud foliar.	37
<b>Figura 10.</b> Arvenses presentes en el ensayo. A) Surco de caña de azúcar del tratamiento ST, invadido por bleado <i>Amaranthus</i> spp. B) Surco manejado con Caupi <i>Vigna unguiculata</i> , como cobertura viva.	38
<b>Figura 11.</b> Muestreo de suelos. A) Toma de muestra de 0-10 cm con uso de palín, antes de siembra. B) Etiquetado y almacenamiento en frío de muestras.	39
<b>Figura 12.</b> Diagrama de cajas y alambres para la variable peso seco (g/0.25 m <sup>2</sup> ) de biomasa de Frijol caupí, por cada tratameinto evaluado	41
<b>Figura 13.</b> Diagrama de cajas y alambres para la variable peso seco (g/0.25 m <sup>2</sup> ) de arvenses asociadas al sistema de cultivo, por cada tratameinto evaluado.	42
<b>Figura 14.</b> Diagrama de cajas y alambres para la variable peso Nitratos (% /g de suelo) variable tomada con el antes y el despues de la incorporacion de frijol caupi ( <i>Vigna Unguiculata</i> ).	44
<b>Figura 15.</b> Diagrama de cajas y alambres para la variable de humedad (g/100g) de suelo, por cada tratameinto evaluado.	46
<b>Figura 16.</b> Diagrama de cajas y alambres para la variable poblacion inical (# tallos/m) por metro lineal, por cada tratamiennto evaluado.	47
<b>Figura 17.</b> Diagrama de cajas y alambres para la variable poblacion final (# tallos/m) por metro lineal, por cada tratamiennto evaluado.	47

**Figura 18.** Diagrama de cajas y alambres para la variable Altura de tallos (# tallos/cm), por cada tratamiento evaluado. 48

**Figura 19.** Diagrama de cajas y alambres para la variable Area foliar de caña de azucar ( $\text{cm}^2/\text{\#hojas}$ ), por cada tratamiento evaluado. 49

## Lista de tablas.

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Análisis de suelo (suerte 614) en la hacienda La Floresta, tomado en enero 2015 de 0-20 cm de profundidad.	40

**lista de anexos.**

	<b>Pag.</b>
<b>Anexo 1.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para la variable Peso seco de frijol Caupí.	54
<b>Anexo 2.</b> Prueba de medias de Duncan ( $p < 0.05$ ) para la variable Peso seco de frijol Caupí.	54
<b>Anexo 3.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para la variable Peso seco de biomasa de arvenses.	54
<b>Anexo 4.</b> Prueba de medias de Duncan ( $p < 0.05$ ) para la variable Peso seco de biomasa de Arvenses.	55
<b>Anexo 5.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para nitratos $\text{NO}_3$	55
<b>Anexo 6.</b> Prueba de medias de Duncan ( $p < 0.05$ ) para nitratos $\text{NO}_3$	55
<b>Anexo 7.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para la variable de humedad	55
<b>Anexo 8.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para poblacion inicial	56
<b>Anexo 9.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para poblacion final	56
<b>Anexo 10.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para altura de la caña	56
<b>Anexo 11.</b> Análisis de Varianza ANDEVA para area foliar en caña	56

## 1. Introducción.

La caña de azúcar es una gramínea que por su carácter C4 posee alta capacidad de producción de biomasa y, gran capacidad de acogida del medio, siendo uno de los cultivos de mayor importancia económica en Colombia (Maldonado, 1984). En la actualidad, se estima que en el país se cultivan cerca de 225.560 ha de caña de azúcar, distribuidas principalmente en los departamentos de Valle del Cauca, Cauca, Risaralda y Nariño, con proyecciones de siembra en los llanos orientales (Asocaña, 2008). Sin embargo, la productividad del cultivo ha venido decreciendo en los últimos años, siendo objeto de investigación de centros como Cenicaña, Corpoica y algunas universidades. Desde 2006, el análisis de productividad de las últimas dos décadas en el país, advertía sobre la estabilidad en el número de toneladas cosechadas de caña por hectárea (TCH), siendo preocupante el caso del Valle del Cauca, donde algunas suertes mostraban rendimientos decrecientes en el tiempo. Cabe anotar que la historia agrícola del departamento se remonta a cultivos tradicionales de cereales, tabaco, algodón, leguminosas y frutales cuyos residuos vegetales aportaban cantidades significativas de materia orgánica al suelo, que unida a la reducida labranza, garantizaba condiciones físicas, químicas y biológicas óptimas en los suelos, para el desarrollo de subsiguientes cultivos como el de la caña de azúcar.

En la década de los 80's, con el crecimiento de la agroindustria azucarera en el Valle del Cauca, se implementó la mecanización intensiva en los cultivos, caracterizada por el uso de tractores de gran tamaño y subsoladores de profundidad, unidos a labores de cosecha con maquinaria pesada, que han venido ocasionando problemas de compactación y sellamiento superficial del suelo. Adicionalmente, las aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados y el uso indiscriminado de herbicidas para la sostenibilidad del cultivo, generan problemas de degradación química y biológica del suelo, dando como resultado pérdidas de la materia orgánica estable MOS, con consecuentes efectos sobre la productividad del mismo cultivo.

En este aspecto, la baja relación productividad/fertilización que se viene obteniendo en los últimos años en el cultivo, preocupa a los cañicultores. Para el caso del uso de urea, por ejemplo, durante el período 1975-1985 se aplicaban 200 kg/ha en socas y 100 kg/ha en plantillas, cuando existían posibilidades económicas; logrando una productividad de hasta 1.33 ton de caña/kg de N aplicado y, generando una buena rentabilidad económica para los ingenios azucareros. Sin embargo, en la actualidad la productividad ha bajado a cerca de 0.67 ton de caña/kg de N ureico aplicado, significando una pérdida económica cercana al 50%, comparada con las rentabilidades de hace 30 años. Adicionalmente, la producción de urea tiene el

agravante ambiental de requerir altos gastos energéticos en términos de unidades de petróleo, y su utilización en países tropicales como Colombia demanda de combustibles para su transporte hasta el sitio de aplicación, siendo un fertilizante poco eficiente. Unido a este problema, se encuentra el impacto negativo sobre la acidificación de suelos, la contaminación de acuíferos y la emisión de  $N_2O$  como gas de efecto invernadero GEI a la atmósfera, ocasionando desbalance global del ciclo de N (Galloway, 2004; Rockström *et al.*, 2009).

Surge entonces, la necesidad de investigación en tecnologías agroambientales más eficientes para el suministro de materia orgánica y N a cultivos como la caña de azúcar. Una de estas alternativas, consiste en la utilización de leguminosas en asocio y/o rotación como abonos verdes AV con miras de aprovechar su potencial para la fijación de  $N_2$  atmosférico, el suministro del elemento al cultivo y, al mismo tiempo, el aporte de materia orgánica lábil de rápida descomposición para mejorar la fertilidad del suelo (Da Costa, 1993; Prager *et al.*, 2012). En general, el uso de abonos verdes leguminosos tiene como propósito aportar cantidades importantes de biomasa vegetal verde y seca, para proteger el suelo de las altas temperaturas y de la intensidad de las lluvias, reduciendo significativamente la erosión hídrica y eólica de los suelos, y al tiempo, mejorando la fertilidad química, física y biológica vía ciclaje de nutrientes e incremento de la MOS (Sanclemente, 2013).

El frijol Caupí *Vigna unguiculata* L. es un abono verde leguminoso de verano, que puede fijar biológicamente el  $N_2$  atmosférico por asociación con algunas bacterias de los géneros *Rhizobium* sp. Y *Bradyrhizobium* sp (Obando, 2012). El abundante contenido de nitrógeno y bajo contenido de celulosa, hacen del Caupí un abono verde de rápida descomposición, que mejora de los niveles del N del suelo, pero que aporta poco a la MOS por su baja relación C: N (21:1). Sin embargo, en el ciclo de cultivo de caña de azúcar el alto aporte de biomasa y residuos en cosecha con relaciones C: N (80:1), permiten compensar este parámetro en el sistema de siembra caña de azúcar- Caupí, generando beneficios a corto, mediano y largo plazo.

Las bondades del uso del Caupí en sistemas de cultivo van más allá de la fijación de  $N_2$ , algunos investigadores han registrado incrementos en el ciclaje de macronutrientes como Fósforo, Calcio, Magnesio y Potasio y, micronutrientes como Hierro, Cobre, Manganeseo y Zinc, en cantidades importantes. Adicionalmente, sus raíces extensas le permiten explorar el suelo en profundidad (pudiendo alcanzar más de 1,0 m), por ello su capacidad para recircular los nutrientes presentes en horizontes profundos y, hacerlos disponibles en los primeros centímetros donde se concentra la rizósfera de la mayoría de las plantas cultivadas. Otros estudios han mostrado las bondades del Caupí cuando se utiliza en rotación, para afectar los ciclos de plagas insectiles y enfermedades bacteriales o fúngicas, así como

supresor de arvenses. Además, por ser nectarífera el Caupí atrae muchos insectos, fomentando un microecosistema de relaciones de competencia y parasitismo con plagas de importancia económica, favoreciendo los balances biológicos plaga-predador y, aportando a la sustentabilidad del sistema productivo (Berlingeri *et al.*, 2008).

En tal sentido, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la contribución del abono verde *Vigna unguiculata* L., a la producción sostenible del cultivo de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L., en la hacienda La Floresta, municipio de Bugalagrande- Valle del Cauca. Los resultados de esta investigación, servirán de referencia para futuros estudios en alternativas tecnológicas de bajo costo para el manejo de la fertilidad de suelos cultivados con caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca.

## 2. Objetivos del proyecto

### 2.1. Objetivo general

Evaluar la contribución del abono verde *Vigna unguiculata* L., a la producción sostenible del cultivo de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L., en la hacienda La Floresta, municipio de Bugalagrande- Valle del Cauca.

### 2.2. Objetivos específicos

1. Estimar el efecto del abono verde *Vigna unguiculata* L. asociado al cultivo de caña de azúcar *Saccharum Officinarum* L., sobre la retención de humedad del suelo.
2. Evaluar la incidencia del abono verde *Vigna unguiculata* L. sobre la presencia de vegetación espontánea de interferencia al cultivo de caña de azúcar *Saccharum Officinarum* L., asociado.
3. Determinar el efecto del abono verde *Vigna unguiculata* L. sobre algunas variables fisiológicas del cultivo de caña de azúcar *Saccharum Officinarum* L.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. Antecedentes.

##### 3.1.1. Origen de la caña de azúcar.

La caña de azúcar es una planta tropical que pertenece a la familia de las gramíneas y la tribu Andropogoneae. Las plantas de caña que actualmente se cultivan son generalmente híbridas, obtenidas a partir de dos o más especies del género *Saccharum*: *S. Barben*, *S. officinarum*, *S. Robustum*, *S. smense* y *S. Spontaneum*. Muchas de estas especies sufrieron cruzamientos naturales, originando un género muy diverso (Asociación Naturland, 2000).

Estudios realizados por investigadores sobre el origen de la caña de azúcar, reportan y coinciden que *S. spontaneum*, *S. sinense* y *S. barben* se desarrollaron en el área de Birmania, China, e India, en Asia meridional. Las formas relativamente jugosas de las dos últimas especies, fueron utilizadas con fines de extracción de carbohidratos inicialmente en India y China. Cuando dichas especies se extendieron a otras regiones, sufrieron cruzamientos con otras gramíneas, apareciendo las especies *S. robustum* y *S. officinarum* en las islas del sureste de Indonesia y, en Nueva Guinea, respectivamente. La especie *S. officinarum* se extendió de forma muy lenta, llegando al sur de España en el año 773 d.C. y Sicilia en 950 d.C. La ruta hacia el oeste continuó, llegando a Madeira e islas Canarias en 1420, desde donde Cristóbal Colón la llevó al nuevo mundo en 1493. El cultivo se extendió de Santo Domingo a varios países como: México, Brasil, Perú y, a las Antillas, llegando a Hawái en el año de 1700 (Asociación Naturland, 2000).

La caña de azúcar es un cultivo que se adapta a diferentes condiciones climáticas, pero muestra su mejor comportamiento en zonas con condiciones tropicales cálidas y altos picos de radiación solar. La temperatura adecuada para el desarrollo de este cultivo oscila entre 25 y 28°C, que junto con una adecuada humedad promueven el desarrollo vegetativo, mientras que los ambientes secos la maduración y concentración de azúcares.

### **3.1.2. Botánica caña de azúcar.**

#### **3.1.2.1. Raíz**

El sistema radical de la caña cumple las funciones de anclaje y absorción de agua y nutrientes minerales de la solución del suelo. Las raíces son fasciculadas y presentan morfología transversal cilíndrica, formada por: la cofia, el punto de desarrollo, la región de elongación y los pelos radicales. La cofia es la encargada de darle protección a la raíz de daños mecánicos, por acción de los sólidos del suelo y el ataque de los organismos presentes. Los pelos radicales absorben por capilaridad y transporte activo los macro y micronutrientes en solución, presentando incluso, asociación con hongos micorrízicos para mejorar la exploración en el volumen de suelo (Agüero, 2012).

#### **3.1.2.2. Tallo**

La caña de azúcar se desarrolla en forma de matas, procedentes de trozos de tallo. Los tallos pueden alcanzar 2 a 3 m de longitud por año, formando tres canutos por mes, con aproximadamente 1 a 23 tallos por macolla, según la variedad, dividiéndose éstos en: primarios, secundarios y terciarios. Los tallos también sirven como tejidos de transporte de agua y nutrientes extraídos del suelo, que suministran el crecimiento de las células meristemáticas. El tallo está compuesto por: la epidermis o corteza; los tejidos y fibras que se extienden en toda la longitud del tallo, con humedad cercana al 75%. La morfología del tallo se caracteriza por presentar nudos y entrenudos que difieren en las diferentes variedades, en términos de su longitud, diámetro, forma y color. El tallo de la caña de azúcar se considera como el fruto agrícola, ya que en él se distribuye y almacena el azúcar. El azúcar se va acumulando en los entrenudos inferiores disminuyendo su concentración a medida que se asciende hacia la parte superior del tallo (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar- Cenicaña, 1995).

#### **3.1.2.3. Hoja**

En las hojas de la caña se realiza el proceso fotosintético, donde: agua, dióxido de carbono y algunos nutrientes absorbidos del suelo, se convierten en carbohidratos por acción de la luz solar. Las hojas son laminas largas, delgadas y planas que miden aproximadamente entre 0.9 a 1.5 m de largo y varían de 1 a 10 cm de ancho, según la variedad. La vaina o parte inferior de la hoja que está pegada al tallo en el nudo, le sirve de soporte. Su forma es tubular y, más ancha en la base, ésta gradualmente se estrecha hacia la banda ligular. Las hojas están a menudo

cubiertas con pelos y, tienen numerosos estomas que permite el intercambio gaseoso con la atmósfera (Cenicaña, 1995).

#### **3.1.2.4. Inflorescencia**

La inflorescencia es una panícula formada por pequeñas flores perfectas y sedosas llamadas espigas. La floración es un proceso natural que ocurre cuando las plantas han completado su ciclo vegetativo para iniciar el período reproductivo. No todas las variedades de caña de azúcar florecen con la misma intensidad, ya que hay factores genéticos que regulan la floración y factores ambientales que a su vez la inducen (Cenicaña, 1995).

#### **3.1.3. Origen del Frijol Caupí *Vigna unguiculata*.**

El frijol Caupí es una leguminosa del género *Vigna* originaria del continente Asiático, sin embargo su dispersión ha llegado a muchos países del mundo, pudiéndose hoy encontrar como cobertura vegetal y fuente de proteínas para consumo humano y animal en África, Europa y el continente Americano, siendo este último donde se le consume con mayor regularidad y se siembra con diversos fines (Corporación para la Investigación Agropecuaria- Corpoica, 2008). El material *Vigna unguiculata* (L.) Walp., que cultiva en muchas partes del mundo, tiene muchos nombres comunes en español, dependiendo del país: Caupí o chícharo salvaje (España); Caupí o fríjol de cabecita negra (Colombia); frejol Castilla o frejol Chiclayo (Perú); poroto tape, poroto arroz, porotito del ojo (Argentina); feijão Macasar o feijão de corda (Brasil); frijol Caupí (Cuba). En resultados de investigaciones donde se utiliza la especie, es común encontrarlo con el Cowpea, lubia, niebe, coupe o frijole (Dumet *et al.*, 2008).

#### **3.1.4. Algunas características morfológicas y agroecológicas del frijol Caupí.**

El frijol Caupí, es una leguminosa anual rastrera o arbustiva de rápido crecimiento y desarrollo vigoroso. Puede alcanzar entre 70 - 90 cm de altura y se caracteriza por flores de color púrpura azulado a blanco, hojas de ovales a cordiformes y planas, vainas de 10 – 20 cm de longitud y semillas grandes. El periodo de producción de granos puede tardar entre 70 - 140 días después de la siembra, dependiendo de las condiciones agroecológicas de la zona.

La especie se adapta bien a suelos con pH entre 4.5 y 7.0, buena fertilidad y profundidad efectiva, siendo susceptible a condiciones de salinidad y a las inundaciones. El mayor pico productivo, se ha registrado en altitudes entre 0 y 1.400 m.s.n.m., temperaturas entre 19 y 27°C óptimo 20-35°C y, precipitaciones entre 600 y 4000 mm anuales, con la particularidad de moderada adaptación a la sombra (Corpoica, 2008).

El Caupí tiene alto potencial como cobertura vegetal y abono verde, pudiendo ser incorporado en los primeros centímetros de suelo entre la 8 y 10 semana después de la siembra, logrando proporcionar cerca de 80 kgN/ha para uso de cultivos posteriores. Así mismo, es un excelente ensilaje para la utilización en cultivos mixtos de sorgo, frijol y forraje o mijo (Cardona, Jarma y Araméndiz, 2103).

## **3.2. Marco Conceptual**

### **3.2.1. Importancia de la materia orgánica del suelo MOS, para la agricultura del Valle del Cauca.**

La MOS es uno de los constituyentes más importantes de la fracción sólida del suelo, debido a sus propiedades coloidales, alta retención de humedad, propiedades buffer y aporte gradual de nutrientes, siendo un componente fundamental para el desarrollo de actividades agrícolas (Jaramillo, 2002). Por su parte, el bajo contenido de MOS en zona plana del Valle del río Cauca, está generando problemas en algunas propiedades del suelo como: baja retención de humedad, poca adsorción de nutrientes y, en general, reducida resiliencia a factores adversos derivados del cambio climático. Estos factores inciden notablemente en incrementos de la frecuencia de riego y aplicación de fertilizantes de síntesis química, como principal fuente de nutrición. Se estima que cerca del 32% del área cultivable en el departamento contiene menos de 2% de MOS, 66% entre 2- 4% de MOS y, el 2% presenta un contenido de MOS superior al 4% (Malagón, 1998).

Las suertes de caña pertenecientes al Ingenio azucarero Central Castilla, se caracterizan en su mayoría por bajos contenidos de MOS, siendo críticas el 50% con valores de MOS inferiores al 2%, lo que agrava la problemática y pone en riesgo la sustentabilidad del sistema productivo. De acuerdo con algunos registros de campo entre 1975 y 2006, se observa una reducción progresiva de la MOS en las suertes en el tiempo, relacionándose con problemas degradativos como la compactación, salinización, sellamiento superficial y erosión laminar (Gómez, 2004). De aquí la necesidad de generar tecnologías de cultivo alternativas para

mejoramiento del proceso de humificación en el suelo, como el uso de coberturas vegetales, acolchados orgánicos y abonos verdes.

Una de las tecnologías aplicables al cultivo de caña de azúcar, es el uso de residuos de cosecha de leguminosas, que incorporados al suelo aportan significativas cantidades de nitrógeno, fósforo y algunos microelementos (Maldonado, 1984). Algunos investigadores registran que la siembra de la leguminosa *Crotalaria Juncea* en rotación o intercalando con los surcos de caña de azúcar, favorece la mejora en la calidad del jugo e incrementa el rendimiento de las cañas (Gowda y Marlakulandai, citados por Brenes, 1981).

### 3.2.2. Bondades del uso de abonos verdes AV

El uso intensivo del suelo por actividades agropecuarias, está generando problemas de degradación de este importante recurso para la humanidad. De acuerdo con la FAO (2008), cerca del 20% de los suelos con potencial agrícola se encuentran degradados de manera irreversible, siendo una problemática que afecta a cerca de un billón de personas. Esta alerta mundial, conlleva la necesidad de explorar nuevas tecnologías agrícolas que reduzcan el impacto sobre el suelo, al tiempo que generen beneficios para los productores. Una de estas tecnologías son los abonos verdes AV, definidos como plantas que se siembran en rotación o intercalado con los cultivos de interés particular, con el fin de aportarles nutrientes y, mantener y/o mejorar los contenidos de MOS en el tiempo (Da costa, 2002; Prager *et al.*, 2012).

Generalmente, las plantas utilizadas como AV pertenecen a la familia de las leguminosas, cuyo uso se debe a su capacidad de fijación del  $N_2$  atmosférico gracias a la asociación simbiótica con rizobios del suelo. De esta forma, el nitrógeno presente en la biomasa del AV se recicla en el suelo mediante mineralización y puede ser absorbido por cultivos subsiguientes. Sin embargo, en algunas regiones se usan como AV especies de gramíneas y crucíferas con potencial alelopático, alta capacidad adaptativa al medio y extracción de nutrientes. Con el mejoramiento de la MOS, se favorecen otras propiedades físicas, químicas y biológicas de suelo (Sánchez de Prager *et al.*, 2012), que soportan su sustentabilidad. Entre los efectos más representativos del uso de AV después de su incorporación en el suelo, se encuentran: Aporte de biomasa precursora de MOS, mejoramiento de la estructura, manutención y disponibilidad de nutrientes solubles, incremento de la actividad microbiana, mejora la retención de humedad, entre otras.

Gracias a su rápido crecimiento, alta capacidad adaptativa al medio y rusticidad, el frijol caupí *Vigna unguiculata* se utiliza como AV, sobre todo en regiones donde los

agricultores no tienen capacidad adquisitiva para comprar fertilizantes de síntesis química o aplicar abonos compostados. Algunos investigadores registran aporte de hasta 100 kgN/ha al suelo, con los residuos de caupí en estado de prefloración en sistemas de cultivo de cereales como maíz y trigo (Sanclemente, 2013). Resaltan además, que el aporte nitrogenado del caupí dependerá de factores como el tipo de suelo, la humedad, la disponibilidad de N- inorgánico en el suelo, la actividad biológica y el contenido de MOS.

### 3.2.3. Importancia del nitrógeno en la naturaleza

El nitrógeno es un elemento fundamental para la vida en el planeta, ya que hace parte de biocompuestos como: aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN), entre otros, que constituyen la biomasa de todos los organismos y permiten su reproducción. A nivel natural, el ciclo del nitrógeno al igual que la mayoría de los ciclos biogeoquímicos, presenta transformaciones físicas, químicas y biológicas, que posibilitan la abundancia del elemento en los diferentes biomas terrestres. El nitrógeno molecular es el principal constituyente de la atmósfera, sin embargo dada su estabilidad molecular por el triple enlace covalente, es de difícil reactividad y por ende, baja disponibilidad para las plantas que lo requieren en grandes cantidades. A pesar de esto, gracias a la mediación microbiana el nitrógeno atmosférico puede fijarse de manera libre en el suelo o asimilarse en las raíces de las leguminosas por asociación simbiótica con bacterias diazotróficas, estas últimas con capacidad genética de producción de la enzima nitrogenasa, encargada de la ruptura del triple enlace. De esta manera, la leguminosa obtiene vía tejido radical el nitrógeno amoniacal fijado por la bacteria asociada y, ésta a su vez, obtiene de la planta azúcares y exudados radicales (Sánchez de Prager *et al.*, 2012). Una vez los tejidos vegetales se incorporan al suelo en forma de necro masa, el nitrógeno fijado se mineraliza y, queda disponible para ser aprovechado por plantas y microorganismos rizosféricos.

### 3.2.4. Ciclaje del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno es uno de los más complejos, debido a las diferentes formas químicas en las que se presenta el elemento en la naturaleza. Como se mencionó con anterioridad, el nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) se encuentra en forma libre y constituye cerca del 78% del aire, a condiciones estándar. Sin embargo, en el suelo el nitrógeno se conjuga con el carbono, hidrógeno y oxígeno, formando diversidad



Una vez amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) llega al suelo, un grupo de bacterias quimio sintéticas (Ej.: *Nitrosomas* sp. y *Nitrosococcus* sp.), lo transforman a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y, posteriormente, este es convertido en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por bacterias género *Nitrobacter* sp., que finalmente está disponible para ser absorbido o aprovechado por las raíces de las plantas o los organismos del suelo.

El nitrógeno que se absorbe en las plantas, posteriormente se transforma en aminoácidos y proteínas que son consumidas por animales herbívoros, quienes incorporan el elemento en sus tejidos, siendo fundamental en la formación de músculos y estructuras locomotoras. Cabe mencionar que el nitrógeno de estas biomoléculas, retorna al suelo en forma excrementos y, demás constituyentes de la necro masa en descomposición. Se destacan compuestos como: amoniaco (algunos peces y organismos acuáticos), urea (el hombre y otros mamíferos) y ácido úrico (aves y otros animales de zonas secas), que posteriormente, se transforman en minerales inorgánicos por intermediación microbiana.

Finalmente, bajo condiciones anaeróbicas el nitrógeno inorgánico presente en el suelo se reduce y transforma en gases ( $\text{NO}$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ), en un proceso llamado desnitrificación. En este proceso, actúan bacterias de los géneros *Pseudomonas* sp., *Thiobacillus* sp., entre otras, que aprovechan el oxígeno presente en el  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  metabólicamente. El nitrógeno gaseoso se volatiliza y disuelve en la atmósfera, generando pérdidas en el suelo y aportes negativos al cambio climático, ya que compuestos como el  $\text{N}_2\text{O}$  son causales del efecto invernadero (Sanclemente, 2013).

### **3.2.5. Antecedentes de la investigación**

#### **3.2.5.1. Uso de abonos verdes leguminosos, en el cultivo de caña de azúcar.**

Evaluando algunos AV en el cultivo de caña de azúcar en 2005, investigadores del centro de investigación de la caña de azúcar de Guatemala CENGICAÑA, sembraron *Crotalaria juncea* y *Canavalia ensiformis* en intercalado con plantillas de caña, con el fin de analizar su aporte de biomasa y nitrógeno al suelo (Pérez *et al.*, 2008; Balañá *et al.*, 2010). Luego de 65 días después de siembra, registraron aporte de 23.4 ton/ha de materia fresca por *C. juncea* y 19.2 ton/ha por *C. ensiformis*. La concentración de nitrógeno en los tejidos de *C. juncea* fue de 3.29% y de 3.52% en *C. ensiformis*, significando aportes netos al suelo de 157 y 117 kgN/ha, respectivamente. Adicionalmente, se registró reducción de arvenses en el suelo cercanas al 62% cuando se usó *C. júncea* y, del 42% con *C. ensiformis*,

respectivamente, comparadas con la parcela testigo donde las arvenses crecieron libremente en el suelo desnudo.

Similares resultados se presentaron en el año 2000 en Brasil, donde evaluando *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis* y *Mucuna deringiana*, en rotación con el cultivo de caña, registraron aportes significativos de nitrógeno al suelo (entre 50 y 100 kg/ha), por intermedio de la fijación simbiótica, para posterior aprovechamiento del cultivo de caña de azúcar (Resende, 2000). Del mismo modo, en Florida- EE.UU. se han registrado aportes entre 180-200 kgN/ha al suelo con siembras de *Crotalaria juncea* en intercalado y/o rotación con diversos sistemas de cultivo de cereales (Resende, 2000).

### **3.2.5.2. Abonos verdes como agentes retenedores de humedad.**

En la agricultura son muy usados los cultivos de cobertura o abonos verdes para la retención de agua, ya que capturan las gotas de lluvias o de riego por aspersion, y adicionalmente, por su alta densidad de siembra generan un microclima favorable que reduce la evaporación del agua, siendo esto favorable frente a eventos como las sequías y los fuertes vientos. De igual forma, el acolchado orgánico formado por la descomposición del AV, permite la imbibición del agua y reduce la evaporación, favoreciendo la infiltración del agua en el perfil del suelo, lo que beneficia la nutrición vegetal (Sanclemente y Prager, 2009; Sanclemente, 2013). El acolchado orgánico favorece adicionalmente la agregación de las partículas del suelo y mejora su estabilidad frente al factor hídrico, explicado por incremento en la porosidad.

### **3.2.5.3. Eliminación de agroquímicos en el levante de la caña de azúcar.**

En junio 13 de 2011 en un artículo del periódico de la Universidad Nacional de Colombia titulado: caña de azúcar destruye importante humedal de Palmira, el ingeniero ambiental Jorge Alexander Santacruz encontró que la labor que más afecta a este ecosistema, es el cultivo de caña de azúcar, ya que los agroquímicos que se aplican para el control de malezas llegan por infiltración a los acuíferos e impactan la calidad hídrica, causando efectos nocivos para el medio.

Advierte que, tanto la aplicación manual de agroquímicos como la aspersion aérea de pesticidas para combatir las plagas y acelerar los procesos de maduración de la caña han afectado a tortugas y aves típicas de la región, como la carau y la garza real, entre otros animales, al punto de provocar su muerte.

Pérez, Peña y Álvarez (2011), en su artículo Agro-industria cañera y uso del agua, afirman lo siguiente: La materia orgánica refractaria hace referencia a los compuestos orgánicos de difícil degradación biológica, que normalmente son los agroquímicos utilizados para el control de plagas y malezas (herbicidas, insecticidas, fungicidas). Nótese que los agroquímicos se aplican a los cultivos y una gran fracción de los mismos puede terminar depositada en los suelos. Por lo tanto, a través de la precipitación y la subsecuente escorrentía superficial agrícola, toda esta carga contaminante termina en los cauces de agua como contaminación de origen difuso. Es de aclarar que en el grupo de los agroquímicos también están incluidos los fertilizantes y algunos factores de crecimiento aplicados a los cultivos. Los primeros son importantes desde el punto de vista de los nutrientes N y P.

El uso indiscriminado de los agroquímicos en el cultivo de caña de azúcar ha causado un desajuste en el ecosistema, la relación plaga depredador se ha perdido sea a causa de la muerte de este segundo por el uso de plaguicidas de manera descontrolada o por la desaparición de las hiervas hospederas que son eliminadas en las aplicaciones drásticas de herbicidas, cada vez más el agricultor depende de estos productos de síntesis para la eliminación de plagas, enfermedades y malas hierbas.

De acuerdo con Gana y Busari (2001), en investigación realizada entre los años 1998 y 1999 en el sur de Guinea sabana ecológica de Nigeria, utilizando tres tipos de fuentes de fertilizantes para medir tres parámetros en caña: (vigor, altura o porte y rebrote) en los cuales las parcelas demostrativas se realizaron con tres testigos los cuales consistían en la aplicación de: compost 10 ton/ha, fertilizantes inorgánicos consistentes en NPK 120:60:90 kg/ha respectivamente y la incorporación de leguminosas caña+caupi, caña+soya, caña+sesbania estas incorporadas 6 semanas después de la siembra de los ensayos. El diseño experimental fue en bloques con tres repeticiones. Los resultados que arrojo esta investigación fueron los siguientes: las cañas tratadas con estiércol e inorgánicos mostraron mejoras en términos de vigor, altura y rebrote, al parecer a causa de la temprana inoculación de elementos como fosforo y nitrógeno por parte de la fuente inorgánica. Por la parte del compost se debe a la mejora en aireación y estructura del suelo aumentando de este modo el rendimiento del cultivo de caña. Por otra parte los bloques tratados con la incorporación de leguminosas el primer año tuvo un sostenimiento en los parámetro evaluados nos obstante el siguiente año en el 99 se vio un significativo aumento en la altura, el vigor y el rebrote aumento significativamente en este año.

En un informe más reciente publicado en el año 2012, en la Society for Sugar Research y Promotion (Sociedad para investigación y promoción de Azúcar), en el cual se dio a conocer una investigación llevada a cabo en la India., consistente en el reciclaje y transferencia de nutrientes de zonas no cultivadas, residuos de

cosechas y abonos animales, mostró como estos parcialmente pueden compensar las exportaciones de nutrientes minerales de los productos cosechados. Se hizo análisis profundo sobre los tiempos indicados para la aplicación de fertilizantes y cuáles fueron los requerimientos de estos para que la producción de caña sea auto sostenible, como también se profundizó sobre las nuevas alternativas o las que se habían dejado de lado como la aplicación de abonos orgánicos, las aplicaciones de biofertilizantes foliares y al incorporación de abonos verdes, en un enfoque INM mejora que mantiene la fertilidad del suelo y proporciona una base sólida para la producción de cultivos.

De otro lado, proporcionando alternativas a las necesidades cambiantes la FAO (2001), a través optimización de los beneficios de todas las fuentes posibles de nutrientes vegetales de una manera integrada prevé la explotación y el uso de todas las fuentes disponibles de nutrientes como el compost, estiércoles (FYM), tortas de aceite, cultivos residuos, desechos de animales, abonos verdes, abonos foliares verdes, subproductos industriales y la fijación biológica de nitrógeno, deben aplicarse en conjunto con materiales fertilizantes. Estos componentes poseen una gran diversidad en términos de química y propiedades físicas.

Gopalasundaram *et al.*, (2012) evaluando el uso equilibrado de una agricultura orgánica, inorgánica y de biofertilizantes, indican que el uso de materia orgánica es esencial para mejorar las condiciones física del suelo y generar un buen ambiente químico, como también servir de fuente de energía para la biomasa microbiana del suelo. En este sentido, la productividad del cultivo de caña de azúcar puede ser sostenida por la reposición de los nutrientes extraídos, a través del reciclaje adecuado de residuos de la fábrica, residuos de pos cosecha y junto con los biofertilizantes, estos abonos orgánicos dejan efectos residuales de mediano plazo.

El cultivo continuo de la caña de azúcar absorbe enormes cantidades de nutrientes de los suelos. En un suelo poco labrado en Australia, King *et al.* (1953) encontraron que los contenidos de N eran  $4,8 \text{ g kg}^{-1}$  que se redujeron a  $2,2 \text{ g kg}^{-1}$  después de 22 años del cultivo de la caña de azúcar. En contraste con esto Singh *et al.* (1996) concluyeron, que la siembra de abonos verdes o legumbres previas al cultivo de caña de azúcar, resultan útiles para el aumento de la productividad y que la aplicación de soluciones orgánicas o químicas solas para la problemática de fertilización resultaron infructuosas, adicionalmente que el éxito en la producción de caña de azúcar radica en “el uso integrado de agricultura orgánica y química”. Estos investigadores terminan indicando que el rendimiento de caña de azúcar se ha visto disminuido considerablemente en estos suelos en sistemas asociados con cereales e incluso en los manejados con barbecho, mientras que la inclusión de leguminosas como *Crotalaria juncea* L. y alfalfa en los sistemas de cultivo no sólo sostuvo el

rendimiento de la caña de azúcar, sino también mejora de la productividad de la caña de azúcar.

En general, en condiciones de campo de los agricultores, la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados aplicados es muy baja y, oscila entre 30 a 40%. Nkrumah *et al.* (1989) informaron de que las eficiencias de aplicación de N apenas superan el 40% en la caña de azúcar. Basado en estudios isotópicos, Vallis *et al.* (1996) informaron que la absorción de nitrógeno en los cultivos como fertilizante aplicado de manera subsuperficial en hileras estaba en el rango de 20-40%. Una respuesta para aumentar los índices de N disponible o para evitar las pérdidas por volatilidad de este elemento, sería la incorporación de abonos verdes.

En estudios realizados en la India, Misra (1971) reportó que los abonos verdes de leguminosos adicionan entre 41-71 kg N ha<sup>-1</sup>. Adicionalmente, este investigador indica que bajo igualdad de condiciones, el abono verde fue tan eficaz como los fertilizantes de síntesis química y la interacción con compost incrementó significativamente la producción de caña. La respuesta observada fue de 2.43, 2.25 y 0.97 q de caña por kg de N adicional, para el caso de los abonos verdes, fertilizantes químicos y compost, respectivamente. El uso integrado de cultivos de abonos verdes con fertilizantes minerales aumentó la eficiencia del nitrógeno y redujeron el requisito de este elemento en el cultivo de la caña de azúcar hasta por 41 a 85 kg ha<sup>-1</sup>.

De otro lado, estudios realizados en la India por Gangwar y Sharma (1997), reportan que el mayor rendimiento en caña de azúcar se obtiene con la gestión integrada de nutrientes, práctica que consiste en adicionar al suelo una mezcla de fertilizantes (160 kg N, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 60 kg K<sub>2</sub>O ha), compost (10 t ha<sup>-1</sup>) y el abono verde proveniente de frijol Caupi (6 t ha<sup>-1</sup>). Los investigadores resaltan que la gestión integrada de nutrientes es una gran alternativa para satisfacer las crecientes demandas de nutrientes de la caña de azúcar, la agricultura intensiva y el sostenimiento de la productividad en mayores niveles con la mejora general en la calidad de los recursos base. En este sentido estas alternativas mejoran la fertilidad del suelo y proporcionan una base sólida para los sistemas de producción de cultivos, con miras de satisfacer las condiciones como el cambio climático.

Para agregar, en los cultivos intercalados aumentó significativamente el rendimiento de la caña soca y mejoró el contenido de carbono orgánico del suelo. El cultivo de leguminosas asociadas con la caña de azúcar también impidió la lixiviación de nitrato-N, debido a la ramificación de las raíces que conducen a la utilización de nitrógeno superior. Singh *et al.*, (1996) han informado que el cultivo intercalado de leguminosas como abono verde, junto con o sin la aplicación de nitrógeno ha tenido un efecto benéfico sobre el rendimiento final del cultivo de caña de azúcar y su

rebrote después del corte. De esta manera este tipo de tecnología verde ha mostrado potencial para efectuar estudios de economía en la aplicación de fertilizantes nitrogenados.

Yadav y Verma (1995), indican que los residuos vegetales son fuente útil de nutrientes vegetales y contiene 0,42% de N, P 0,15% y 0.57% K, además de 26, 2045, 236 y 17 ppm de Zn, Fe, Mn y Cu, respectivamente. En muchos lugares, los agricultores prefieren quemar la basura antes de la cosecha por conveniencia e incluso después de la cosecha debido a la manipulación dificultosa y también ya que su descomposición no es tan fácil como la de otros cultivos residuos. Durante la quema de basura de la caña de azúcar, grandes cantidades de C, N y S, presente en los residuos vegetales se pierden a través de la volatilización.

## **4. Materiales y métodos.**

### **4.1. Localización y estado inicial del suelo.**

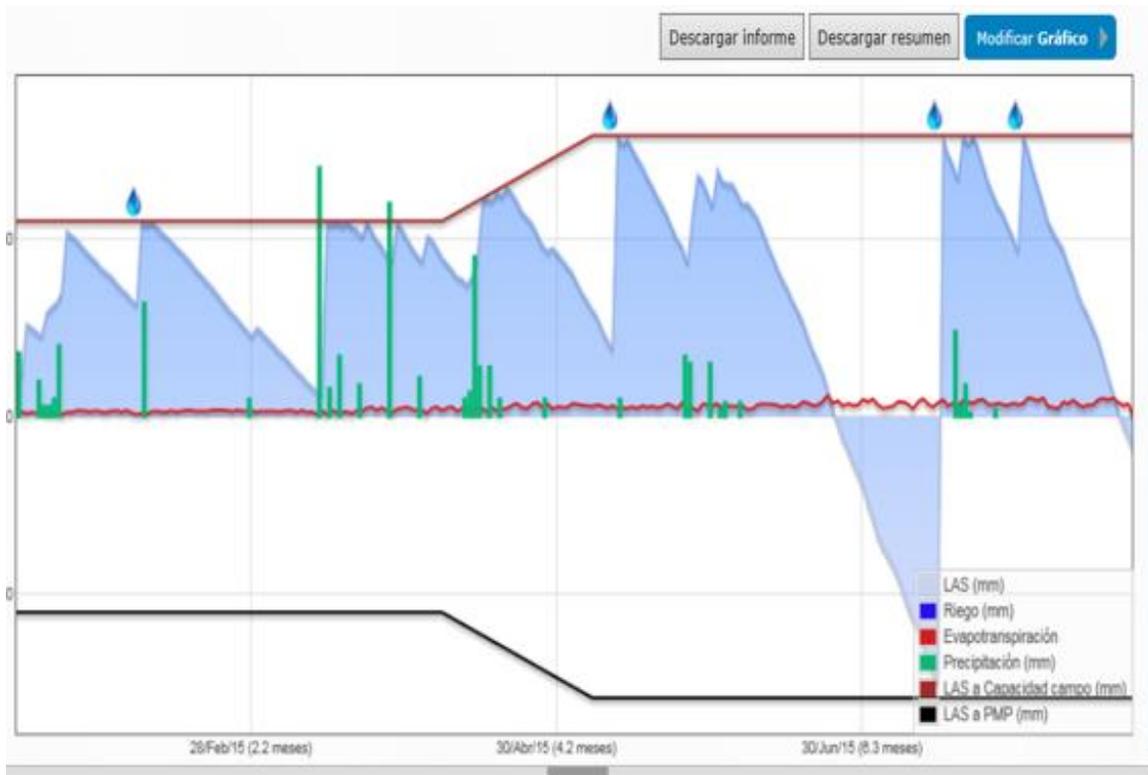
El ensayo se realizó en campo durante los semestres 2015 I y 2015 II, en la suerte 617 de la Finca Lucernita, perteneciente a la Hacienda La Floresta, ubicada en jurisdicción del corregimiento El Overo- municipio de Bugalagrande (Valle del Cauca), a 931 m.s.n.m., 4° 14´ latitud N y 76° 09´ longitud O. El suelo clasificado como (CT) Corintias (Cenicaña), presenta textura franca y sin problemas de encharcamientos, ha estado desde el año 2006 sembrado con la variedad de caña CC.85-92, y presenta 6 cortes al 2014. Los análisis de suelo previos al ensayo, serán suministrados por la gerencia administrativa de la Hacienda La Floresta.

#### **4.1.1. Lámina de agua en el sistema.**

La entrada de agua al sistema se evaluó mediante metodología descrita por el IDEAM (2011), a través de la ponderación de registros de intensidad de lluvia (2 pluviómetros ubicados en lote experimental) y, la cantidad de agua por riegos aplicados (entre febrero- abril y, junio- julio de 2015). El lote se irrigó por gravedad, con agua superficial del río Bugalagrande. La cantidad de agua aplicada, fue monitoreada por el Software de balance hídrico de Cenicaña, procurando tener el suelo siempre a capacidad de campo. En la Figura 2, se muestra la información del balance hídrico del cultivo, desglosando los valores de precipitaciones, riegos aplicados y pérdidas por evapotranspiración.

### **4.2. Establecimiento del ensayo en campo.**

Para el establecimiento del ensayo en campo, se preparó el suelo mediante mecanización agrícola. Para ello, se realizó el primer roturado con subsolador de cinco brazos a 25 cm de profundidad, aproximadamente. Posteriormente, se hizo la segunda roturación con subsolador Minitamdem a 45 cm de profundidad y, por último, se realizaron dos pases con discos de arado con la finalidad de acomodar la cama de semilla, antes de la siembra.



**Figura 2.** Descripción gráfica del balance hídrico del cultivo, entre los meses de febrero y julio de 2015. **Fuente:** Hacienda Lucernita (2015).

#### 4.2.1. Diseño experimental.

Se usó un diseño experimental en bloques completos al azar (BCAA) y cinco repeticiones, a los cuáles se les asignaron los siguientes tratamientos:

(T1)- (ST) Control (monocultivo de caña de azúcar, sin ninguna fuente de fertilización).

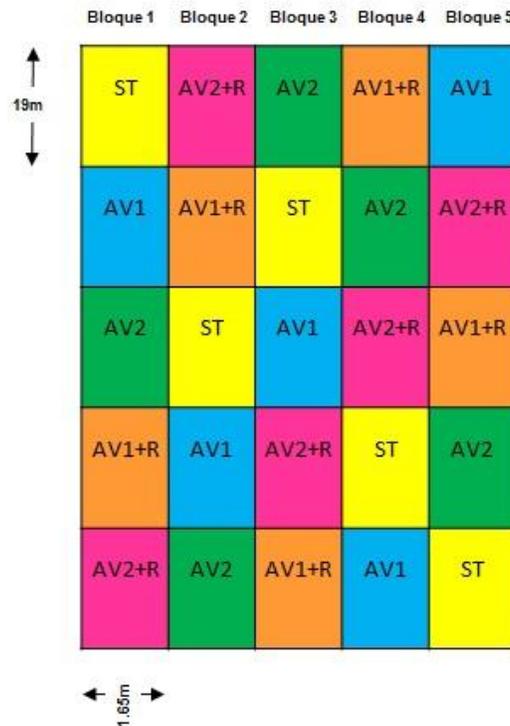
(T2)- (AV1) Frijol Caupi intercalado en surcos 1X1 con caña de azúcar

(T3)- (AV2) Frijol Caupi intercalado en surcos 2X1 con caña de azúcar.

(T4)- (AV1+R) Frijol Caupi inoculado con cepa de *Rhizobium* sp., e intercalado en surcos 1x1 con caña de azúcar.

(T5)- (AV2+R) Frijol Caupi inoculado con cepa de *Rhizobium* sp., e intercalado en surcos 2x1 con caña de azúcar.

La siembra se realizó en 10 calles de 95 X 1.65 m, dejando una calle libre para facilitar la movilidad por las parcelas. El tamaño de cada parcela fue de 19 m de longitud y 1.65 m de ancho, para un total de 25 parcelas con área experimental de 783,75 m<sup>2</sup>. La distribución de los tratamientos en las parcelas se hizo al azar, como se ilustra en la Figura 3.



**Figura 3.** Distribución de los tratamientos experimentales en cada uno de los bloques en campo.  
**Fuente:** El autor (2015).

#### 4.2.2. Aplicación del inóculo y labores de siembra.

Para la siembra, se utilizaron 18 kg de frijol Caupi (*Vigna unguiculata*), de los cuales 9 se inhibieron durante 15 minutos en una solución preparada con 10 l de agua y 100cm<sup>3</sup> del producto Rhizobacter (*Rhizobium* sp.) como se ilustra en la Figura 4. Posteriormente, las semillas inhibidas se dejaron secar a la sombra durante 2 horas para garantizar la inoculación de la cepa. Tanto las semillas inoculadas como sin inocular, se trasladaron a campo para ser sembradas mediante sembradora de cadena de 4 tarros, que aportó entre 25 y 28 granos de semilla por metro lineal, como lo ilustra la Figura 5.



**Figura 4.** Incolulación de las semillas de Frijol caupí. A) Producto *Rhizobacter* sp. suministrado por le empresa Hongos de Colombia Fungicol S.A.S. B) Semilla imbibida con inóculo. **Fotografía:** El Autor (2015).



**Figura 5.** Siembra del Frijol Caupí. A) Sembradora de cadena con 4 tarros. A) semilla depositada en uno de los tarros, a punto de ser sembrada. **Fotografía:** El Autor (2015).

#### 4.2.3. Riego y segunda aplicación de Rhizobium.

A inicios del primer semestre del 2015 I, se presentó un largo periodo seco que hizo necesaria la aplicación de riego de germinación en las parcelas de la investigación. Para ello, se usó una motobomba John Deere de 80 Hp, con 3 cañones que abarcaron las 0.15 hectáreas del experimento. La duración de cada riego fue de 2 horas aproximadamente, dando como resultado una lámina de 30 mm, ideal para la

germinación del frijol. Después de 13 días de la siembra, se preparó solución de 300 cm<sup>3</sup> de *Rhizobacter* en 30 litros de agua, aplicándose mediante bomba de aspersión en las 10 parcelas correspondientes a los tratamientos AV1+R y AV2+R, con el fin de reforzar la dosis de inoculante en las plántulas. La Figura 6, ilustra las actividades de riego por aspersión y reinoculación de cepa de *Rhizobium* sp., en el intercultivo.



**Figura 6.** Riego y reinoculación de cepa de *Rhizobium* sp., posterior a la siembra. A) aplicación de riego de germinación por aspersión. B) Desarrollo del intercultivo, 13 días después de la siembra en las parcelas experimentales. C) Aplicación de *Rhizobium* en la parcelas tratadas, 13 días después de la siembra del frijol Caupí. D) Aplicación de del inóculo por metro lineal. **Fotografías:** El Autor (2015).

#### 4.3. Evaluación del aporte de biomasa de frijol Caupí.

Luego de 48 días después de la siembra, se recolectaron muestras del material vegetativo de Frijol Caupí, usando cuadrante de 0.5 X 0.5 m, según metodología descrita por López *et al.*, (2011). El cuadrante se lanzó al azar dentro de las parcelas experimentales, cortando los tallos, ramas y hojas, que quedaron dentro,

almacenando las muestras en bolsas plásticas. Se tomaron tres submuestras por parcela. Las muestras recolectadas, se secaron al aire durante 10 días, con el fin de eliminar la humedad y evaluar su materia seca, mediante balanza digital. Finalmente, se hizo extrapolación de la materia seca de Frijol Caupí por hectárea. La Figura 7, ilustra la toma de muestras de material vegetal de Caupí, mediante uso de cuadrante.



**Figura 7.** Toma de muestras de biomasa de caupí. A) Ubicación del marco aforador para tomar muestras de biomasa. B) Corte de Caupí a ras de piso después de la ubicación dentro del cuadrante.  
**Fotografías:** El Autor (2015).

#### 4.4. Evaluación de la población de caña de azúcar

Para evaluar la población de talos de caña de azúcar en las parcelas experimentales, se tomaron tramos de un metro lineal de manera aleatoria, los cuáles se marcaron para seguir siendo monitoreados a lo largo de la investigación. En estos tramos se contabilizaron los tallos constituyentes de área ocupada con caña de azúcar, con el objetivo de evaluar los efectos del Frijol Caupí como Abono verde (AV), en el experimento. Estas mediciones se hicieron en dos fechas: abril 13 y julio 15 de 2015.

#### 4.5. Evaluación de altura de tallos de caña de azúcar

La evaluación de la altura de tallos de caña, se llevó a cabo en julio de 2015 a siete (7) meses de iniciado el ensayo (Figura 8). Para ello, se tomaron cinco (5) plantas

al azar dentro de las parcelas a las que se les midió la longitud desde el suelo hasta el entrenudo donde inicia la sección foliar de la planta. Los datos se promediaron por parcela, teniendo así una estimación de la altura como efecto de los tratamientos.



**Figura 8.** Evaluación de altura de tallos de caña de azúcar. A) selección de plantas al azar. B) Medición. **Fotografías:** El Autor (2015).

#### 4.6. Evaluación del área foliar de caña de azúcar

El área foliar de la caña de azúcar es una variable importante que dá cuenta de su desarrollo fisiológico y crecimiento, sirve de referencia para estimar requerimientos hídricos y eficiencia bioenergética, así como daños producidos por patógenos y/o plagas. Su estrecha relación con la capacidad fotosintética de la caña de azúcar, da cuenta de cómo se desarrollan otras características como producción de biomasa y productividad de azúcares (De Oliveira *et al.*, 2007).

Para estimar esta variable, se seleccionaron las mismas plantas a las que se les evaluó la altura, y se les midió el largo y ancho de sus hojas, mediante flexómetro (Figura 9). Se tomó el promedio de largo y ancho y, se multiplicó este por el factor 0.75 (citado), recomendado para gramíneas.



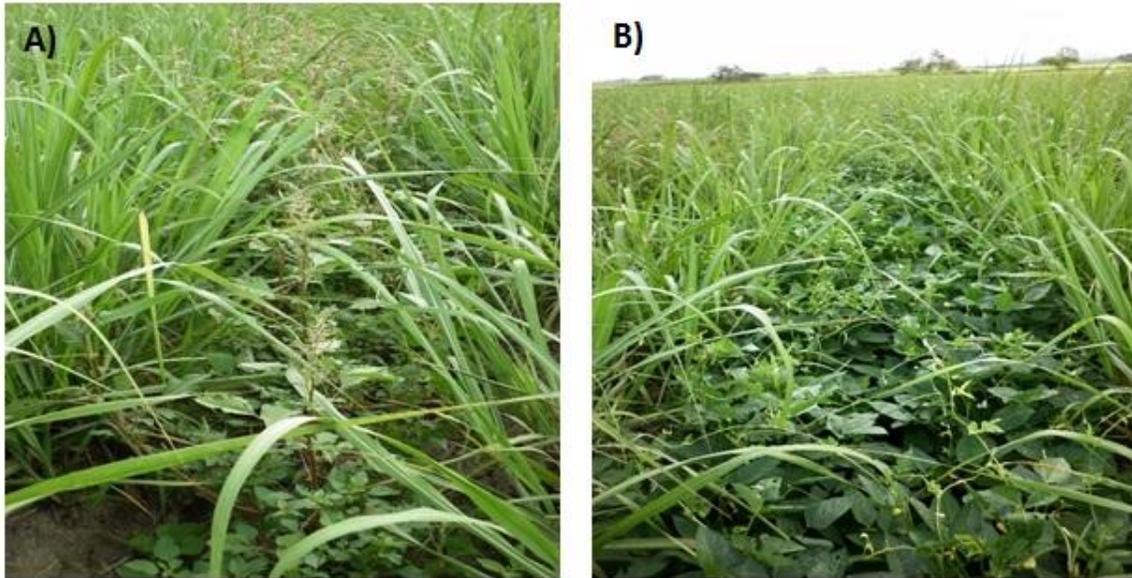
**Figura 9.** Evaluación del área foliar de caña azúcar en campo. A) Medición de ancho foliar. B) Medición de longitud foliar.

**Fotografía:** El Autor (2015).

#### 4.7. Estimación de la población de arvenses.

Uno de los problemas que afecta notablemente el desarrollo de la caña azúcar durante los primeros meses, son las arvenses acompañantes. Estas plantas compiten con el cultivo por agua, luz y nutrientes minerales, su crecimiento de la caña de azúcar, incluso llegan a generar interferencia radical por la secreción de exudados radicales y lixiviados foliares alelopáticos (Díaz y Labrada, 2010). El programa de control de malezas debe tomar en consideración las malezas predominantes. En áreas sembradas con caña de azúcar, predominan arvenses de las especies *Rottboellia cochinchinensis*, *Sorghum halepense*, *Cynodon dactylon* y *Cyperus* sp., a las que se les hace un manejo con herbicidas pre y post emergentes (Díaz y Labrada, 2010).

Para estimar la cantidad de arvenses en las parcelas experimentales, se usó la metodología del cuadrante de 0.5 X 0.5 m (López *et al.*, 2011), de manera similar a la evaluación de biomasa de Frijol Caupí. Del mismo modo, se dejó secar al aire la biomasa de la diversidad de arvenses presentes en el cuadrante y se evaluó la materia seca, 10 días después, mediante uso de balanza digital. La Figura 10, ilustra la presencia de arvenses en el intercultivo caña de azúcar- Caupí.



**Figura 10.** Arvenses presentes en el ensayo. A) Surco de caña de azúcar del tratamiento ST, invadido por bleo *Amaranthus* spp. B) Surco manejado con Caupi *Vigna unguiculata*, como cobertura viva. **Fotografía:** El Autor (2015).

#### 4.8. Evaluación de humedad del suelo

La humedad del suelo se evaluó por gravimetría, tomando los pesos de las muestras de suelo de 0- 10 cm en húmedo y seco, luego de 24 horas en estufa a 105°C. El porcentaje de humedad, se obtuvo como la relación entre la masa de agua y el peso del suelo seco, por cien (100), como lo describe Jaramillo (2002).

#### 4.9. Estimación del efecto de los tratamientos, sobre el contenido de nitratos del suelo

Para estimar el efecto de los tratamientos sobre el contenido de nitratos (N-NO<sub>3</sub>), se tomaron muestras de suelo de 0-10 cm de profundidad, antes de la siembra y después de la incorporación de la biomasa de Caupí como AV, en cada parcela experimental, como lo muestra la Figura 11. Las muestras conservadas en frío, se transportaron al laboratorio de Servicios Analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT, en el municipio de Palmira, donde se les determinó el contenido de humedad y de N-NO<sub>3</sub> en base húmeda. De acuerdo con la metodología estandarizada del Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT, el contenido de N-NO<sub>3</sub> se estimó mediante reducción a NO<sub>2</sub> usando como agente reductor un compuesto de Cu y Cd, posteriormente se adicionó indicador

colorimétrico (a-naphthylethylenediamina dihydrochloride y sulfanilamida), generando coloración rojo púrpura, para finalmente hacer lectura espectrofotométrica a longitud de onda de 543 nm (Margesin & Schinner, 2005).

Para comparar los resultados entre parcelas, se corrigió la humedad de las muestras, expresando los contenidos de N-NO<sub>3</sub> en base seca. Finalmente, se calculó la diferencia entre los contenidos de N-NO<sub>3</sub> en cada parcela antes de siembra y después de incorporar el Caupí como AV.



**Figura 11.** Muestreo de suelos. A) Toma de muestra de 0-10 cm con uso de palín, antes de siembra. B) Etiquetado y almacenamiento en frío de muestras. **Fotografías:** El Autor (2015).

#### 4.10. Análisis estadístico de los datos

El análisis de los resultados de las variables evaluadas, se realizó mediante estadística univariada para Análisis de Varianza ANDEVA y comparación de medias de TUKEY ( $p < 0.05$ ). Los datos se presentaron en tablas, figuras de histogramas y, cajas y alambres, ésta última describió en cada registro los valores máximos y mínimos, la media, la mediana y los percentiles 25 y 75% en cada variable de respuesta. Para facilitar los análisis, se usó el paquete estadístico SAS versión 9.2 (2008).

## 5. Resultados y discusión.

### 5.1. Análisis físico y químico del suelo

El análisis de suelo practicado en la hacienda La Floresta (suerte 617) durante enero de 2015 antes de la siembra del caupi, indicó que de 0-20 cm el suelo presenta textura arcillosa y contenido de materia orgánica bajo (1.72%), siendo pesados para ellaboreo, como lo muestra su densidad aparente (1.4 g/cm<sup>3</sup>) alta (Tabla 1). El pH neutro (7,41) es óptimo para el desarrollo de leguminosas y la caña de azúcar. Las concentraciones de N fueron intermedios (0.08%), fósforo con valores bajos (8.3 ppm), al igual que el potasio (0.3 meq/100g), indicando déficit de nutrientes mayoritarios. Los elementos secundarios para la producción de caña: Ca (20.6 meq/100g) alto, Mg (6.2 meq/100g) bajo, relación Ca/Mg >3 indicando déficit de Mg y S (10.2 meq/100g) con niveles intermedios. En contraste, los elementos menores (B, Mn, Fe, Cu y Zn), todos presentaron contenidos medios, que garantizan su aporte a los cultivos.

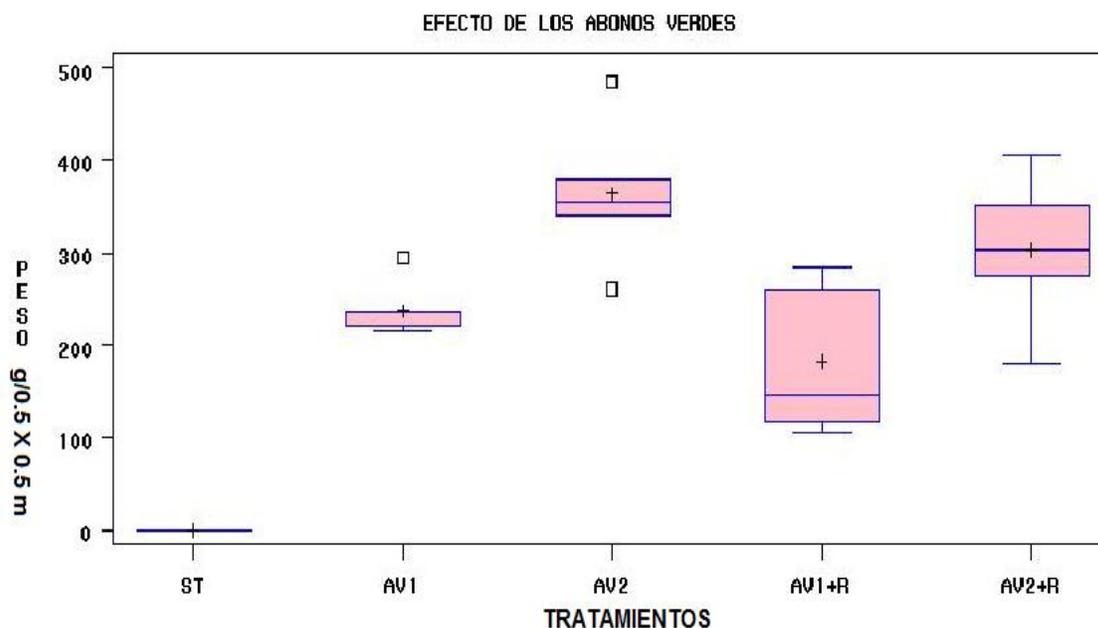
**Tabla 1.** Análisis de suelo (suerte 614) en la hacienda La Floresta, tomado en enero 2015 de 0-20 cm de profundidad.

PROPIEDADES QUIMICAS			PROPIEDADES FISICAS		
parámetro	unidad	valor	parámetro	unidad	valor
pH (1.1)	%	7,41	clase textural		Arcillosa
M.O.	%	1,72	densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	1.4
N- total	%	0,08			
P (Olsen)	ppm	8,3			
K	meq (100g)	0,3			
Ca	meq (100g)	20,6			
Mg	meq (100g)	6,2			
S	ppm	10,2			
B	ppm	0,41			
Mn	ppm	9			
Fe	ppm	32			
Cu	ppm	2,8			
Zn	ppm	3,6			

**Fuente:** Archivos de producciones agricolas CAVI, libro de analisis de suelos hacienda La Floresta (2015).

## 5.2. Aporte de biomasa de frijol Caupí al suelo

Una de las variables importantes de evaluar a la hora de emplear abonos verdes en sistemas de cultivo, es su aporte de biomasa al suelo. En leguminosas como el frijol Caupí, este aporte puede llegar a ser hasta de 15 t.ha<sup>-1</sup>, adicionando al suelo considerable cantidad de carbono humificable y nutrientes como N, P, K, Ca y, otros (Duarte *et al.*, 1995). El análisis de varianza para aporte de biomasa en el ensayo, registró diferencias entre tratamientos (Anexo1). De acuerdo con la prueba de Duncan (Anexo 2), éstas diferencias fueron marcadas ( $p < 0.05$ ) en el tratamiento AV2 que logró el mayor aporte con 364.4 g en 0.25 m<sup>2</sup> (Figura 12).



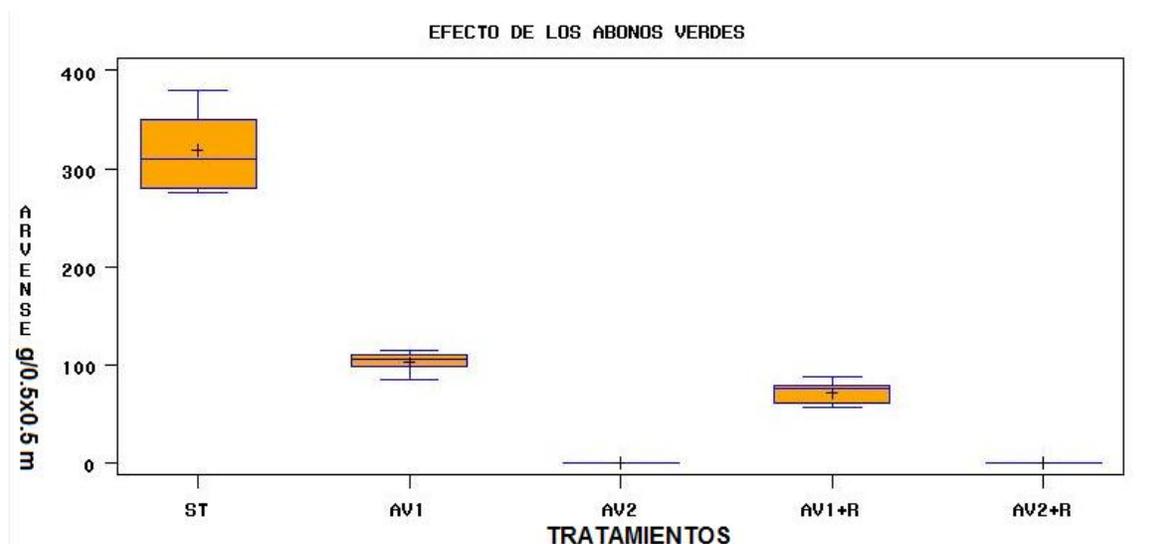
**Figura 12.** Diagrama de cajas y alambres para la variable peso seco (g/0.25 m<sup>2</sup>) de biomasa de Frijol caupí, por cada tratamiento evaluado. **Fuente:** El autor (2015).

Adicionalmente, se observó que el uso de la cepa de *Rhizobium* sp., tanto en AV1+R y AV2+R no incidió positivamente sobre incremento en la variable biomasa en caupí. De acuerdo con lo propuesto por Obando (2012), la simbiosis efectiva rizobio- frijol Caupí, depende de la afinidad genética entre la especie y la planta, encontrándose dentro del mismo género *Rhizobium* sp., gran diversidad de especies. Resultados de otras investigaciones indican, que incrementos en poblaciones de *Rhizobium sllae* y *Rhizobium etli* en suelos con bajos contenidos de materia orgánica como el caso de estudio, generan inmovilización y desnitrificación microbiana, sin llegar a realizar simbiosis efectiva con leguminosas (Delgado, Casella & Bedmar, 2007).

Por su parte, la densidad de siembra de caupí, incidió sobre su producción de biomasa logrando incrementos de hasta 53% en esta variable cuando se duplicó el número de surcos (AV2), indicando mayor beneficio en el aporte de materia orgánica al suelo. De acuerdo con el ensayo, este aporte en el AV2 fue de 14.5 t.ha<sup>-1</sup> siendo importante su adición de N orgánico y otros nutrientes al suelo, para posterior mineralización y disponibilidad en caña de azúcar.

### 5.3. Incidencia de los tratamientos sobre la población de arvenses en el sistema de cultivo

La presencia de arvenses en el cultivo de caña de azúcar, genera interferencia por luz y nutrientes al cultivo, afectando su desarrollo. De aquí que las labores de cultivo incluyan el uso de herbicidas, que generan efectos nocivos en el suelo y contaminan los recursos hídricos. En el ensayo, se registraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos, para la variable de respuesta biomasa de arvenses asociadas (Anexo 3). De acuerdo con la prueba de Duncan ( $p < 0.05$ ) (Anexo 4), el tratamiento ST donde no se sembró Caupí, obtuvo la mayor biomasa de arvenses con 319.0 g en 0.25 m<sup>2</sup> (Figura 13).



**Figura 13.** Diagrama de cajas y alambres para la variable peso seco (g/0.25 m<sup>2</sup>) de arvenses asociadas al sistema de cultivo, por cada tratamiento evaluado. **Fuente:** El autor (2015).

Por su parte, la siembra de Caupí en surcos 2x1 en AV2 y AV2+R no permitió la germinación de arvenses, por su rápida cobertura del suelo. Caso contrario, sucedió con la siembra de Caupí en surcos 1x1 en AV1 y AV1+R, que dejaron una franja de

suelo descubierta, lo que posibilitó la germinación y desarrollo de arvenses en el suelo, como factor no deseable para el cultivo de caña de azúcar.

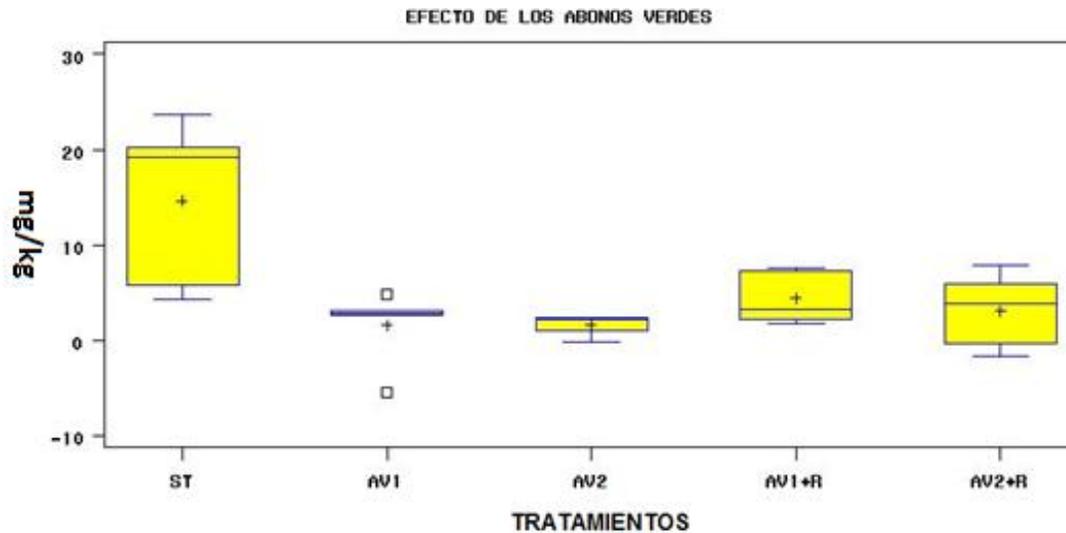
Los muestreos de arvenses en las parcelas, coincidieron con el estado fenológico de floración en frijol Caupí, indicando adicionalmente al factor físico de interferencia por luz, la mayor absorción de nutrientes por parte de la leguminosa, reduciendo su disponibilidad para las plantas acompañantes.

Berlinger, Yuncosa & Pérez (2008), evaluando el efecto de cinco leguminosas para el control del arvenses en Venezuela, registraron alta supresión de arvenses de hoja angosta por parte del frijol Caupí *Vigna unguiculata* L., explicado por la sombra del Caupí dada la exigencia por luz de las gramíneas acompañantes. Lo anterior, concuerda con los registros históricos de la Hacienda La Floresta donde se realizó el ensayo, que indican la presencia de gran variedad de arvenses como: *Cyperus rotundus*, *Cyperus ferax*, *Rottboelia exaltata*, *Sorghum halepense*, entre otras gramíneas, que acompañan el cultivo de caña de azúcar. Por su parte, Gómez (1995), reporta alta persistencia de estas y otras especies de gramíneas en suelos cultivados con caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca.

#### **5.4. Estimación del efecto de los tratamientos, sobre el contenido de nitratos del suelo.**

Uno de los nutrientes más importantes para la caña de azúcar, es el nitrógeno. En términos fisiológicos, la caña de azúcar absorbe el nitrógeno de la solución del suelo como  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ , siendo importantes estos nutrientes dentro de los procesos fotosintéticos, la formación de aminoácidos, ácidos nucleicos y proteínas. En el ensayo, el análisis de varianza ( $p < 0.05$ ) (anexo 5), marcó diferencia significativa entre los tratamientos empleados para la variable diferencia de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) antes y después del ensayo. De acuerdo con la prueba de Duncan ( $p < 0.05$ ) (Anexo 5), el tratamiento testigo (ST) obtuvo valores significativamente altos en esta diferencia de nitratos del suelo, con respecto a los demás tratamientos (Figura 14).

A nivel de los tratamientos con AV, la diferencia entre los contenidos de nitratos antes y después de la siembra fue similar, indicando aporte moderado del nitrógeno orgánico por parte de su biomasa al suelo, que posteriormente sufre procesos de mineralización por acción microbiana (Sanclemente, 2013).



**Figura 14.** Diagrama de cajas y alambres para la variable contenido de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en mg/kg suelo seco, variable tomada como la diferencia entre el después y antes de la siembra de frijol Caupí (*Vigna unguiculata* L.). **Fuente:** El autor (2015).

En el tratamiento testigo (ST), el alto contenido de nitratos aparentemente no es un buen indicador, ya que de acuerdo con las poblaciones de arvenses encontradas, en su mayoría gramíneas, el aporte nitrogenado por esta biomasa es muy bajo (alta relación C/N), por lo que estaría sucediendo un proceso de mineralización del N orgánico presente en la MOS, siendo esto negativo en términos de la sustentabilidad del sistema.

De acuerdo con Obando (2012), el frijol caupí puede almacenar cerca de 2.1% de N en materia seca. Lo anterior, explica en parte los resultados anteriores ya que el N en los tratamientos con abono verde se puede encontrar inicialmente almacenado en su biomasa vegetal, para ser posteriormente incorporado al suelo y aportar de manera gradual este nutriente al sistema. Para el caso del tratamiento AV2, el aporte de N orgánico vía incorporación de la biomasa de caupí, llegaría a ser de cerca de 304 kgN/ha, siendo este valor bastante importante en términos de nutrición vegetal de la caña de azúcar, como cultivo de interés comercial en el sistema.

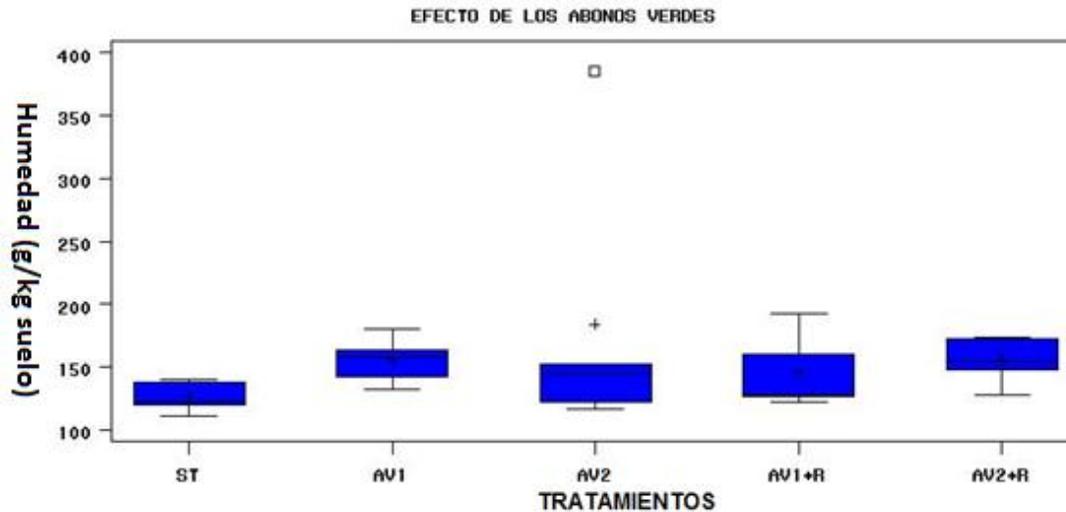
En el ensayo, se pudo observar que la inoculación de cepas comerciales de *Rhizobium* sp. No tuvo efecto significativo sobre la dinámica de nitratos del suelo. Esto posiblemente se debió a la poca afinidad entre la cepa y el frijol Caupí, como se describió anteriormente, factor que impidió mayor aporte de N al suelo vía residuos vegetales. En estudios realizados en Cuba, se han obtenido muy buenos resultados con la inoculación de cepas específicas de *Rhizobium* sp. En leguminosas, lográndose suplir las necesidades de nitrógeno en cultivos de interés

entre 80 y 100%. El uso de estas cepas se han empleado en frijol común (*Phaseolus vulgaris*), Vigna (*Vigna sp.*) y maní (*Arachis hypogaea*) con ahorros significativos de fertilizante sintético nitrogenado (Treto *et al.*, 2005). Históricamente, en Cuba (entre 1907 y 1917) se desarrollaron estudios en la Estación Experimental Agronómica de Santiago de la Vegas, sobre efectos de abonos verdes, recomendando un grupo de especies con alta capacidad de adaptación: canavalia (*Canavalia ensiformis*), frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*), crotalaria (*Crotalaria sp.*), Caupí (*Vigna unguiculata* L.), guandul (*Cajanus cajan*), soya, entre otras, que aportan considerables cantidades de N al sistema agrícola, por medio de la fijación biológica y reciclan cantidades apreciables de fósforo y potasio (Peña *et al.*, 1988).

### 5.5. Lámina de agua en el sistema.

Una de las variables más importantes a estudiar en el uso de abonos verdes como el Caupí (*Vigna unguiculata* L.), es su efecto como agente retenedor de humedad del suelo, en este caso cultivado en intercalado con caña de azúcar. Lo anterior, teniendo en cuenta que el cultivo de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca presenta exigencias hídricas en lámina de agua que oscilan entre 1200 y 1500 mm/año (Cenicaña, 1995). Las altas temperaturas en el departamento y bajas precipitaciones, incrementan la evapotranspiración en los sistemas de cultivo como la caña de azúcar, siendo necesaria la aplicación continua de riegos.

En el ensayo, el análisis de varianza ( $p < 0.05$ ) no marcó diferencias significativas entre tratamientos (Anexo 7). Lo anterior indica que tanto los abonos verdes usados y como tratamiento testigo se comportaron de manera similar para la variable retención de humedad. A pesar de esto, la Figura (15) muestra que existieron unos valores extremos de humedad en el AV2 en algunas parcelas dentro de los bloques, saliéndose del promedio de humedad gravimétrica para este tratamiento (184 g/kg). En términos de ahorro de agua, y teniendo como referente el tratamiento ST (suelo desnudo), el AV2 incrementaría el contenido de humedad del suelo en cerca de 45.8%, siendo este valor importante a la hora de establecer parámetro de eco-eficiencia del recurso hídrico. Esto, teniendo en cuenta que para la densidad aparente del suelo ( $1400 \text{ kg/m}^3$ ) y una profundidad de 0.2 m, la diferencia entre la lámina de agua del suelo entre AV2 y ST sería cercana a 17.3 mm ( $173 \text{ m}^3/\text{ha}$ ).



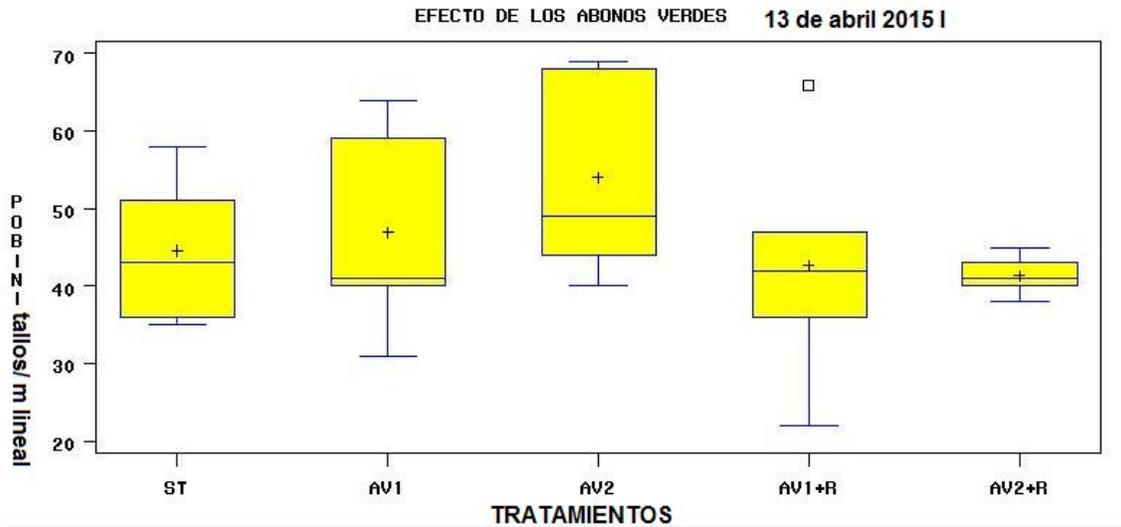
**Figura 15.** Diagrama de cajas y alambres para la variable de humedad (g/kg de suelo), por cada tratamiento evaluado. **Fuente:** El autor (2015).

## 5.6. Evaluación de la población de caña de azúcar.

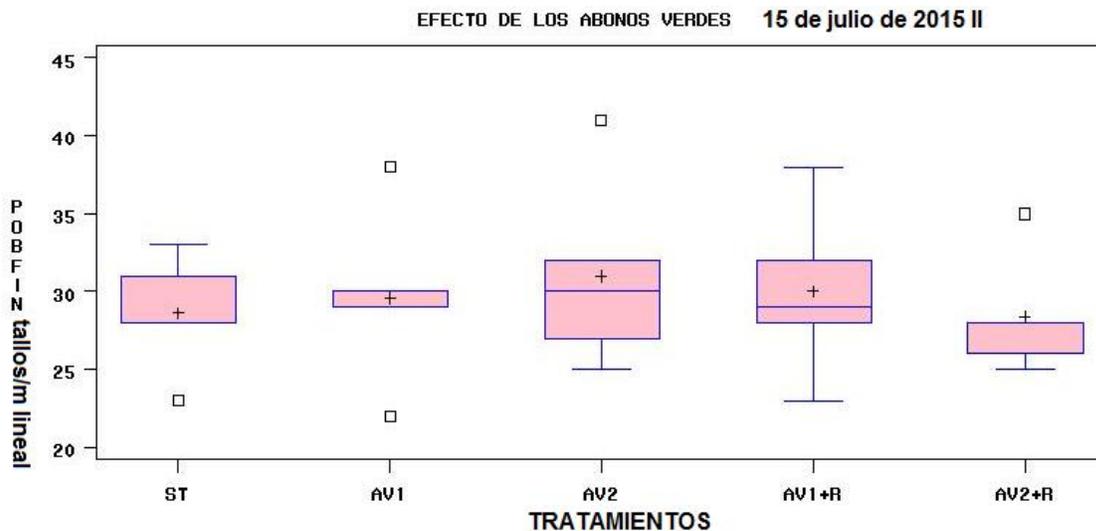
La presente investigación generó interrogantes sobre la incidencia del frijol Caupí sobre el crecimiento de tallos y la población de caña de azúcar. Para el caso de la población, se realizaron dos muestreos en diferentes épocas fenológicas del cultivo: la primera el abril 13 de 2015 (recién incorporado el Caupí al suelo) y caña con edad de 4 meses como se muestra en la Figura 16 y, la segunda el 15 de julio de 2015 cuando la caña se encontraba en desarrollo vegetativo, con edad de 7.5 meses (Figura 17).

En el primer muestreo, el análisis de varianza (Anexo 8), no arrojó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos para la variable población de tallos de caña por metro lineal. Sin embargo, se observaron altos valores en AV2 con 55 tallos/m lineal, siendo este valor superior al AV2+R en 34% que obtuvo 41 tallos/m lineal.

Durante el segundo muestreo el ANDEVA (Anexo 9), tampoco registró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos, mostrando mayor paridad de la variable entre las parcelas. A pesar de que tanto el aporte de biomasa de Caupí al suelo, las poblaciones de arvenses y los contenidos de nitratos, difirieron entre los tratamientos, no se registraron efectos notorios de estas variables sobre fisiología del cultivo de caña de azúcar.



**Figura 16.** Diagrama de cajas y alambres para la variable poblacion inicial (# tallos/m lineal), por cada tratamiento evaluado, durante el primer muestreo (13 de abril de 2015). **Fuente:** El autor (2015).



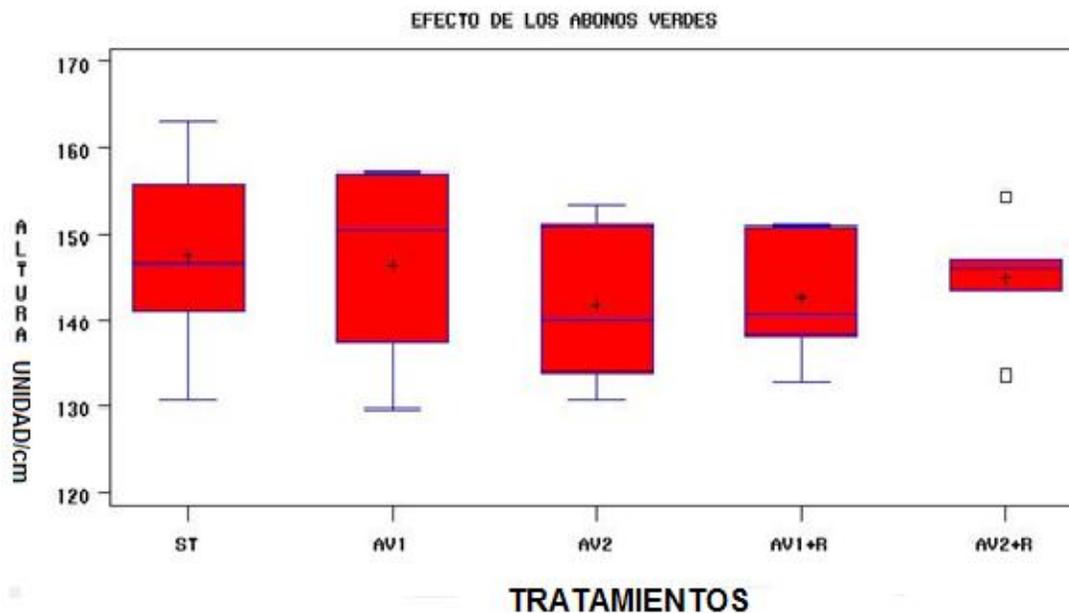
**Figura 17.** Diagrama de cajas y alambres para la variable poblacion inicial (# tallos/m lineal), por cada tratamiento evaluado, durante el primer muestreo (15 de julio de 2015). **Fuente:** El autor (2015).

Estos resultados contrastan con los obtenidos por otros investigadores que registran que el uso de leguminosas en asocio o intercalado con la caña de azucar, generan un efecto benéfico sobre el primer rebrote después del corte, como también potencial en la economía de fertilizantes nitrogenados (Singh y Yadav, 1996). Por su parte, Singh *et al.*, (1996) en otros estudios con uso de AV, sostienen que el

cultivo de caña de azúcar intercalado con *Sesbania aculeata*, no aumentó la talla de los bastones de caña de azúcar, en contraste, incrementó el rebrote de la caña entre 9 y 10% a través de un mayor número y longitud de los tallos molinables.

### 5.7. Evaluación de altura de tallos de caña de azúcar.

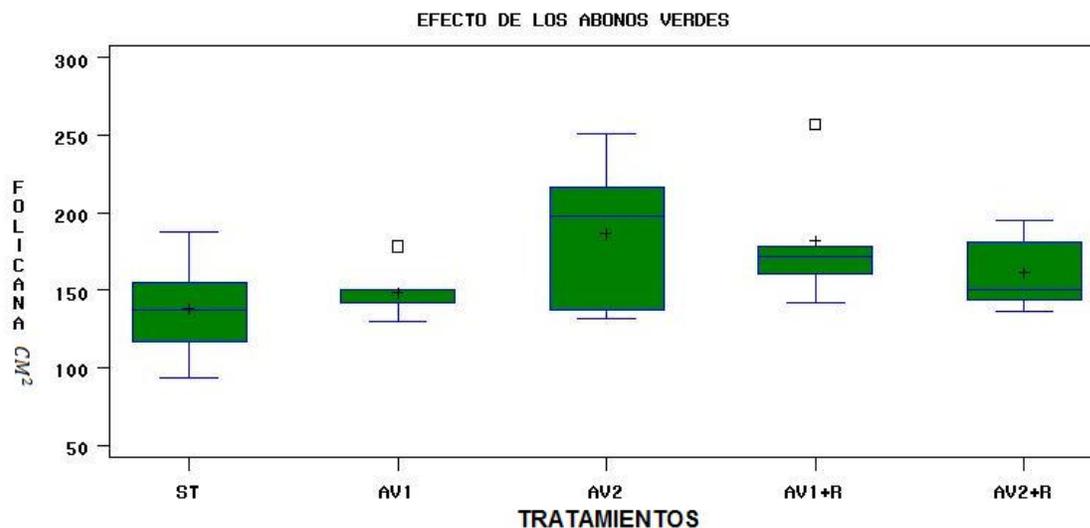
La altura tallos es una variable que da cuenta del proceso de nutrición vegetal de la caña de azúcar. En términos productivos, esta variable está directamente relacionada con el rendimiento de azúcares. En el ensayo, el ANDEVA no registró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos (anexo 10) para la variable altura de cañas a los 7 meses después de siembra. Los datos obtenidos en esta oportunidad, fluctuaron entre 141,8 y 147,4 cm (Figura 18), siendo similares a los registros de caña en la hacienda la Floresta con manejo convencional.



**Figura 18.** Diagrama de cajas y alambres para la variable altura de tallos (cm), para cada tratamiento evaluado. **Fuente:** El autor (2015).

### 5.8. Evaluación del área foliar de caña de azúcar

El área foliar en gramíneas como la caña de azúcar, es una variable fisiológica clave que da cuenta de su capacidad fotosintética. En el ensayo, el ANDEVA (Anexo 11) para área foliar de caña a los 5 meses de siembra, no registró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los diferentes tratamientos. A pesar de esto, el tratamiento AV2 registró el valor más alto con  $180 \text{ cm}^2$  (Figura 19). El tratamiento testigo ST, obtuvo el menor valor con  $130 \text{ cm}^2$  indicando una posible reducción en la capacidad fotosintética.



**Figura 19.** Diagrama de cajas y alambres para la variable área foliar de caña de azúcar ( $\text{cm}^2/\text{hoja}$ ), por cada tratamiento evaluado. **Fuente:** El autor (2015).

En vista de las necesidades de aumentar los picos de producción para un sector demandante como el azucarero, contar con un área foliar mayor en las plantas es de gran ayuda ya que en este órgano se fabrican las sustancias metabolizables y aprovechables por la planta. En gramíneas C4, la actividad fotosintética se traduce en la producción de glucosa, que finalmente en el caso de la caña se transforma en disacáridos como la sacarosa, siendo esta variable importante para la producción de sólidos que finalmente se traduce en rendimiento en fábrica.

## 5.9. Discusión general.

El ensayo permitió establecer el aporte del sistema intercalado frijol caupí- caña de azúcar, a la producción agroecosistémica sostenible en un vertisol del Valle del Cauca. En estas condiciones del sistema agrícola estudiado, con bajos contenidos de MOS y macronutrientes en solución, altas temperaturas y bajas precipitaciones, el aporte de biomasa del caupí en surcos 2x1 (AV<sub>2</sub>) es positivo para el manejo sostenible del suelo, siendo importante su aporte de residuos orgánicos (14.5 t/ha), que potencializan la actividad de los organismos del suelo y generan tanto mineralización de nutrientes para posterior absorción en subsiguientes cultivos, como la formación de MOS en el mediano plazo.

En vertisoles como el caso de estudio, donde la fertilidad física se ve limitada por el alto contenido de arcillas, el uso de tecnologías como los AV en el mediano y largo plazo, permitirían incrementar la porosidad e infiltración del agua en el suelo, mediante mejora gradual de la MOS. De igual forma, cabe anotar que la fuerza ejercida por el sistema radical de los AV, mejora el índice de estabilidad estructural del suelo y por ende, previene procesos degradativos como el encostramiento superficial y la erosión laminar.

Adicionalmente, con la adición de residuos de los AV se posibilita por un lado la reducción de las tasas de evapotranspiración en el suelo y, por otro, la imbibición del agua de lluvia y riego, potenciando su acumulación para beneficio de los cultivos. Lo anterior, se evidenció con el uso del AV<sub>2</sub> que en comparación con el suelo desnudo, logró incrementos en lámina de agua cercanos a 173 m<sup>3</sup>/ha. Este aspecto es muy importante si se tiene en cuenta que en el cultivo de caña de azúcar se realizan en promedio cerca de 8 riegos durante la fase productiva, pudiendo ser menos con el uso de esta tecnología de AV.

De igual manera, la significativa reducción de las poblaciones de arvenses en el cultivo de caña de azúcar con el AV<sub>2</sub>, abren las puertas a la posibilidad de reducir ostensiblemente el uso de herbicidas para su control. De esta forma, se reducirían los impactos ambientales negativos que genera el uso de estos agroquímicos en el suelo y las aguas. Al no registrarse efectos aparentes con el uso del sistema intercalado Caupí – caña de azúcar, sobre la fisiología de la gramínea, se puede establecer que las dos especies presentan nichos ecológicos diferentes, que no limitan su desarrollo por factores indeseables como: competencia por agua y nutrientes e interferencia lumínica.

El óptimo desarrollo del Caupí en los tratamientos sin inoculación de la cepa comercial de *Rhizobium* sp., indican que esta leguminosa puede generar fijación simbiótica de N<sub>2</sub> en asociación con bacterias nativas del suelo, siendo esto importante para la sustentabilidad agroecosistémica. En tal sentido, la manutención de estas poblaciones bacterianas en el suelo con la siembra frecuente de AV, es fundamental para garantizar este y otros servicios ecosistémicos a favor del ciclaje de materia orgánica y nutrientes.

Por su parte, prácticas convencionales como la manutención del suelo desnudo en sistemas de monocultivo de caña de azúcar, irían en contra de la sustentabilidad agroecosistémica como se observó en el ensayo. Efectos negativos como la baja retención de humedad, incremento de arvenses que interfieren el cultivo, así como la mineralización de la MOS, generan degradación del recurso suelo y ponen en riesgo la reproducibilidad del sistema.

## 6. Conclusiones.

Bajo las condiciones edafoclimáticas en las cuales se desarrolló el ensayo, el sistema 2x1 Caupí - Caña de azúcar aportó cantidades considerables de residuos vegetales, favoreciendo la MOS y la retención de humedad en el sistema, siendo esto importante para el manejo ecológico de suelo y su resiliencia ante eventos de cambio climático.

La siembra de caña de azúcar intercalada con frijol Caupí, permitió mayor aprovechamiento del espacio dentro de los surcos y con ello, interferencia sobre la germinación de arvenses. Esta condición, posibilitaría la reducción ostensible de aplicación de herbicidas pre y post emergentes que actualmente se usan en el cultivo de caña de azúcar, disminuyendo sus impactos ambientales.

El uso de la cepa comercial de *Rhizobium* sp. no generó efectos favorables sobre la productividad del Caupí, por el contrario redujo su biomasa. Esto indica que la cepa presentó baja especificidad para fijación de N<sub>2</sub> en Caupí, que si logró asociarse con bacterias nativas del suelo, siendo esto favorable para sustentabilidad agroecosistémica.

El desarrollo fisiológico de la caña de azúcar no difirió por efecto de los tratamientos, indicando entre otros aspectos que su asociación en intercalado con Caupí no interfiere en el aprovechamiento de nutrientes del suelo. Esto demostró que las especies cultivadas presentan nichos distintos, que favorecen su desarrollo individual, al tiempo que mejoran algunas condiciones agroecosistémicas como el reciclaje de materia orgánica y nutrientes.

## **7. Recomendaciones.**

Se recomienda hacer seguimiento a más largo plazo de los efectos de abonos verdes en el cultivo de caña de azúcar, con el fin de establecer aportes nutricionales, incidencia sobre variables biológicas como la reducción de plagas y enfermedades, así como evaluar los contenidos de materia orgánica del suelo en el tiempo.

Es recomendable continuar evaluando en campo nuevas distancias de siembra y periodos de incorporación de los abonos verdes, con motivo de hacer más eficiente el proceso de ciclaje de agua y nutrientes.

En caso de ser necesario, se recomienda aislar las bacterias simbióticas de los nódulos radicales en Caupí, con motivo de generar productos biológicos enriquecidos para ser aplicados en campo y mejorar la fijación de N<sub>2</sub> en el abono verde.

Se recomienda trabajar de la mano con centros de investigación que desarrollan nuevas variedades de caña de azúcar, con motivo de validar los resultados del ensayo y evaluar la interacción con otras condiciones ambientales como la zona húmeda, presente también en el Valle del Cauca.

## 8. Anexos

**Anexo 1.** Análisis de Varianza ANDEVA para la variable Peso seco de frijol Caupí.

Fuente de Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F
Tratamientos	4	389685,44	97421,36	21,26	<.0001
Bloques	4	13879,4	3469,85	0,76	0.5679
Error	16	73310,16	4581,89		
Total	24	476875			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, versión 9.2.

**Anexo 2.** Prueba de medias de Duncan ( $p < 0.05$ ) para la variable Peso seco de frijol Caupí.

Tratamiento	Media	N	Agrupamiento de Duncan
AV2	364,4	5	A
AV2+R	303,6	5	AB
AV1	238,0	5	BC
AV1+R	182,6	5	C
ST	0,0	5	D

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, versión 9.2.

**Anexo 3.** Análisis de Varianza ANDEVA para la variable Peso seco de biomasa de arvenses.

Fuente de Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F
Tratamientos	4	343926,24	85981,56	194,57	<.0001
Bloques	4	2337,44	584,36	1,32	0.3041
Error	16	7070,56	441,91		
Total	24	353334,24			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, versión 9.2.

**Anexo 4.** Prueba de medias de Duncan ( $p < 0.05$ ) para la variable Peso seco de biomasa de Arvenses.

Tratamiento	Media	N	Agrupamiento de Duncan
ST	319,0	5	A
AV1	102,4	5	B
AV1+R	71,2	5	C
AV2+R	0,0	5	D
AV2	0,0	5	D

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, versión 9.2.

**Anexo 5.** Análisis de Varianza ANDEVA para nitratos NO<sub>3</sub>

Fuente de Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F
Tratamientos	4	600.6856000	150.1714000	6.96	0.0019
Bloques	4	140.9536000	35.2384000	1.63	0.2144
Error	16	345.082400	21.567650		
Total	24	1086.721600			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, versión 9.2.

**Anexo 6.** Prueba de medias de Duncan ( $p < 0.05$ ) para nitratos NO<sub>3</sub>

Tratamiento	Media	N	Agrupamiento de Duncan
ST	14.620	5	A
AV1+R	4.380	5	B
AV2+R	3.080	5	B
AV1	1.600	5	B
AV2	1.540	5	B

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, versión 9.2.

**Anexo 7.** Análisis de Varianza ANDEVA para la variable de humedad

Fuente de Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F
Tratamientos	4	8716.96000	2179.24000	0.88	0.5003
Bloques	4	19127.36000	4781.84000	1,92	0.1561
Error	16	39838.24000	2489.89000		
Total	24	67682.56000			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, versión 9.2.

**Anexo 8.** Análisis de Varianza ANDEVA para poblacion inicial

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Valor de F</b>	<b>Pr&gt;F</b>
Tratamientos	4	498.240000	124.560000	1.02	0.4262
Bloques	4	1017.440000	254.360000	2.08	0.1305
Error	16	1952.160000	122.010000		
Total	24	3467.840000			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, verisión 9.2.

**Anexo 9.** Análisis de Varianza ANDEVA para poblacion final

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Valor de F</b>	<b>Pr&gt;F</b>
Tratamientos	4	22.64000000	5.66000000	0.21	0.9293
Bloques	4	91.44000000	22.86000000	0.85	0.5162
Error	16	432.1600000	27.0100000		
Total	24	546.2400000			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, verisión 9.2.

**Anexo 10.** Análisis de Varianza ANDEVA para altura de la caña

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Valor de F</b>	<b>Pr&gt;F</b>
Tratamientos	4	113.8144000	28.4536000	0.25	0.9037
Bloques	4	333.6224000	83.4056000	0.74	0.5778
Error	16	1800.825600	112.551600		
Total	24	2248.262400			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, verisión 9.2.

**Anexo 11.** Análisis de Varianza ANDEVA para area foliar en caña

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Valor de F</b>	<b>Pr&gt;F</b>
Tratamientos	4	8792.341600	2198.085400	1.66	0.2075
Bloques	4	6425.389600	1606.347400	1.22	0.3429
Error	16	21146.68240	1321.66765		
Total	24	36364.41360			

**Fuente:** Datos de salida del Programa SAS, verisión 9.2.

## 9. Bibliografía.

Agüero, J.J., Salazar, S.M., Kirschbaum, D.S. y Contini, A. (2012). Cultivares de frutilla adecuadas al uso de residuos de cosecha de caña de azúcar como acolchado alternativo al plástico. Tucuman, Argentina: ASAHO.

Altieri, M.A., & Nicholls, C.I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. En revista Agroecología. Murcia-España. Vol. 8(1): 7- 20.

Asocaña. (2008). Asumiendo los retos con energía. Informe anual 2007-2008, 1, 51.

Asociación Naturland. (2000). Cultivo Ecológico de Caña de Azúcar. Agricultura Orgánica en el Trópico y Su trópico, 1, 18.

Balañá, P.; Pérez, O.; Alfaro, M. A.; Fernández, M. V. (2010). *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis* and *Mucuna* sp. As possible nitrogen sources for fertilization in sugarcane commercial nurseries. In: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 27, México.

Berlinger, C., Yuncosa, N. y Pérez, T. (2008). Evaluación de cinco leguminosas en barbecho mejorado para el control de malezas en la planicie del río Motatán, Estado Trujillo, Venezuela. En revista Agronomía Tropical. Vol. 58(2): 117- 123.

Brenes, O.C. (1981). Los cultivos asociados y el combate de malezas. Turrialba, C.R., Catie Costa Rica. 13p.

Carbonell G., J.; Amaya E., A.; Ortiz, B.V.; Torres, J.S.; Quintero, R.; Isaacs E., C.H. (2001). Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca. Tercera aproximación. Palmira, Valle del Cauca: Cenicaña.

Cardona, C., Jarma, A. y Araméndiz, H. (2013). Mecanismos de adaptación a sequía en Caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Una revisión. En Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. Vol. 7(2): 277- 288.

Cenicaña. (1995). El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cenicaña, Vol. 1, 31-62.

Corpoica. (2008). Caupi, cabecita negra. Sistema de toma de decisión para especies forrajeras, 1, 1-2.

Da costa, M.B., Calegari, A., Mondardo, A., Bulisani, E.A., Wildner, L., Alcântara, P., Miyasaka, S. & Amado, T. J. (1993). Adubação verde no sul do Brasil. Rio de Janeiro, ASPTA. Segunda Edição. 346p.

Delgado, M.J., Casella, S., and Bedmar, E .J. (2007). Denitrification in Rhizobia-Legume Symbiosis. Chapter 6. In *Biology of the Nitrogen Cycle*. Edited by H. Bothe, S.J. Ferguson and W.E. Newton. 10p.

De Oliveira, R. A., Daros, E., Camargo Zambon, J. L., Weber, H., Teruyo Ido, O., Bessalho-Filho, J. C., Zuffellato-Ribas, K. C. e Tramuja da Silva, D. K. (2007). Área foliar em três cultivares de cana-deaçúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesq. Agropec. Trop.* 37 (2): 71-76.

Díaz, J.C. y Labrada, R. (2019). Manejo de malezas en caña de azúcar. Depósitos de documentos de la FAO. Artículo digital. URL disponible en: <http://www.fao.org/docrep/t1147s/t1147s0m.htm>

Duarte, J.M., Pérez, H.E., Pezo, D.A., Arce, J., Romero, F. y Argel, P.J. (1995). Producción de maíz (*Zea mays* L.), soya (*Glycine max* L.) y Caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) sembrados en asocio con gramíneas del trópico húmedo. En revista *Pasturas Tropicales*. Vol. 17 (2): 12- 19.

Dumet, D., Adeleke, R. y Faloye, B. (2008). Guías para la regeneración de germoplasma Caupí (en línea). Consultado 25 septiembre de 2015. Disponible en: [http://cropgenebank.sgrp.cgiar.org/index.php?option=%20com\\_content&view=article&id=274&Itemid=401&lang=es](http://cropgenebank.sgrp.cgiar.org/index.php?option=%20com_content&view=article&id=274&Itemid=401&lang=es)

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2008). Informe del estado el suelo en el mundo. Sala de prensa oficina Principal Roma – Italia.

Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A., Arl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R. and Vorosmarty, C.J. Nitrogen cycles: past, present, and future. In *Journal Biogeochemistry*. (2004). Vol. (70): 153–226.

Gana, A.K. and Busari, L.D. (2001). Effect of Green Manuring and Farm Yard Manure on Growth and Yield of Sugarcane. National Cereals Research Institute, P.M.B. 8, Bida, Niger State, Nigeria. *Sugar Tech*. Vol. 3(3): 97- 100.

Gangwar, K.S. y Sharma, K.S. (1997). Integrated nutrient management in summer-planted sugarcane on cultivators fields. In *Indian Journal of Agronomy*. Vol. 42(1): 181-183.

Gómez, J. (2004). Aceleradores de la Materia Orgánica. En revista Asiava- Cali (Colombia). No. 67: 10- 11.

Gómez, J.F. (1995). Control de malezas. En: CENICAÑA. EL cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA. pp. 143- 152.

Gómez, R. (1984). Cultivos asociados con caña panelera en la hoya del rio Suarez. En congreso de la sociedad colombiana de técnicos de la caña de azúcar, Cali-Colombia. Tecnicaña. Pág. 101-123.

González, M.C. (1975). Análisis agroeconómico del frijol asociado con caña de azúcar. Tesis de Ing. Agrónomo. San José, Costa Rica, Universidad, Facultad de Agronomía. 64p

Gopalasundaram, P., Rakkiyappan, P. and Bhaskaran, A. (2012). Integrated Nutrient Management in Sugarcane. India: Society for Sugar Research & Promotion. Vol. 14(1): 3-20.

Jaramillo, D. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 619p.

King, N.J., Mungomery, R.W. and Hughes, C.G. (1953). Manual of cane growing. Australian agricultural and livestock series. Angus and Robertson, Sydney Australia.  
Malagón, D. (1998). El recurso suelo en Colombia. Inventario y problemática. En revista académica Colombiana de ciencias. Vol. 22 (82): 13- 52.

López, G I., Fontenot, J. P., and García, T. (2011). Comparaciones entre cuatro métodos de estimación de biomasa en praderas de Festuca alta. Publicado en Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias. Vol. 2(2): 209- 220.

Maldonado, S.I. (1984). Evaluación agronómica del sistema de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L.) asociada con leguminosas de grano frijol común (*Phaseolus Vulgaris* L), Caupi (*Vigna Unguiculata* Walp) y soya (*Glycine Max* L.). Tesis ing. Agrónomo Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de agronomía. 39p.

Margesin, R. and Schinner, F. (2005). Manual of soil Analysis. Monitoring and Assessing soil bioremediation. Editorial Springer. 370p.

Misra, G. N., 1971: Improving the efficiency of green manures vis-a-vis sugar cane production in the Gangeric plains. Indian Sugar, 21: 1, 19-22.

Montoya, A.O. (1985). Análisis agroeconómico de la asociación frijol-caña de azúcar (*Phaseolus Vulgaris* L.- *Saccharum Officinarum* L.) bajo las condiciones de la unidad

de docente productiva de la Sabana Grande. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de Guatemala. Facultad de agronomía. 56p.

Nkrumah, M., Griffith, S.M. and Ahmad, N. (1989). Lysimeter and field studies on  $^{15}\text{N}$  in a tropical soil. II. Transformation of  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}-^{15}\text{N}$  in a tropical loam in lysimeter and field plots. *Plant soil* 114: 13- 18.

Obando, D.M. (2012). Respuesta fisiológica del frijol Caupí (*Vigna unguiculata* L.-Walp) a la coinoculación de bacterias diazotróficas de los géneros *Azotobacter* y *Rhizobium* en suelos del departamento del Cesar. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 78p.

Pankhurst, A., Blair, B.L., Magarey, R.C., Stirling, G.R., Bell, M.J. and Garside, A.L. (2005). Effect of rotation breaks and organic matter amendments on the capacity of soils to develop biological suppression towards soil organisms associated with yield decline of sugarcane. Australia Elsevier.

Peña, J. L, Peña, F., Cancio, T. y Gronzo, B. (1988). Instructivo técnico sobre el uso de los abonos verdes como protectores y mejoradores del suelo. Ministerio de la Agricultura, La Habana. 41p.

Pérez, M.A., Peña, M.R. y Álvarez, P. (2011). Agro-industria cañera y uso del agua: Análisis crítico en el contexto de la política de agrobiocombustibles en Colombia. En revista *Ambiente y Sociedade*. Campinas, Brasil. Vol. 14(2): 153- 178.

Pérez, O.; Hernández, F.; López, A.; Balañá, P.; Solares, E. y Maldonado A. (2008). El uso de abonos verdes como alternativa para mejorar la productividad y sostenibilidad del cultivo de la caña de azúcar. *Sugar Journal*, Vol. 70, No. 9. 14-21 p.

Prager, M., Sanclemente, O.E., Sánchez de Prager, M., Gallego, J.M. & Ángel, D.I. (2012). Abonos verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. En revista *Agroecología*, Murcia España. No. 7: 53- 62.

Resende, A. (2000). A fixação biológica de nitrogênio (FBN) como suporte da produtividade e fertilidade nitrogenada dos solos da cultura da cana de açúcar: uso de adubos verdes. Tesis de Maestría en el área de ciencias del suelo, Universidad de Río de Janeiro, Brasil. 145 p.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., and Foley, J. (2009).

Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. In *Journal Ecology and Society*. Vol. 14(2): 32-41.

Sánchez, A. (1982). Cultivos de plantaciones manuales para la educación agropecuaria. México D.F. Trillas. Pp. 63-79.

Sánchez de Prager, M., Prager, M., Naranjo, R., & Sanclemente O.E. (2012). El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. En revista *Agroecología- Murcia España* No. 7: 19- 34.

Sanclemente, O.E. & Prager, M. (2009). Efecto del cultivo de cobertura y abono verde: *Mucuna pruriens*, en las algunas propiedades biológicas de un suelo Typic Haplustalfs, cultivado con maíz dulce (*Zea mays* L.) en la zona de ladera del Municipio de Palmira Valle del Cauca, Colombia. Publicado en la *Revista Brasileira de Agroecología*. Vol. 4(2): 4133 – 4138.

Sanclemente, O.E., Patiño, C.O. y Beltrán, L. (2012). Análisis del balance energético de diferentes sistemas de manejo agroecológico del suelo, en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). En revista de investigación *Agraria y Ambiental*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá. Vol. 3(1): 41- 46.

Sanclemente, O.E. (2013). Efecto de *Mucuna pruriens* sobre la actividad simbiótica rizosférica y la movilización de N y P en un sistema de cultivo: maíz (*Zea mays* L.) y soya (*Glycine max* L.). Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 123p.

Singh, I. (1996). Green Manuring for sugarcane. *Jullinger India*, pp. 53-57

Torres, J. (1995). Riegos. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA. pág. 193-210.

Treto, E., García, M., Martínez, R. y Febles, J.M. (2005). Avances en el manejo de los suelos y la nutrición orgánica. *Avances en el manejo de los suelos y la nutrición orgánica*. Cuba. Pp. 167- 189.

Vallis, I., Parton, W.J., Keating, B.A., and Wood, A.W. (1996). Simulation of the effects of trash and N fertilizer management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. *Soil Tillage Research*, Vol.38, p.115-132.

Yadav, R.L., and Verma, R.P. (1995). Crop residue management to conserve soil organic matter content in sugarcane-based crop rotations. In *Journal Bioresource Technol*. Vol. 51: 241–245.