



CAPÍTULO

TECNOLOGÍAS AGROAMBIENTALES PRECURSORAS DE MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN CULTIVOS INDUSTRIALES DEL VALLE DEL CAUCA (COLOMBIA)



Óscar Eduardo Sanclemente Reyes
Mauricio García Arboleda
Milton César Ararat Orozco
Julio César Montoya Rendón

5.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más importantes que afronta la humanidad es su adaptación a los efectos que impone el cambio climático global. Estos efectos van desde incrementos de la temperatura ambiente con consecuente alteración del ciclo hidrológico hasta reducción de la capacidad productiva de alimentos por escasez de recursos naturales como agua y suelo, lo que ocasiona desplazamientos, hambrunas e incluso pérdidas humanas.

Diversos estudios afirman que el cambio climático global está siendo causado por desbalance de los ciclos biogeoquímicos, especialmente del carbono y nitrógeno (Galloway et al., 2004; Rockström et al., 2009; Davidson et al., 2012). Gran parte del carbono secuestrado por la corteza terrestre durante millones de años está siendo emitido a la atmósfera por medio de productos de combustión, y peor aún, está llegando a los ecosistemas en forma pura como los crudos del petróleo o transformado en cientos de productos derivados poco biodegradables, generando acumulación y contaminación.

Los principales gases de efecto invernadero (fenómeno causante del cambio climático global) son el dióxido de carbono CO_2 , metano CH_4 y óxido nitroso N_2O . Estas sustancias son emitidas como producto de diversas actividades humanas, entre las que se destacan el sector transporte, minero-energético, industrial y agropecuario. En la mayoría de los casos, la producción de estas sustancias es mediada por el oxígeno que abunda en la atmósfera, lo que facilita reacciones de óxido-reducción con productos, en el caso del carbono como el CO_2 por combustión o respiración aeróbica en la mayoría de las formas de vida. De otro lado, el carbono orgánico secuestrado en el suelo y la biomasa pueden sufrir transformación por agentes microbianos en ambientes anaeróbicos, convirtiéndose en CH_4 , que al igual que el CO_2 se emite a la atmósfera y se mezcla con sus gases componentes.

A pesar de que la mayoría de estas emisiones se dan en el planeta naturalmente, su producción ha venido siendo incrementada paulatinamente en el último siglo por una población creciente. Estos excesos de carbono no han logrado ser capturados e incorporados en la matriz natural y, por el contrario, están siendo concentrados en la exosfera, conformando una barrera densa que impide el retorno de los rayos solares que se reflejan en superficie hacia el espacio exterior, como ocurre normalmente en un invernadero.

De otro lado, se estima que anualmente se fijan en el suelo cerca de 250 millones de toneladas de nitrógeno proveniente de la atmósfera a través de la acción de microor-

ganismos de vida libre y asociados con las raíces de algunas plantas. Este nitrógeno abastece los requerimientos nutricionales de la vida que alberga el suelo en todas sus manifestaciones ya que entra a formar parte de moléculas orgánicas como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e intercambiadores energéticos. Sin embargo, la creciente demanda de este elemento en la agricultura ha generado la necesidad de sintetizarlo por vía industrial, llegando a incorporar casi 40 millones de toneladas anualmente y ocasionando un desbalance global (Davidson et al., 2012). Gran parte de este nitrógeno no alcanza a ser utilizado por el metabolismo de las plantas y en cambio se volatiliza en formas nocivas como el N_2O (tercer gas de efecto invernadero después del CO_2 y CH_4).

A pesar de que el uso de sustancias químicas en la agricultura trasciende al carbono y al nitrógeno, estos dos elementos han venido captando gran atención por parte de los investigadores ya que, como se mencionó anteriormente, intervienen directamente en las causas de cambio climático.

Adicionalmente, estos elementos son claves en procesos naturales como la respiración, la fotosíntesis y la fijación de N_2 , considerados como los más importantes en la naturaleza.

Por tal motivo, la sustentabilidad de los sistemas agrícolas dependerá en gran medida de cómo se potencien estos procesos naturales a favor de la conservación del suelo y el manejo de los cultivos, maximizando el uso de recursos y aprovechando la energía solar como fuente inagotable. La conservación del suelo está ligada estrechamente

a la materia orgánica componente, que a través de sus propiedades le confiere resiliencia, fertilidad, estabilidad, salud y productividad. Biomasa significa captura de carbono, que inicia con el proceso fotosintético y posteriormente es reciclada por los organismos del suelo que la transforman en humus o materia orgánica estable del suelo (MOS).

Es bien reconocida la función de la MOS como componente que integra y regula sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Juega un papel crucial en agroecosistemas sostenibles al participar de atributos emergentes como salud, resiliencia, fertilidad y autorregulación. Estos atributos pueden ser potenciados mediante prácticas tecnológicas de cultivo y la integración del componente animal en los agroecosistemas, factores que incentivan procesos de reciclaje de nutrientes, regulación hídrica, reducción de erosión e incremento de la fitosanidad, entre otros.

El objetivo de este capítulo es presentar algunas experiencias en tecnologías agroambientales en el departamento del Valle del Cauca (Colombia), que favorecen el ciclaje de materia orgánica del suelo en cultivos industriales como maíz, soya y caña de azúcar. Se destacan el uso de coberturas vegetales, abonos verdes y mulching, complementadas con el uso de fertilización órgano-mineral. Los resultados presentados son producto de ensayos realizados por miembros del grupo de investigación Producción Sostenible de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) en colaboración con otros investigadores y entidades regionales.

5.2 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO: COMPONENTE FUNDAMENTAL PARA LA SOSTENIBILIDAD AGROECOSISTÉMICA

De acuerdo con Sánchez et al. (2012), el suelo es un sistema vivo que participa activamente en la sostenibilidad de los agroecosistemas. Se considera vivo porque presenta patrones de organización cerrados que forman su estructura, presenta interacciones con el entorno en términos de materia y energía, contiene redes metabólicas que aseguran el automantenimiento y es un sistema cognitivo, expresado en la capacidad de aprendizaje de los organismos constituyentes para adaptarse ante perturbaciones externas.

De los constituyentes sólidos del suelo, la materia orgánica es el componente que más representa su carácter vivo. Labrador (2012) clasifica la materia orgánica del suelo como viva y no viva. La viva está constituida por el sistema de raíces, macro y microorganismos. La no viva la constituye la fase inestable: biomoléculas, restos de vegetales,

animales y biota edáfica con paso transitorio por el suelo debido a su alta susceptibilidad de transformación y la fase estable (o humus): constituida por moléculas mayormente transformadas como la humina, ácidos húmicos, fúlvicos e himatomelánicos. A esta última fase de la materia orgánica no viva la llamaremos MOS.

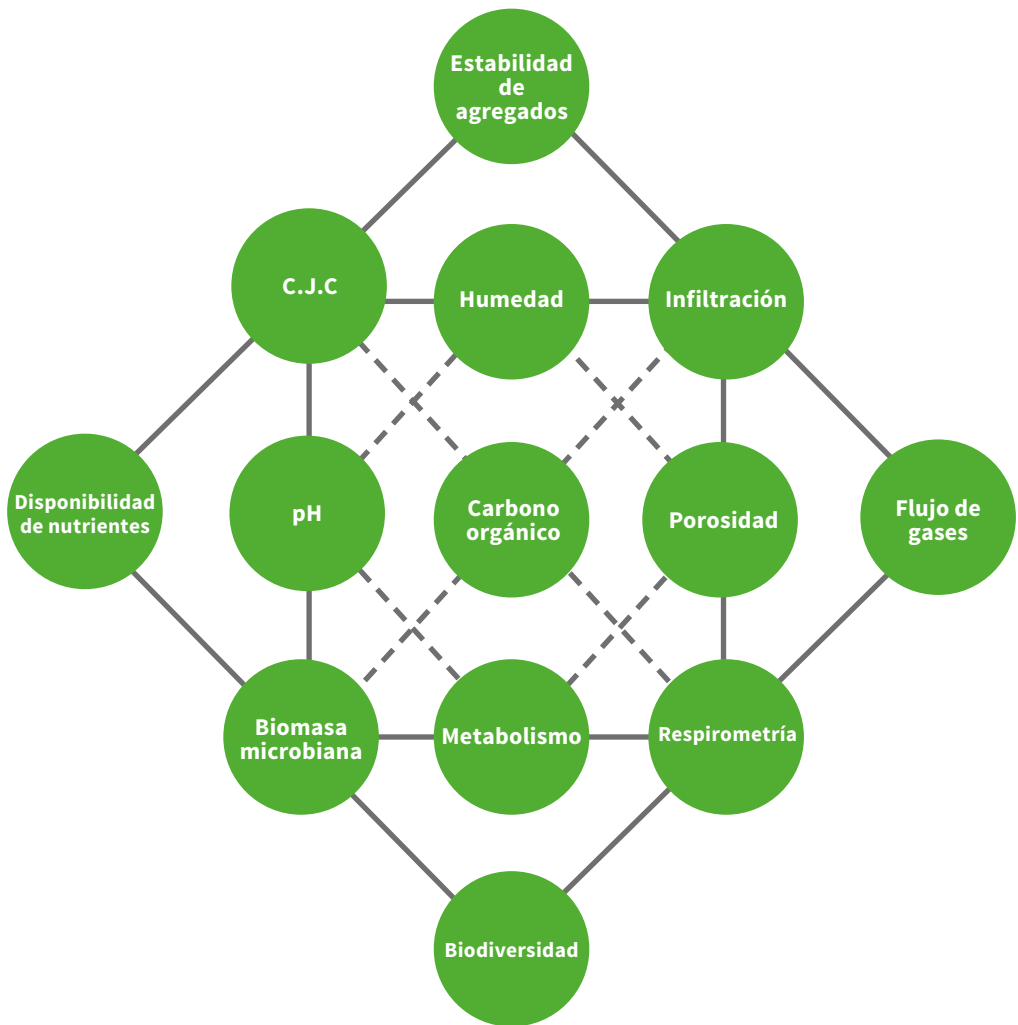
En agroecosistemas, la acumulación o pérdida de la MOS es producto del clima, de la acción de la biodiversidad arriba y abajo, de prácticas de manejo del suelo y de factores adversos como la erosión. Aunque la MOS está constituida por cientos de moléculas orgánicas, en su mayoría compuestos aromáticos, el carbono orgánico CO es su principal elemento constituyente con cerca del 68 %. De ahí que las pruebas de laboratorio para evaluar contenidos de MOS contemplen la estimación previa del CO y posteriormente la multiplicación de este valor por 1,724 o factor de van Benmelen (Martínez et al., 2008 citados por Labrador, 2012). La mineralización del CO libera CO₂ que difunde por los poros del suelo hacia la atmósfera, siendo aprovechado por plantas y otros organismos autótrofos. Sin embargo, aquellas moléculas de alto peso y baja tasa de biodegradación son acumuladas mediante el proceso de humificación, enriqueciendo las MOS.

La MOS se considera nodo integrador de las demás propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. A nivel físico, la MOS incrementa la retención de humedad gracias a su alta porosidad y capacidad de imbibición, posibilita la formación de agregados estables al agua reduciendo sus pérdidas por erosión y regula la temperatura del suelo. A nivel químico, la MOS le aporta al suelo carácter de tampón pues regula cambios bruscos de pH, forma complejos órgano-minerales que ayudan a su estructura e incrementa la capacidad de intercambio catiónico por su carácter coloidal; los ácidos húmicos presentes generan alta adsorción de nutrientes y los ácidos fúlvicos permiten la movilidad de estos hacia las raíces de las plantas por su poder quelante. Finalmente, la MOS es precursora y producto de la actividad biológica del suelo a través de procesos de ciclaje de residuos orgánicos que inicia en la descomposición y posteriormente mineralización y humificación. En estos procesos actúan diversos grupos de organismos entre los que destacan lombrices, termitas, hormigas, coleópteros, colémbolos, ácaros, dermápteros, hongos y bacterias. Los productos metabólicos de estos organismos son aprovechados por otros como fuente de nutrientes o microhábitat, generando una red invisible de interacciones.

Mientras Sanclemente (2009) evaluaba la incidencia de cultivos de cobertura y abonos verdes sobre la pérdida de suelo y el aporte de nutrientes al cultivo de maíz en zona de ladera del municipio de Palmira, registró una red de interacciones entre algunas propiedades del suelo, tomado como nodo central el CO (figura 5.1). Esta red se obtuvo mediante análisis de correlación Pearson ($p < 0.1$) de los datos, donde las líneas

continuas indican alta relación entre las variables y las punteadas de media a baja relación. En esta investigación, el aporte biomásico de la leguminosa *Mucuna pruriens* como mulch al suelo generó un efecto priming que dinamizó la actividad biológica del suelo, incrementó la retención de humedad en los primeros centímetros, redujo la erosión en cerca del 30 % comparada con el suelo desnudo y aportó nutrientes (N, P y otros) favoreciendo su absorción por el cultivo de maíz en rotación, que obtuvo rendimientos de 6.5 t.ha⁻¹.

FIGURA 5.1 Red de interacciones entre algunas propiedades del suelo *Typic Haplustalfs*.



Fuente: Sanclemente (2009)

Existen otras propiedades emergentes del suelo que surgen de la interacción entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Se destacan como propiedades emergentes la fertilidad, la resiliencia, la salud, y la autorregulación, que en cierta medida son indicadores de sostenibilidad del agroecosistema. La fertilidad del suelo hace referencia a su capacidad de suministrar agua y nutrientes a las plantas y demás organismos del suelo, siendo fundamental el ciclaje de residuos orgánicos por acción biológica (Sánchez et al., 2007). La resiliencia es la capacidad del suelo de volver a su estado de equilibrio previo luego de sufrir una perturbación externa, como por ejemplo la disturbación ocasionada por mecanización agrícola, inundaciones en épocas de lluvia, erosión y contaminación por agroquímicos, hidrocarburos, metales pesados, etc. (Sánchez et al., 2007). La salud del suelo antes definida como ausencia de organismos patógenos, hoy se entiende como la capacidad de suministrar servicios ecológicos con alto nivel de inocuidad y bienestar (Altieri y Nicholls, 2007; Döring et al., 2012; Álvarez et al., 2014). La autorregulación se define como la capacidad del suelo de mantener su equilibrio normal a partir de sus factores de formación, siendo importante la estabilidad estructural, mineralogía, porosidad, reacción y actividad biológica.

La sostenibilidad de los agroecosistemas dependerá en gran medida de diversos factores como son el socioecológico, las propiedades emergentes del suelo, el grado de heterogeneidad (policultivos, diversidad funcional, integración animal y otros) que genera sinergias, el uso eficiente del agua, el aprovechamiento de energía solar como fuente inagotable, la salud animal y vegetal, su autonomía y reproducibilidad temporo-espacial. Nicholls et al. (2015) señalan la importancia de generar procesos de conversión y rediseño de sistemas agrícolas bajo el enfoque agroecológico, con miras de lograr la sostenibilidad agroecosistémica. Esta conversión inicia con la ruptura de la naturaleza del monocultivo y adopción de prácticas que incentiven la diversificación agroecológica para promover sinergias, ciclaje de materia orgánica, activación biológica, conservar el suelo y el agua, balancear poblaciones de organismos plagas y enemigos naturales y así mantener la salud, productividad y autosostenimiento del agroecosistema.

En el proceso de transición entre sistemas de producción convencionales de altos insumos hacia aquellos con manejo de base agroecológica se destacan algunas prácticas como la rotación de cultivos, cultivos de cobertura, abonos verdes provenientes de leguminosas para fijación de N_2 , elaboración y aplicación de compostaje y lombricompostaje a partir de residuo-diversidad del agroecosistema (Lotter, 2003; Prager et al., 2012; Nicholls et al., 2015; Sanclemente y Ararat, 2017). Nótese la importancia de estas prácticas sobre la gestión de la MOS como componente fundamental de la sostenibilidad agroecosistémica.

5.3 LOS CULTIVOS INDUSTRIALES DE CAÑA DE AZÚCAR, MAÍZ Y SOYA EN EL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA

5.3.1 EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR *SACCHARUM OFFICINARUM L.*

De acuerdo con la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (2012), la caña de azúcar fue traída a Cali por Sebastián de Belalcázar, quien la cultivó en Yumbo en su estancia durante el periodo colonial. Posteriormente, el cultivo de caña se extendió por el occidente y centro del departamento del Valle del Cauca para abastecer trapiches de producción de panela, azúcar y mieles; este proceso duró varias décadas. A mediados del siglo XX, se inició la modernización del sector; en 1930 ya había tres ingenios en el departamento: Manuelita, Providencia y Río Paila. La alta rentabilidad económica de la actividad azucarera y la exportación de sus productos generó crecimiento paulatino del sector, que se expandió incluso a otros departamentos vecinos y en la actualidad cuenta con 22 ingenios, así como un área total sembrada cercana a 230 000 ha en los departamentos de Valle del Cauca, Nariño, Cauca y Risaralda.

La modernización del cultivo de caña de azúcar trajo consigo la mecanización agrícola para manejo de suelos y otras labores culturales que hoy día prevalecen. Del mismo modo, se creó la necesidad de generar procesos investigativos tendientes a describir los tipos de suelos, las condiciones agroclimáticas del departamento, el desarrollo de equipos e implementos, los itinerarios de cultivo y de nuevas variedades más productivas adaptadas a condiciones agroecológicas específicas y la labor desarrollada en la actualidad por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA) y la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (TECNICAÑA).

El cultivo industrial de caña de azúcar en la mayor parte de las suertes plantadas se lleva a cabo en monocultivos extensos con manejo convencional caracterizado por labranza mecanizada, aplicación de herbicidas pre y pos emergentes, fertilización de síntesis química que puede ser complementada por aplicación de subproductos de fábrica como la vinaza y la cachaza, aplicación de plaguicidas y fungicidas (aunque en algunos casos se hace control biológico), aplicación de madurantes siendo el Round up (glifosato) el más común y, finalmente, un proceso de cosecha mixto manual-mecanizado.

Todas estas labores culturales sumadas al factor genético de nuevas variedades adaptadas a ambientes específicos han incrementado en los últimos años la productividad del cultivo en toneladas de caña por hectárea (TCH), siendo fácil en algunos sitios obtener 230 t.ha⁻¹. Sin embargo, algunos investigadores reportan distintas externalidades ambientales como consecuencia de este modelo intensivo de producción como son la compactación, la salinización y la pérdida de la MOS, así como la contaminación de fuentes hídricas, lo que afecta la sostenibilidad del sistema (Dávalos, 2007; Zúñiga et al., 2011; Pérez et al., 2011; Cuero, 2012). A pesar de que algunas suertes se destinan actualmente al cultivo de cañas orgánicas para satisfacer el mercado internacional, son todavía muy pocas comparadas con el área total sembrada.

5.3.2 EL CULTIVO DE MAÍZ *ZEA MAYS* L.

El cultivo de maíz en Colombia ha sido históricamente importante, incluso desde épocas prehispánicas. Las condiciones geográficas, la radiación solar, la diversidad de climas, los tipos de suelos y demás factores socioecológicos presentes en el país hacen que sea óptimo para la siembra de este cereal (Salgar, 2004). Se estima que existen cerca de 23 razas de maíz en todo el territorio nacional y un sinnúmero de accesiones, siendo Colombia un importante centro de conservación. En la actualidad, el cultivo se siembra bajo dos tipologías: maíz tecnificado y maíz tradicional. El maíz tecnificado se caracteriza por monocultivos extensos que se siembran en suelos con alta fertilidad y acceso a agua de riego, empleando además labranza mecanizada y aplicación de diversidad de agroquímicos. Por su parte, el maíz tradicional es sembrado por pequeños productores en zonas de baja a mediana fertilidad, incluso en laderas, con baja o nula aplicación de insumos, siendo típico en estos sistemas las rotaciones o intercultivos con otras plantas de interés económico (Sanclemente, 2013).

A pesar de que Colombia alberga gran diversidad de maíces y presenta condiciones óptimas para la siembra, actualmente se importa cerca de 90 % del maíz de consumo nacional. La mayor parte del maíz importado se destina a elaboración de alimentos concentrados. Las importaciones han crecido cerca de 23 % durante los últimos cinco años como efecto del Tratado de Libre Comercio (TLC) con los Estados Unidos y actualmente llegan a 4 000 000 de toneladas por año (Viveros, 2017). El maíz a bajo costo de los Estados Unidos no paga aranceles, con lo que el productor nacional no puede ser competitivo ya que obtiene una baja relación beneficio/costo de la actividad.

En Colombia el departamento con mayor área sembrada de maíz tecnificado entre amarillo y blanco es Tolima con 29 000 ha, seguido de Córdoba con 21 000 ha y Meta con 20 000 ha. En el departamento del Valle del Cauca se siembran tecnificadamente cerca de 10 000 ha por semestre logrando los mejores rendimientos nacionales con

8.2 t.ha⁻¹ de grano seco (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015). Sin embargo, a pesar de la alta productividad en el departamento, los altos costos de producción, en especial de compra de insumos, hacen que se genere un margen bajo de utilidad. En 2013 se invertían \$900 000 en fertilizantes (20 % del total de costos) por hectárea y se percibía una utilidad neta en cosecha de \$125 000, lo que resulta en una actividad poco rentable comparada con la siembra de caña de azúcar (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013).

Esta condición de margen bajo de utilidad para el productor nacional requiere de políticas gubernamentales que protejan la producción nacional, siendo una alternativa los subsidios de productividad y el apoyo a la comercialización. Se cita como ejemplo la Resolución 439 de 2017 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), que otorga a productores de los departamentos del Valle del Cauca, Meta y Tolima un apoyo a la comercialización de maíz blanco de \$91 000 a \$104 000 por tonelada vendida a un industrial o establecimiento de comercio nacional. A pesar de que este tipo de políticas alivian un poco al productor nacional, sería conveniente explorar algunas tecnologías de cultivo que favorezcan el reciclaje de nutrientes y procesos como la humificación, al tiempo que permitan reducir costos de producción, siendo alternativas los intercultivos, los abonos verdes y los acolchados orgánicos con leguminosas (Sanclemente y Ararat, 2017).

5.3.3 EL CULTIVO DE SOYA *GLYCINE MAX L.*

La soya es la leguminosa cultivada más importante del mundo debido a su área sembrada, sus bondades nutricionales y su contenido de aceites, que la convierten en materia prima para diversidad de productos (Ridner, 2006). Es originaria de China, donde en 3000 a. C. ya era considerada semilla sagrada junto con el arroz, el trigo, la cebada y el millo. Sin embargo, su difusión mundial como cultivo de interés económico para elaboración de materias primas fue relativamente reciente (finales del siglo XIX). Actualmente, se estima que se siembran cerca de 92 000 000 de ha a nivel mundial semestralmente, con una producción de 207 000 000 de toneladas métricas por año (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006). Los principales productores de soya en el mundo son Estados Unidos, Brasil, China y Argentina, que representan cerca del 83 % de la producción mundial (Ridner, 2006; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006).

En Colombia la siembra de soya como cultivo de interés económico inició a mediados del siglo XX en el centro del departamento del Valle del Cauca, ligada al funcionamiento de la industria Grasas S.A. en el municipio de Guadalajara de Buga (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006). Durante las décadas siguientes el

cultivo tuvo una expansión importante en el país, sobre todo en los valles geográficos de los ríos Cauca y Magdalena. A inicios de los años 80, la soya se expandió a los llanos orientales por algunas ventajas competitivas como la distribución del régimen de lluvias, menores costos de producción y cercanía a la capital del país para comercialización. La mayor parte de la producción de soya se destinó a la elaboración de alimentos concentrados para nutrición animal, yendo a la par con el crecimiento de los sectores avícola, porcícola y piscícola en el país.

Al igual que el caso del maíz, en la actualidad se importa la mayor parte de la soya que requiere el mercado nacional, en forma de torta de soya, óptima para la elaboración de alimentos concentrados. De acuerdo con la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (2017), la importación de torta de soya principalmente desde Estados Unidos en 2016, fue de 521 000 toneladas. Así mismo, se muestra una tendencia anual de crecimiento de importación del 11 %. Este incremento histórico ha coincidido con la reducción del área sembrada de soya en el país. De acuerdo con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (2006) para el año 1987 se sembraban en Colombia 65 000 ha; en 1990 el área se incrementó a 116 000 ha, siendo el pico máximo; no obstante, desde esa época se tiene un decrecimiento sostenido que ha llegado a 34 000 ha en 2004.



En la actualidad se importa la mayor parte de la soya que requiere el mercado nacional, en forma de torta de soya, óptima para la elaboración de alimentos concentrados. De acuerdo con la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (2017), la importación de torta de soya principalmente desde Estados Unidos en 2016, fue de 521 000 toneladas

Los datos actuales indican que los departamentos con mayor área sembrada son Meta con cerca de 13 000 ha y Valle del Cauca con 3000 ha (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015). A pesar de que el rendimiento es mayor en Valle del Cauca, con $2,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ comparado con Meta, donde se obtiene $2,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2006), se privilegia la siembra en este último departamento al ser declarado parte de la nueva zona de expansión agrícola del país. Incluso los proyectos más ambiciosos en la parte agronómica del cultivo se tienen en la altillanura colombiana. Se destaca el desarrollo de nuevas variedades adaptadas a las condiciones climáticas de la altillanura, alto potencial de rendimiento y ciclos a madurez fisiológica de 100 días. Otro proyecto más ambicioso es el desarrollo de soya modificada genéticamente por *Agrobacterium tumefaciens* a partir de transformación de materiales nacionales (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2017).



Desde hace unas décadas el departamento del Valle del Cauca dejó de ser un productor importante de soya. En la actualidad, la mayoría de la soya se siembra al norte del departamento por empresas productoras de semillas.

Desde hace unas décadas el departamento del Valle del Cauca dejó de ser un productor importante de soya. En la actualidad, la mayoría de la soya se siembra al norte del departamento por empresas productoras de semillas. La baja relación beneficio/costo para el productor hacen que la actividad sea poco atractiva comparada con el costo de oportunidad ofrecido por el monocultivo de caña de azúcar. Para el año 2013, se invertían \$360 000 por hectárea de soya sembrada en compra de fertilizantes, lo que representa cerca del 38 % de los costos totales de producción; el productor percibía una utilidad neta de \$25 000, factor que desestimuló la actividad (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013).

En algunas ocasiones, el uso de paquetes tecnológicos y el desconocimiento de procesos ecológico-productivos del cultivo como la fijación de N_2 atmosférico, la ausencia de rotaciones con otros cultivos y la aplicación excesiva de herbicidas, entre otros, han generado que la producción de soya en el país sea poco rentable. Esto, unido con las desventajas competitivas que tienen los productores nacionales con la torta de soya que llega a menor costo al país como producto del TLC con Estados Unidos. De aquí la importancia de fomentar tecnologías de cultivo que favorezcan procesos ecológicos, aporten a la formación de MOS, rompan los ciclos reproductivos de arvenses en el suelo y, en últimas, reduzcan los costos de producción del cultivo a fin de mejorar su rentabilidad.

5.4 TECNOLOGÍAS DE CORTE AGROECOLÓGICO PARA RECICLAJE DE NUTRIENTES Y MEJORAMIENTO DE LA MOS

5.4.1 INTERCULTIVOS

Los intercultivos, también llamados cultivos intercalados, se definen como arreglos vegetales entre dos o más especies que comparten las escalas temporal y espacial en un sistema agrícola (Sanclemente y Ararat, 2017). En estos arreglos es fundamental comprender los nichos ecológicos de las especies que se van a plantar, sus ciclos fenológicos, interacciones biológicas, tipos de raíces y dosel, así como aspectos alelopáticos (Sanclemente y Ararat, 2017; Sarandón y Flores, 2014). Lo anterior con el fin de potencializar sinergias, mejorar la sanidad vegetal e incrementar la productividad por unidad de área.

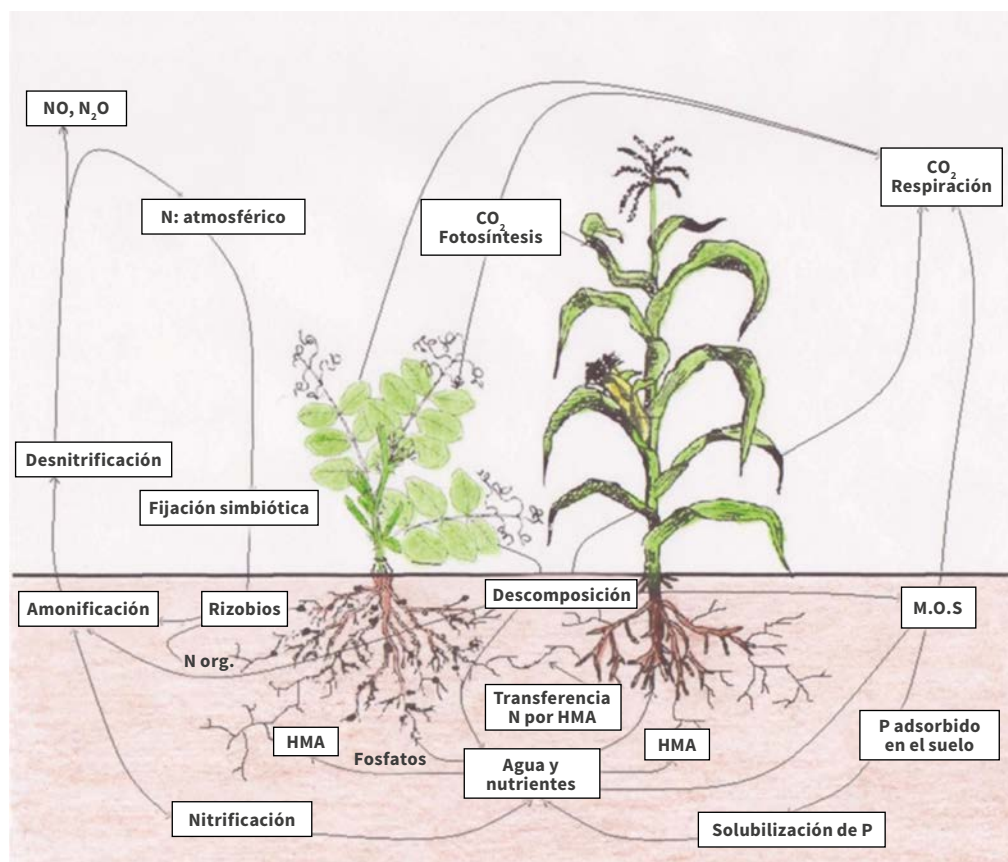
El conocimiento de intercultivos surge de la agricultura tradicional, donde los productores campesinos empíricamente han combinado especies en las parcelas productivas según sus necesidades y la oferta ambiental del entorno geográfico. En Latinoamérica se destaca el uso de frijol común, maíz, calabaza, nabos forrajeros, yuca y otras especies comestibles que sembradas en intercultivo maximizan el uso equivalente de la tierra (UET), reducen el uso de insumos externos, conservan el suelo e incrementan la productividad de la finca (Gliessman, 2001; Sanclemente y Ararat, 2017). Entiéndase UET como el área necesaria en monocultivo para lograr igual productividad que el policultivo.



El éxito de estos sistemas de producción ha generado el interés de algunos investigadores en Colombia desde hace varias décadas. Mientras Francis et al. (1978) evaluaban el UET en intercultivos de maíz-frijol común en una zona plana del departamento del Valle del Cauca (Colombia), reportaron valores de 1,5 ha necesarias en maíz de monocultivo para igualar la productividad lograda en el sistema intercalado. En este estudio se registró baja incidencia del insecto plaga *Spodoptera frugiperda* Smith. en parcelas con intercultivo comparada con el monocultivo de maíz.

Este incremento de la productividad en los cultivos intercalados obedece a las diversas interacciones que se generan arriba y abajo del suelo. Se destacan el reciclaje de nutrientes como el C, N y P, mediado en gran parte por simbiosis rizosféricas (figura 5.2). En intercultivos que incluyen leguminosas es frecuente la simbiosis tripartita entre hongos micorrícicos arbusculares HMA (raíces del cultivo) rizobios nativos del suelo (Meghvansi et al., 2008; Juge et al., 2012). De esta manera se acoplan los ciclos del P y N; incluso se cree que existen conexiones entre micelios de HMA que colonizan las raíces de las dos especies, donde el N en forma amoniacal es transferido de la leguminosa a la gramínea favoreciendo su nutrición (Bethlenfalvay et al., 1991).

FIGURA 5.2 *Diferentes procesos metabólicos de cooperación en el intercultivo leguminosa-gramínea, en los cuales se integran los ciclos de C, N y P, entre otros*



Fuente: Sanclemente (2013)

5.4.2 ABONOS VERDES

Los abonos verdes AV son plantas que siembra el productor asociadas o en rotación con cultivos de interés económico para cosechar su biomasa e incorporarla en los primeros centímetros del suelo y así favorecer su fertilidad e incrementar la MOS en el tiempo (Da Costa et al., 1993; Prager et al., 2012). Como un objetivo de los AV es mejorar la fertilidad vía ciclaje de nutrientes, generalmente se emplean leguminosas por su capacidad de fijación de N_2 atmosférico en asocio con rizobios del suelo. En el trópico, es común el uso del frijol terciopelo *Mucuna pruriens*, frijol caupí *Vigna unguiculata*, *Crotalaria* *Crotalaria juncea*, frijol de puerco *Cannavalia ensiformis*, y frijol guandul *Cajanus cajan* (Prager et al., 2012; Sanclemente et al., 2013). Estas especies se caracterizan además por su rusticidad, alta capacidad adaptativa y rápido crecimiento.

Algunas experiencias con AV evidenciaron que al incorporar la biomasa de leguminosas en zonas cálidas se incrementa la tasa de mineralización con consecuente pérdida de nutrientes como el N vía volatilización (Prager et al., 2012; Sanclemente, 2013). Esto se debe a la baja relación C/N de los tejidos vegetales de leguminosas, siendo necesario incorporarlos en mezclas con residuos de gramíneas o crucíferas, con miras de incrementar los tiempos de permanencia en el suelo, mejorar el ciclaje de nutrientes y favorecer la formación de MOS. El momento oportuno de incorporación de leguminosas al suelo es su etapa fenológica de prefloración ya que es cuando la planta ha realizado la mayor fijación de N_2 y absorbido en mayor proporción otros nutrientes del suelo, siendo esto conveniente para el ciclaje de nutrientes (Sanclemente, 2013).

Una vez los AV se incorporan al suelo, los tejidos vegetales pierden rápidamente humedad y se inicia el proceso de descomposición. En este proceso juega un papel importante la microbiota del suelo, entre la que destacan lombrices, dermápteros, coleópteros, colémbolos, ácaros e himenópteros, así como microorganismos descomponedores entre los que se encuentran diversos hongos y bacterias. Posterior a la descomposición, inicia el proceso de mineralización de nutrientes, que consiste en la transformación de moléculas orgánicas en inorgánicas; estas últimas podrán quedar inmovilizadas por la biomasa microbiana del suelo, adsorbidas por la fracción coloidal y/o liberadas a la solución para ser tomadas por el sistema radical de las plantas de interés económico.

En el proceso de mineralización, el N orgánico presente en proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos de las leguminosas incorporadas es inicialmente transformado en amonio (NH_4) por acción de bacterias amonificantes (Sánchez et al., 2012). El NH_4 puede absorberse directamente por las plantas o transformarse en nitratos por acción de bacterias aeróbicas. Allí, el amonio se transforma en nitritos y nitratos en los que son

importantes algunas bacterias de los géneros *Nitrosomonas* sp., que transforman el amonio en nitrito (NO_2) y *Nitrobacter* sp., que transforman el NO_2 en nitrato (NO_3); este último logra ser metabolizado por plantas y otros organismos del suelo (Koops et al., 2003; Figueroa et al., 2012).

El uso de mezclas entre leguminosas y gramíneas como AV es conveniente para el proceso de mineralización de los residuos ya que se reducen drásticamente las pérdidas de NH_4 por volatilización (Sanclemente, 2013). De igual manera, la incorporación de AV al suelo no debe realizarse en suelos anegados por lluvias o recientemente irrigados porque el ambiente anaeróbico favorece la desnitrificación, reduciendo el N- inorgánico obtenido mediante mineralización de residuos. El principal producto de la desnitrificación del N- inorgánico es el óxido nitroso (N_2O), que es altamente volátil y contribuyente del calentamiento global al considerarse gas de efecto invernadero GEI (Robertson y Groffman, 2007; Sánchez et al., 2007; Cerón y Aristizabal, 2012). Algunos géneros bacterianos como *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Agribacterium* sp. y *Favibacterium* sp. se han reportado desnitrificantes (Benavides et al., 2006; Orlando et al., 2012).

Otra ventaja de la mezcla de residuos como AV ligada al incremento de la relación C/N es el favorecimiento del proceso de humificación. El C orgánico que integra moléculas de lignina, polifenoles, hemicelulosa y taninos presentes en ramas y raíces de los residuos es de difícil mineralización a CO_2 por acción microbiana (Wang et al., 2004; Sánchez, 2007), siendo humificado lentamente en el suelo e incrementando la MOS (Horwath, 2007).

5.4.3 CULTIVOS DE COBERTURA Y ACOLCHADOS ORGÁNICOS

Los cultivos de cobertura los constituyen plantas que cubren el suelo en forma temporal o permanente con el fin de protegerlo y reducir los procesos erosivos (Centro Internacional de Información sobre Cultivos de Cobertura, 2003). Al igual que los intercultivos, los cultivos de cobertura se planifican de acuerdo con el tipo de cultivo de interés económico teniendo en cuenta el nicho ecológico de raíces de las especies para reducir competencia por nutrientes así como interferencia aérea por espacio y luz solar. Lo ideal es emplear especies con alta capacidad adaptativa al medio, rápido crecimiento y baja demanda de nutrientes ya que en la mayoría de los casos las coberturas son establecidas en suelos de baja fertilidad, siendo una alternativa tecnológica sostenible para zonas de ladera (Sánchez et al., 2007; Prager et al., 2012; Vélez y Sánchez, 2014).

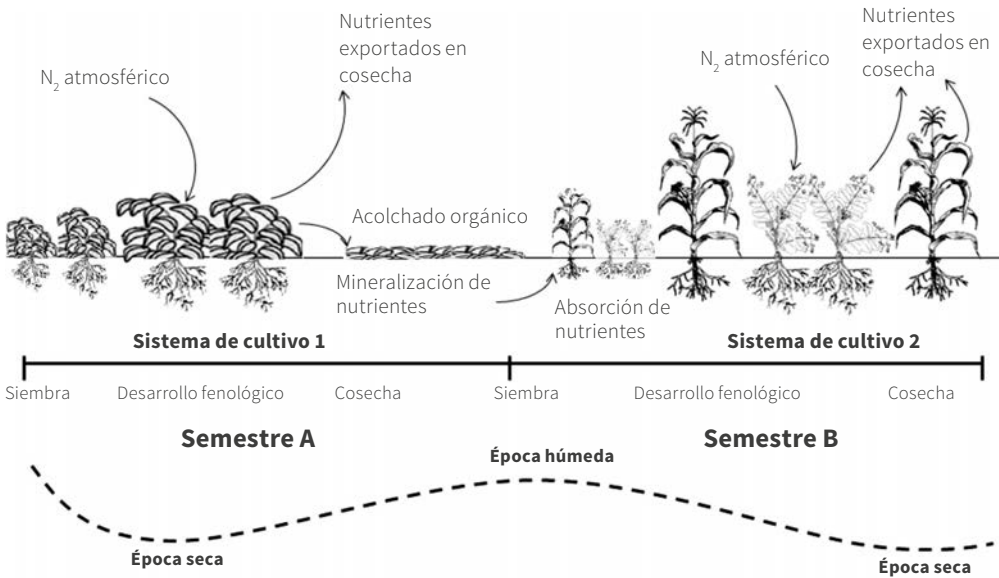
Otro beneficio obtenido con el uso de coberturas vegetales es el de mantener la humedad del suelo, siendo esto favorable en zonas tropicales donde la evapotranspiración es mayor a la precipitación anual. Esta bondad de las coberturas las perfila como tecnología factible para afrontar los efectos del cambio climático. Del mismo modo, el establecimiento de las coberturas reduce notablemente la germinación de arvenses, aporta a la salud del cultivo y en algunos casos se usa para forraje o alimentación humana (Centro Internacional de Información sobre Cultivos de Cobertura, 2003).

Por su parte, los acolchados orgánicos o “mulching” son residuos vegetales, en su mayoría hojarasca, que cubren parcial o totalmente el suelo permitiendo interceptar las gotas de lluvia, regular la liberación de nutrientes mediante imbibición, retener humedad y al tiempo reducir la evapotranspiración (Prager et al., 2012; Sanclemente, 2013). Algunas tecnologías de cultivo incorporan estos principios como el caso de los cultivos en callejones o *alley cropping*, que consiste en sembrar algunos surcos con especies de alta producción de follaje para favorecer sistemas de cultivo de interés económico mediante su poda periódica y formación de acolchados orgánicos. En el trópico se siembran en callejones algunas especies perennes como *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Flemingia macrophylla*, *Tephrosia vogelii*, *Calliandra houstoniana*, *Cratylia argentea*, *Tithonia diversifolia* (Navia, 2006; Salmi et al., 2013; Wolz y DeLucia, 2018).

5.4.4 ROTACIÓN DE CULTIVOS

La rotación de cultivos consiste en renovar periódicamente la siembra dentro del mismo espacio del agroecosistema con distintas especies vegetales de corta duración a fin de mejorar la fertilidad del suelo, romper los ciclos de algunas plagas y enfermedades, diversificar la producción y, en algunas zonas, aprovechar la distribución pluviométrica con base en las necesidades hídricas de los cultivos en sus diferentes etapas fenológicas (Altieri y Nicholls, 2007). En la mayoría de los casos, el cultivo en rotación aprovecha los nutrientes que aportan los residuos de cosecha del semestre anterior, reduciendo notablemente el uso de fertilizantes y aplicación de herbicidas preemergentes (figura 5.3).

FIGURA 5.3 Ilustración temporal de los procesos de reciclaje de nutrientes en la rotación de sistemas de cultivo dentro del agroecosistema



Fuente: Los autores (2018)

La agricultura tradicional a través de la práctica empírica en distintas partes del mundo ha logrado identificar y establecer diferentes especies vegetales que se siembran en rotación para reducir la dependencia de recursos externos y mantener la biodiversidad en el sistema (Altieri y Liebman, 1986; Francis, 1989; Ferguson et al., 2009; Sanclemente, 2009). En América Latina el caso cubano es ejemplar. Mientras Funes (2009) evaluaba durante seis años fincas integradas con 25 % del área sembrada en cultivos y 75 % con ganadería en el oeste de la Habana (Cuba), registró los mejores resultados de productividad y eficiencia energética en rotaciones de cultivos: maíz/fríjoles, maíz/maní y maíz/fríjoles/yuca. Del mismo modo, las leguminosas de mayor capacidad de fijación empleadas en rotación y/o abonos verdes fueron canavalia *Cannavalia ensiformis*, fríjol mungo *Vigna radiata* y fríjol terciopelo *Mucuna pruriens*.

Otro ejemplo de sistemas tradicionales es la milpa en Centroamérica, que consiste en arreglos agroforestales que involucran rotaciones periódicas de cultivos semestrales entre los que destacan el maíz, el fríjol y la calabaza para ciclar nutrientes, sostener poblaciones activas de reguladores biológicos, mantener la humedad, interferir la acción de arvenses y mejorar la productividad (Ferguson et al., 2009). De esta manera los agricultores diversifican los productos de las fincas y pueden lograr mejores precios de los productos en el mercado.

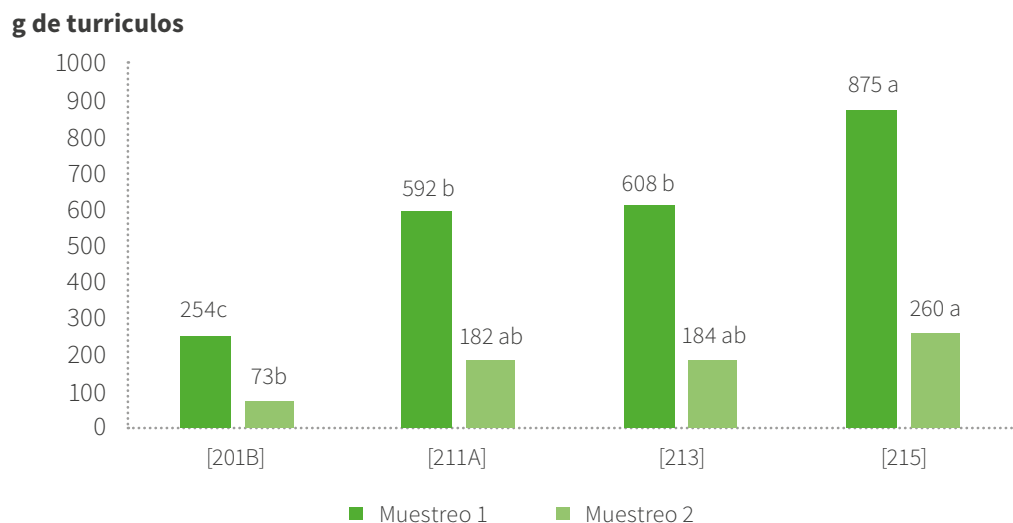
5.5 ESTUDIOS DE CASO CON USO DE ALGUNAS TECNOLOGÍAS AGROAMBIENTALES EN CULTIVOS INDUSTRIALES DEL VALLE DEL CAUCA (COLOMBIA)

5.5.1 CAÑA DE AZÚCAR ORGÁNICA

Caicedo (2011) evaluó el efecto de algunas prácticas agroambientales en el cultivo de caña de azúcar orgánica sobre la actividad de lombrices nativas mediante producción de turrículos (coprolitos). El estudio se desarrolló en la hacienda El Alisal del Ingenio Providencia S.A. (3° 37' 36,7" N; 76° 19' 51,7" W) ubicada en el municipio de El Cerrito (Valle del Cauca), con precipitación promedio anual de 925 mm, temperatura promedio de 24 °C y 990 m s. n. m. Los suelos predominantes fueron de órdenes Mollisol y Vertisol. Se seleccionaron cuatro suertes (211A, 201B, 213 y 215), todas con siembra de intercultivo caña de azúcar variedad Cenicaña 8592 y frijol caupí *Vigna unguiculata*, que se incorporó a los 45 días como abono verde. Las suertes tuvieron fertilización orgánica diferenciada: en 211A y 201B se aplicó vinaza enriquecida con microorganismos; en 213 y 215 se hizo el mismo manejo pero con aplicación adicional de lodos de vinaza. En todas las suertes se aplicó compost de gallinaza. Para tomar las muestras de los turrículos se establecieron cinco parcelas de 3 m² por suerte, para un total de veinte parcelas y 60 m² de área experimental de muestreo. Se realizaron dos réplicas de muestreos separados por 15 días entre ellos. Los turrículos muestreados por parcela se secaron en estufa a 105 °C por 24 horas y se determinó su peso seco. En el primer muestreo se registró peso seco de turrículos de 875 g en la suerte 215, significativamente ($p < 0.05$) mayor a las demás (figura 5.4).

En todas las suertes se aplicó compost de gallinaza. Para tomar las muestras de los turrículos se establecieron cinco parcelas de 3 m² por suerte, para un total de veinte parcelas y 60 m² de área experimental de muestreo.

FIGURA 5.4 Peso seco (g) de turrículos (coprolitos) de lombrices nativas en las suertes 201B, 211A, 213 y 215 de la hacienda El Alisal, municipio de El Cerrito-Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)



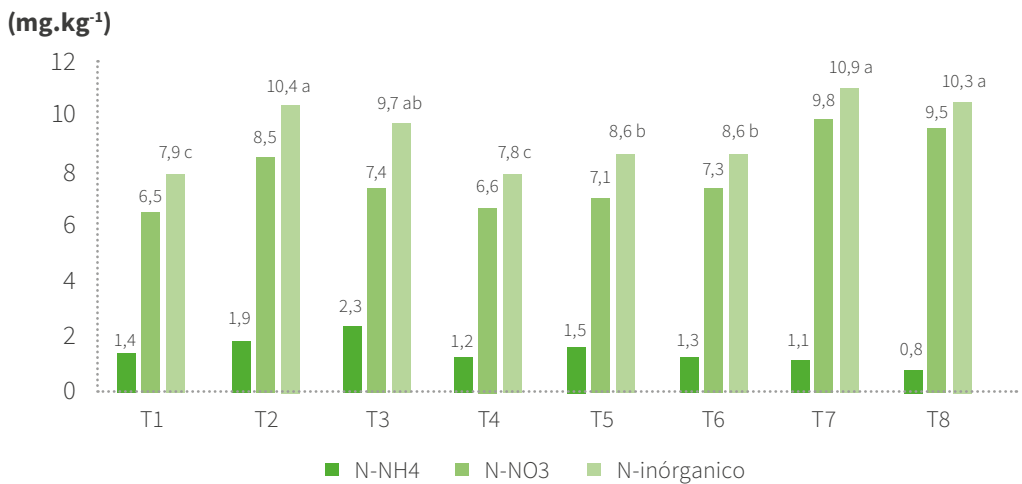
Fuente: Caicedo (2011)

Esta tendencia se mantuvo a los 15 días cuando la suerte 215 alcanzó una producción de 260 g de turrículos. Del mismo modo, se observó menor producción en la suerte 201B que fue significativamente ($p < 0.05$) inferior a las demás. La alta producción de turrículos en la suerte 215 fue indicadora de la actividad biológica de las lombrices nativas del suelo, que logran degradar diferentes materiales orgánicos que son aplicados en superficie, incluso algunos derivados de la producción industrial del alcohol carburante como el caso de los lodos de vinaza. Otro factor que pudo incidir en la suerte 215 fue su alto contenido de humedad en superficie, debido al mayor contenido de materia orgánica del suelo y arcillas, que combinado con el aporte biomásico de hojarasca de caña y abono verde generó un microhábitat favorable para el desarrollo de las lombrices. Lo anterior aporta a la producción de humus estable del suelo y a la sostenibilidad del sistema de cultivo.

Gutiérrez y Gómez (2015) evaluaron el aporte nitrogenado al suelo del frijol caupí *Vigna unguiculata* con y sin inóculo de *Rhizobium* sp. (Rb), sembrado en intercultivo con caña de azúcar Var. Cenicaña 8592. El ensayo se realizó en la Hacienda El Alisal del Ingenio Providencia S.A. ($3^{\circ} 37' 19''$ N; $76^{\circ} 19' 43''$ W) ubicada en el municipio de El Cerrito (Valle del Cauca), con precipitación promedio anual de 925 mm, temperatura promedio de 24°C

y 990 m s. n. m. Se seleccionó la suerte 201D con suelo predominante *Pachic Haplustoll*, pendiente del 3 %, textura franco arcillosa y pH 7,5. En diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones se emplearon los tratamientos: (T1) Rb en dosis comercial + 6 m³.ha⁻¹ de vinaza, (T2) 6 m³.ha⁻¹ de vinaza, (T3) Rb en dosis comercial + 10 t.ha⁻¹ de compost, (T4) 10 t.ha⁻¹ de compost, (T5) Rb en dosis comercial + 6 m³.ha⁻¹ de vinaza + 10 t.ha⁻¹ de compost, (T6) 6 m³.ha⁻¹ de vinaza + 10 t.ha⁻¹ de compost, (T7) Rb en dosis comercial y (T8) testigo (intercultivo sin inóculo ni fertilización). Para evaluar el N-inorgánico se tomaron muestras de suelo 0-30 cm a las que se les determinaron los contenidos de amonio (NH₄) y nitrato (NO₃) por el método Kjeldahl (figura 5.5).

FIGURA 5.5 Contenidos de N-NH₄, N-NO₃ y N- inorgánico (mg.kg⁻¹) en las parcelas experimentales. Suerte 201D de la hacienda El Alisal, municipio de El Cerrito-Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)



Fuente: Gutiérrez y Gómez (2015)

Los tratamientos T2, T7 y T8 obtuvieron contenidos de N-inorgánico significativamente altos ($p < 0.05$) con respecto a los demás. La aplicación del inóculo de *Rhizobium* sp. en T7 logró los valores más altos de concentración de NO₃ en el suelo, indicando procesos avanzados de mineralización de la materia orgánica, lo que pudo deberse no solo a procesos simbióticos entre la cepa y el frijol caupí sino a su actividad de vida libre en el suelo, como lo registran otros investigadores (Hirsch, 1996; Delgado et al., 2007; Pérez y Lodeiro, 2013). Por su parte, la aplicación de vinaza en el T2 logró mejorar la disponibilidad de N-inorgánico; sin embargo, cuando fue aplicada en mezcla con *Rhizobium* sp. generó efectos negativos en la actividad de la cepa, posiblemente por

su carácter ácido. El testigo (T8), donde no hubo aplicación de cepa ni fertilización adicional, presentó altos contenidos de N-inorgánico, lo que indicó la actividad nitrificante de los organismos nativos del suelo. Finalmente, el uso de compost de gallinaza redujo la disponibilidad de N-inorgánico en el suelo posiblemente por su alta relación C/N y su aporte microbiano, factores que inciden en la inmovilización del nutriente como lo describen otros investigadores (Sanclemente y Prager, 2009; Sanclemente, 2013). La comprensión de estos procesos en intercultivos frijol-caña de azúcar y el uso de inoculantes posibilitan el mejoramiento de tecnologías de cultivos orgánicos como alternativas ambientalmente sustentables.

Sanclemente, Ararat y De la cruz (2015) evaluaron la contribución del abono verde *Vigna unguiculata* L. a la producción sostenible de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L. variedad CC 85-92, en un vertisol del Valle del Cauca (Colombia). El ensayo se realizó en la Hacienda Lucernita del Ingenio Riopaila Castilla S.A. (4° 14' 35" N; 76° 09' 12" W) ubicada en el municipio de Bugalagrande (Valle del Cauca), con precipitación promedio anual de 1008 mm, temperatura promedio de 24 °C y 931 m s. n. m. El suelo de textura arcillosa con presencia de cuñas, pendiente del 4 %, pH 7,4 y 1,7 % de MO. En diseño experimental de bloques completos al azar con cinco repeticiones se emplearon los tratamientos: (T1) control (monocultivo de caña de azúcar), (T2) intercultivo de surcos 1x1 frijol caupí-caña de azúcar, (T3) intercultivo de surcos 2x1 frijol caupí-caña de azúcar, (T4) intercultivo de surcos 1x1 frijol caupí-caña de azúcar más inóculo de *Rhizobium* sp. y (T5) intercultivo de surcos 2x1 frijol caupí-caña de azúcar más inóculo de *Rhizobium* sp. Los tratamientos se asignaron aleatoriamente en parcelas de 31 m². Se evaluó la materia seca de arvenses por el método del cuadrante, el rendimiento en biomasa de caña de azúcar por hectárea y la producción final de azúcar en fábrica (tabla 5.1).

TABLA 5.1 Datos de materia seca, rendimiento de caña y producción de azúcar. Hacienda Lucernita, municipio de Bugalagrande-Valle del Cauca (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)

Tratamiento	Materia seca de arvenses* (t.ha ⁻¹)	Rendimiento** (t.ha ⁻¹)	Producción de azúcar*** (t.ha ⁻¹)
T1	12.7 a	107.3 ab	12.9ab
T2	4.1 b	131.1 a	15.5 a
T3	1.2 c	93.3 b	11.1 b
T4	2.8 b	123.7 a	15.3 a
T5	1.6 c	102.7 ab	12.5 ab

*Evaluación durante el mes 2. **Evaluación durante el mes 11. *** Evaluación durante el mes 13.

Fuente: Sanclemente, Ararat y De la cruz (2015)

Se registró alta producción de azúcar en T2 y T4 donde se sembró intercultivo en surcos 1x1, con 15,5 y 15,3 t.ha⁻¹ respectivamente. El uso de inóculo de *Rhizobium* sp. no generó efectos aparentes sobre productividad de azúcar o producción de biomasa de arvenses. Esto indicó que *V. unguiculata* pudo realizar simbiosis con bacterias nativas de suelo, con mayor potencial en cuanto a especificidad para el proceso de fijación biológica de N₂ (Villanueva y Quintana, 2012). Por su parte el intercultivo 2X1 logró reducir significativamente (entre 87 % y 90 %) la presencia de arvenses acompañantes en el agroecosistema, pero con reducción en la producción de azúcar. Estos resultados permitieron identificar prácticas de cultivo que favorecen la relación beneficio/costo de la actividad económica del cultivo de caña de azúcar y al tiempo reducen ostensiblemente la aplicación de herbicidas y fertilizantes sintéticos con los beneficios ambientales que ello conlleva (Sanclemente et al., 2017).

5.5.2 CULTIVO DE MAÍZ EN ZONA DE LADERA

Sanclemente (2009) evaluó el efecto del cultivo de cobertura *Mucuna pruriens* Var. Utilis sobre algunas propiedades del suelo y la productividad de maíz en zona de ladera del municipio de Palmira-Valle del Cauca (Colombia). El ensayo se realizó en el corregimiento de Ayacucho-La Buitrera (3° 28' 30" N; 76° 11' 42" W) con 1350 m s. n. m., 1230 mm de precipitación media anual, 23 oC de temperatura y 70 % de humedad relativa. El suelo clasificado como *Typic Haplustalfs* con pendiente de 30 %, textura franco arenosa, pH 6,8 y 2,6 % de MO. Durante el primer semestre del año se estableció la cobertura de *M. pruriens* con siembra de 70 kg de semilla.ha⁻¹; posteriormente se cortó la biomasa en estado fenológico de prefloración (80 dds). En diseño experimental de bloques completos al azar y tres réplicas se establecieron tratamientos previos a la rotación con maíz: (T1) testigo-suelo desnudo, (T2) abono verde (AV) de *M. pruriens*, (T3) AV de *M. pruriens* + 5 t.ha⁻¹ de compost, (T4) AV de *M. pruriens* + 250 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 10-30-10, (T5) AV de *M. pruriens* + 2.5 t.ha⁻¹ de compost + 125 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 10-30-10, (T6) acolchado orgánico (AO) de *M. pruriens*, y (T7) AO de *M. pruriens* + 2.5 t.ha⁻¹ de compost + 125 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 10-30-10. En parcelas experimentales de 20 m² se sembró maíz Var. ICA V-305 a razón 40 000 plantas.ha⁻¹. Se evaluó la variación de los contenidos de C y N del suelo (0-20 cm) antes y después de los tratamientos, se estimaron las pérdidas de suelo por erosión laminar y el rendimiento de grano seco de maíz (tabla 5.2).

TABLA 5.2 Variación de contenidos de C y N en el suelo (0-20 cm), pérdida de suelo por erosión y rendimiento de grano seco de maíz. Corregimiento de Ayacucho, municipio de Palmira (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Tratamiento	Variación* del C del suelo (mg.kg ⁻¹)	Variación* del N del suelo (mg.kg ⁻¹)	Pérdida de suelo (t.ha ⁻¹)	Rendimiento (t.ha ⁻¹)
T1	-40 c	-510 b	10.9 a	4.1 b
T2	-30 bc	-5 ab	10.4 a	4.8 ab
T3	14 a	612 a	10.0 a	6.5 a
T4	-12 abc	139 ab	7.3 a	5.4 ab
T5	3 a	603 a	9.8 a	7.0 a
T6	-3 ab	-35 ab	8.2 a	6.5 a
T7	3 a	522 a	7.6 a	6.8 a

*Variación= Contenido después- Contenido antes de los tratamientos.

Fuente: Sanclemente (2009)

El T1 (suelo desnudo) registró la mayor reducción en los contenidos de C y N del suelo 0-20 cm después del ensayo, así como mayor pérdida por erosión laminar, lo que finalmente se tradujo en menor rendimiento de maíz en grano seco. En general, el uso de *M. pruriens* como AV generó disturbación del suelo y ocasionó mayor desprendimiento de partículas en superficie y erosión laminar con excepción del T4, donde se aplicó fertilizante de síntesis química que redujo las pérdidas en cerca del 30 % con respecto al T1 por efecto de la alta producción de biomasa de maíz y posible interceptación de gotas de lluvia, evitando salpicaduras. El uso de compost en el AV (T3) incrementó los contenidos de C y N del suelo, logrando alto rendimiento de grano seco de maíz con 6.5 t.ha⁻¹. El T5, donde se complementó el AV con fertilización órgano- sintética, logró por un lado incrementar C y N en el suelo y, por el otro, el mayor rendimiento de grano seco con 7.0 t.ha⁻¹.

Por su parte, el uso de la práctica de AO favoreció la protección del suelo al generar una barrera protectora que impidió desprendimiento masivo de partículas y arrastre por la pendiente. Sin embargo, a diferencia del AV el AO se descompone más lentamente por menor superficie de contacto con los organismos del suelo, factor que incidió sobre reducción de contenidos de C y N en los primeros centímetros. Algunos autores indican que el AO durante los primeros días genera imbibición de nutrientes del suelo e impide que estos estén disponibles en solución (Blanchart et al., 2006; Navia, 2006). Sin embargo, esto no afectó el rendimiento del maíz, que logró valores significativamente

altos en T6 y T7 con 6,5 y 6,8 t.ha⁻¹, respectivamente. El entendimiento de los procesos ligados a prácticas agroecológicas de cultivo como los AV y AO de leguminosas permiten identificar itinerarios acordes con las condiciones socioeconómicas y ambientales de los pequeños productores de maíz de zona de ladera.

Vélez (2012) evaluó el efecto de abonos verdes sobre la micorrización y el rendimiento en grano seco de maíz en zona de ladera del municipio de Palmira (Colombia). El ensayo se realizó en la Vereda El Mesón (3° 30' 1,4" N y 76° 11' 0,2" W) con 1713 m s. n. m., 1396 mm de precipitación media anual, 20 oC de temperatura y 74.4 % de humedad relativa. El suelo clasificado como *Humic Dystrudepts* con pendiente de 30 %, textura arcillo limosa, pH 5,6 y 7.4 % de MO. En diseño experimental de bloques completos al azar y tres réplicas se establecieron los tratamientos en el cultivo de maíz -Var ICA V-354: (T1) testigo: suelo sin ningún tipo de fertilización, (T2) fertilización sintética NPK 10-30-10 en dosis de 4 g.planta⁻¹, (T3) abono verde (AV) compuesto de *Canavalia ensiformis* L. y *Axonopus scoparius* F. en dosis de 11,2 kg.parcela⁻¹, (T4) fertilización orgánica con compost en dosis de 6 kg.parcela⁻¹, y (T5) abono verde (AV) compuesto de *Canavalia ensiformis* L. y *Axonopus scoparius* F. en dosis de 17.2 kg.parcela⁻¹ + compost en dosis de 6 kg.parcela⁻¹. La densidad de siembra de maíz fue de 50 000 plantas. ha⁻¹. Noventa días después de la siembra se evaluó el porcentaje de colonización por arbusculos de hongos micorrícicos arbusculares HMA en maíz, la longitud del micelio externo de HMA y su fracción vital. En cosecha, se evaluó el rendimiento de grano seco de maíz (14 % de humedad) como lo muestra la tabla 5.3.

TABLA 5.3 Porcentaje de colonización, longitudes de micelio externo y micelio activo de hongos micorrícicos arbusculares HMA asociados al cultivo de maíz. Vereda El Mesón, municipio de Palmira (Colombia). Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos mediante prueba de Duncan ($p < 0.05$)

Tratamiento	Colonización por arbusculos (%)	Longitud micelio externo de HMA (m.gss ⁻¹)	Longitud micelio externo activo de HMA (m.gss ⁻¹)	Rendimiento grano seco maíz (t.ha ⁻¹)
T1	3.7 b	4.2 c	2.1 bc	0.35 c
T2	0.8 c	2.1 d	0.3 c	1.95 a
T3	5.0 b	6.8 b	3.9 ab	0.70 bc
T4	3.9 b	7.1 b	2.5 b	0.40 c
T5	8.2 a	11.7 a	5.9 a	1.10 b

Fuente: Vélez (2012)

El T1 donde se sembró maíz sin ningún tipo de adición de AV o fertilizante registró baja colonización de HMA en maíz, como también reducida longitud de micelio externo y activo, lo que se tradujo finalmente en bajo rendimiento de grano seco. Esto se debió a la baja fertilidad del suelo, que condicionó la absorción de nutrientes por parte de la planta de manera directa o mediante asociación micorrícica. En inceptisoles, como el del estudio de caso, uno de los elementos con baja disponibilidad en el suelo es el P, siendo en muchas ocasiones necesario incorporarlo al sistema mediante fertilización, en lo posible mineral (roca fosfórica), ya que adicionalmente por su condición de cales pueden favorecer el incremento del pH del suelo.

Por su parte, el T2, donde se adicionó fertilizante de síntesis al maíz, redujo notablemente la colonización de HMA en maíz y su actividad sobre absorción de P desde la solución del suelo. Algunos investigadores han registrado descensos notables de la actividad simbiótica micorrícica en diferentes cultivos con motivo de la aplicación de fertilizantes sintéticos y consecuente disponibilidad de nutrientes (Kabir et al., 1998; Gryndler et al., 2006). Sin embargo, en este estudio la baja actividad de HMA en maíz no limitó el rendimiento de grano seco que logró en el T2 $1.95 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, significativamente mayor a los demás tratamientos.

El uso de AV complementado con fertilización orgánica en el T5 obtuvo la mayor actividad de HMA en maíz en términos del porcentaje de colonización, longitud de micelio externo y activo. La adición de compost a los restos vegetales de *C. ensiformis* L. y *A. scoparius* F. tuvo un efecto aparente sobre la mineralización de compuestos orgánicos con posterior disponibilidad de nutrientes en el suelo que fueron absorbidos por la planta de maíz en asocio con HMA nativos. Algunos autores registran incrementos en la actividad microbiana del suelo con la adición de abonos orgánicos, con consecuente liberación de nutrientes (Gryndler et al., 2006; Navia, 2006; Sánchez et al., 2010). La absorción de nutrientes esenciales como N y P en maíz se tradujo al final en rendimiento de grano seco con $1.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Estos resultados muestran las bondades de la mezcla de AV complementada con fertilización orgánica sobre el aporte de nutrientes y activación de simbiosis rizosférica en suelos de baja fertilidad, siendo alternativas sustentables.

5.5.3 INTERCULTIVO MAÍZ- SOYA EN ZONA PLANA

Sanclemente (2013) evaluó el efecto del AV *M. pruriens* Var. Utilis en mezcla con residuos frescos de maíz sobre el rendimiento en grano del intercultivo maíz-soya en el municipio de Candelaria-Valle del Cauca (Colombia). El ensayo se realizó en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia ($3^{\circ} 24' 12'' \text{ N}$; $76^{\circ} 26' 15'' \text{ W}$) con 990 m s. n. m., 1030 mm de precipitación media anual, 26 oC de temperatura y 75 % de

humedad relativa. El suelo clasificado como *Typic Haplustert*, textura franco arcillosa, pH 7,2 y 2,0 % de MO. Durante el mes de agosto de 2011 se estableció el intercultivo M. pruriens- maíz en surcos 1X1 y se cosechó maíz choclo a 90 dds. En enero de 2012 se emplearon los residuos vegetales como AV y AO. En parcelas alledañas se emplearon los residuos vegetales del barbecho (BA) predominante de la zona Rottboelia cochinchinensis (Lour.). En diseño experimental de bloques y arreglo en parcelas divididas y tres repeticiones se establecieron tratamientos previos a la rotación con intercultivo maíz-soya. En parcelas principales se emplearon los residuos vegetales y en subparcelas se usó fertilización adicional. (T1) AV mezcla M. pruriens y maíz + 3.4 t.ha⁻¹ de compost, (T2) AV mezcla M. pruriens y maíz + 334 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 15-15-15, (T3) AV mezcla M. pruriens y maíz sin fertilización adicional, (T4) AO mezcla M. pruriens y maíz + 3.4 t.ha⁻¹ de compost, (T5) AO mezcla M. pruriens y maíz + 334 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 15-15-15, (T6) AO mezcla M. pruriens y maíz sin fertilización adicional, (T7) BA de R. cochinchinensis + 3.4 t.ha⁻¹ de compost, (T8) BA de R. cochinchinensis + 334 kg.ha⁻¹ de fertilizante NPK 15-15-15, y (T9) BA de R. cochinchinensis sin fertilización adicional.

En parcelas experimentales de 20 m² se sembró el intercultivo maíz Var. ICA V-305 a razón de 60 000 plantas.ha⁻¹ en surcos 1X1 con soya Var. ICA P-34 a razón de 200 000 plantas.ha⁻¹. Se evaluó el rendimiento de grano seco (14 % de humedad) de maíz y soya a 180 dds (figura 5.6). No se registraron diferencias significativas en el rendimiento de maíz para los tratamientos evaluados, posiblemente por la alta variabilidad espacial del suelo en el ensayo y la alta distancia de siembra entre surcos del maíz. Sin embargo, se pudo observar que el T8 (BA+NPK 15-15-15) obtuvo los valores más altos de rendimiento del cereal con 5,70 t.ha⁻¹ siendo 38 % superior al T9 (BA sin fertilizar), que registró los valores más bajos con 4,12 t.ha⁻¹. El uso de fertilizante de síntesis adicional en el BA logró incrementar el rendimiento de maíz; no obstante, esto no ocurrió con su adición en el AV y AO. Los valores de rendimiento en grano de maíz fueron inferiores al promedio local de 8,2 t.ha⁻¹ (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015).

El uso de fertilizante de síntesis adicional en el BA logró incrementar el rendimiento de maíz; no obstante, esto no ocurrió con su adición en el AV y AO.

FIGURA 5.6. Rendimiento de grano seco de maíz y soya ($t \cdot ha^{-1}$), Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia. Candelaria - Valle del Cauca. Las letras en las barras indican diferencias estadísticamente significativas, mediante prueba de Tukey ($p < 0.05$)



Fuente: Sanclemente (2013)

En el caso de soya, se registraron diferencias significativas para la variable rendimiento de grano entre tratamientos. El T6 (AO sin fertilizar) obtuvo los valores más altos con $2,47 t \cdot ha^{-1}$, cerca de 2,1 veces el rendimiento del T9, donde se empleó el BA. Estos resultados indican el efecto del aporte de residuos de calidad al suelo como ocurrió con la mezcla de *M. pruriens* y maíz, comparados con el barbecho *R. cochinchinensis*. El uso de fertilización adicional en el AO incidió negativamente en el rendimiento de grano, posiblemente por afectación de la simbiosis con rizobios nativos para la fijación de N_2 , que se ve limitada por la disponibilidad de N inorgánico en el suelo (Salviaggiotti et al., 2008; Lau et al., 2012). Los valores de rendimiento de grano seco de T4 y T6 fueron cercanos al promedio regional con $2,5 t \cdot ha^{-1}$ (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, 2015). El T6 obtuvo los valores más altos de rendimiento combinado de granos de maíz y soya con $7,82 t \cdot ha^{-1}$. Estos resultados muestran las bondades del uso de tecnologías como los AO provenientes de mezclas leguminosas-gramíneas sobre la fertilidad del suelo y aporte al rendimiento combinado de intercultivos en rotación como maíz- soya.

5.6 CONCLUSIONES

La materia orgánica estable MOS es un componente fundamental de la fase sólida del suelo. La MOS aporta a la fertilidad química, física y biológica del suelo, siendo indicadora además de otras propiedades emergentes como la salud, resiliencia y sustentabilidad del agroecosistema. Las tecnologías agroambientales descritas en este capítulo emplean la energía solar para producción biomásica, al tiempo que potencian interacciones biológicas en el agroecosistema, favoreciendo la gestión de la MOS mediante el reciclaje de carbono y nutrientes vía procesos como la mineralización y la humificación. En estas tecnologías se destaca el uso de leguminosas con alta capacidad adaptativa como precursoras de la MOS cuando se emplean como cultivos de cobertura, abonos verdes o acolchados orgánicos, en sistemas de cultivos industriales como el caso de maíz, soya y caña de azúcar. De esta manera se favorece la economía del cultivo y se reducen impactos ambientales que implican el uso de sustancias de síntesis química, lo que aporta al desarrollo del sector agropecuario y su sostenibilidad.



Las tecnologías agroambientales descritas en este capítulo emplean la energía solar para producción biomásica, al tiempo que potencian interacciones biológicas en el agroecosistema, favoreciendo la gestión de la MOS mediante el reciclaje de carbono y nutrientes vía procesos como la mineralización y la humificación.

5.7 REFERENCIAS

Altieri, M. y Liebman, M. (1986). Insect, Weed and Plant Disease Management in Multiple Cropping Systems. En C. Francis (Ed.), *Multiple Cropping Systems* (pp. 183-218). Macmillan.

Altieri, M. y Nicholls, C. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Revista Ecosistemas*, 16(1), 3-12.

Álvarez, L., Polanco, D. y Ríos, L. (2014). Reflexiones acerca de los aspectos epistemológicos de la agroecología. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 11(74), 55-74. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.CRD11-74.raea>

Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia. (2012). Historia del sector azucarero. *Sector Industrial de la Caña*. <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=8>

Benavides, J., Quintero, G. y Ostos, O. (2006). Aislamiento y caracterización de diez cepas bacterianas desnitrificantes a partir de un suelo agrícola contaminado con abonos nitrogenados proveniente de una finca productora de cebolla en la Laguna de Tota, Boyacá, Colombia. *Revista Nova*, 4(6), 50-54.

Bethlenfalvay, G., Reyes, M., Camel, S. y Ferrera, R. (1991). Nutrient transfer between the root zones of soybean and maize plants connected by a common mycorrhizal mycelium. *Physiologia Plantarum*, 82(3), 425-432.

Blanchart, E., Villenave, C., Vierratoux, A., Barthès, B., Girardin, C., Azontonde, A. y Feller, C. (2006). Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal Soil Biology*, 42(1), 136-144.

Caicedo, J. (2011). *Evaluación de la actividad biológica mediante el indicador de túriculos de lombriz en cultivos de caña de azúcar orgánico bajo la aplicación de vinaza y lodos de vinaza*. (Ingenio Providencia, El Cerrito - Valle del Cauca) (tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Palmira, Colombia.

Centro Internacional de Información sobre Cultivos de Cobertura. (2003). *Catálogo de Abonos verdes/cultivos de cobertura (CCAV), empleados por pequeños productores de los trópicos*. CIDICCO.

Cerón, L. y Aristizábal, F. (2012). *Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. (2006). *Soya (Glycine max L. Merrill). Alternativa para los sistemas de producción en la Orinoquía colombiana*. CORPOICA.

Cuero, R. (2012). Hacia un sistema complementario de producción más limpia en suelos degradados por salinidad. *Ambiente y Sostenibilidad*, (2), 59-68.

Da Costa, M., Calegari, A., Mondardo, A., Bulisani, E., do Prado, L., Alcântara, P., Miyasaka, S. y Amado, T. (1993). *Adubação verde no sul do Brasil*. AS-PTA.

Dávalos, E. (2007). La caña de azúcar: ¿una amarga externalidad? *Desarrollo y Sociedad*, (59), 117-164.

Davidson, E., David, M., Galloway, J., Goodale, C., Haeuber, R., Harrison, J., Howarth, R., Jaynes, D., Lowrance, R., Nolan, B., Peel, J., Pinder, R., Porter, E., Snyder, C., Townsend, A. y Ward, M. (2012). Exceso de Nitrógeno en el Medio Ambiente de EUA: Tendencias, Riesgos y Soluciones. Sociedad de Ecología de América. *Tópicos en Ecología*, (15), 1-18.

Delgado, M., Casella, S. y Bedmar, E. (2007). Denitrification in Rhizobia-Legume Symbiosis. En H. Bothe, S. Ferguson y W. Newton (Eds.), *Biology of the Nitrogen Cycle* (pp. 83-91). Elsevier.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2013). *Cuenta satélite piloto de la agroindustria (CSPA): Maíz, sorgo, soya y su primer nivel de transformación 2005-2009*. DANE.

Döring, T., Pautasso, M., Finckh, M. y Wolfe, M. (2012). Concepts of plant health – reviewing and challenging the foundations of plant protection. *Plant Pathology*, 61(1), 1-15.

Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas. (2015). Área, Producción y Rendimiento de Cereales y Leguminosas 2015 A. *Indicadores cerealistas*. FENALCE.

Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas. (2017). Coyuntura cerealista y de leguminosas. *Revista El Cerealista*, (121), 34-54.

Ferguson, B., Morales, H., González, A., Íñiguez, F., Martínez, M., McAfee, K., Nigh, R., Perfecto, I., Philpott, S., Soto, L., Vandermeer, J., Vidal, R., Ávila, L., Bernardino, H. y Realpozo, R. (2009). Bosques, Agricultura y Sociedad: Cultivando Nuevas Alianzas. En M. Altieri (Ed.), *Vertientes del Pensamiento Agroecológico: Fundamentos y Aplicaciones* (pp. 183-205). Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología.

Figuroa, A., Álvarez, J., Forero, A., Salamanca, C. y Pinzón, L. (2012). Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. *Revista Temas Agrarios*, 17(1), 32-43.

Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2), 32-41.

Francis, C., Flor, C. y Prager, M. (1978). Effects of Bean Association on Yields and Yield Components of Maize. *Crop Science Society of America*, 18(5), 760-764.

Francis, C. (1989). Biological efficiency in multiple-cropping Systems. En N. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 42, pp.1-42.). Academic Press.

Funes, F. (2009). *Agricultura con futuro: La alternativa agroecológica para Cuba*. Estación Experimental “Indio Hatuey”.

Galloway, J., Dentener, F., Capone, D., Boyer, E., Howarth, R., Seitzinger, S., Asner, G., Cleveland, C., Green, P., Holland, E., Karl, D., Michaels, A., Porter, J., Townsend, A. y Vorosmarty, C. (2004). Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, (70), 153-226.

Gliessman S (2001) *Agroecología. Processos Ecologicos em Agricultura Sustentável*. Editora da Universidade.

Gryndler, M., Larsen, H., Hřselová, V., Řezáčová, H., Gryndlerová, H. and Kubát, J. (2006). Organic and mineral fertilization, respectively, increase and decrease the development of external mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in a long-term field experiment. *Mycorrhiza*, 16(3), 159-166.

Gutiérrez, J. y Gómez, W. (2015). *Respuesta fisiológica del frijol caupí *Vigna unguiculata* L., utilizado como abono verde en cultivo asociado con caña de azúcar *Saccharum**

officinarum L., en suelos Pachic Haplustolls del municipio El Cerrito- Valle del Cauca (tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Palmira, Colombia.

Hirsch, P.R. (1996). Population dynamics of indigenous and genetically modified rhizobia in the field. *New Phytologist*, 133(1), 159-171.

Horwath, W. (2007). Carbon Cycling and Formation of Soil Organic Matter. En E. Paul, *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Elsevier

Juge, C., Prevost, D., Bertrand, A., Bipfubusa, M., and Chalifour, F. P. (2012). Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with Bradyrhizobium, Azospirillum and arbuscular mycorrhizae. *Applied Soil Ecology*, 61, 147-157.

Kabir, Z., O'halloran, I., Fyles, J., Hamel, C. (1998). Dynamics of the mycorrhizal symbiosis of corn (*Zea mays* L.): effects of host physiology, tillage practice and fertilization on spatial distribution of extra-radical mycorrhizal hyphae in the field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 68(1-2), 151-163.

Koops, H., Purkhold, U., Pommerening, A., Timmermann, G. y Wagner, M. (2003). The Lithoautotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria. M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. Schleifer y E. Stackebrandt (Eds.), *The Prokaryotes* (pp. 778-811). Springer.

Labrador, J. (2012). Avances en el conocimiento de la dinámica de la materia orgánica dentro de un contexto agroecológico. *Agroecología*, 7(1), 91-108.

Lau, J., Bowling, E., Gentry, L., Glasser, P., Monarch, E., Olesen, W., Waxmonsky, J. y Young R. (2012). Direct and interactive effects of light and nutrients on the legume-rhizobia mutualism. *Acta Oecologica*, 39, 80-86.

Lotter, D. (2003). Organic agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 21(4), 59-128.

Martínez, E., Fuentes, J. y Acevedo, E. (2008). Soil organic carbón and soil properties. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96.

Meghvansi, M. K., Prasad, K., Harwani, D., and Mahn, A. (2008). Response of soybean cultivars toward inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium japonicum in the alluvial soil. *European Journal of Soil Biology*, 44(3), 316-323.

Navia, J. (2006). *Impacto de aportes superficiales de biomasa vegetal de diferente calidad sobre poblaciones de nematodos, hongos formadores de micorriza arbuscular*

(HMA) y rizobios en un suelo agrícola de Santander de Quilichao (Departamento del Cauca) (tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Colombia.

Nicholls, C., Altieri, M. y Vázquez, L. (2015). Agroecología: Principios para la conversión y el rediseño de sistemas agrícolas. *Revista Agroecología*, 10(1), 61-72.

Orlando, J., Carú, M., Pommerenke, B. y Braker, G. (2012). Diversity and Activity of Denitrifiers of Chilean Arid Soil Ecosystems. *Frontiers in Microbiology*, 3, 1-9.

Pérez, M., Peña, M. y Álvarez, P. (2011). Agro-industria cañera y uso del agua: Análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Revista Ambiente & Sociedade*, 14(2), 153- 178.

Pérez, J. y Lodeiro, A. (2013). Two effects of combined nitrogen on the adhesion of *Rhizobium etli* to bean roots. *Symbiosis*, 59, 157-163. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13199-013-0229-z#page-1>

Prager, M., Sanclemente, Ó., Sánchez, M., Gallego, J. y Ángel, D. (2012). Abonos verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. *Agroecología*, 7(1), 53-62.

Resolución 439 de 2017 [Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural]. Apoyo a la comercialización de maíz blanco cosechado en el segundo semestre de 2017 de los departamentos de Tolima, Meta y Valle del Cauca. 20 de diciembre de 2017.

Ridner, E. (2006). *Soja, propiedades nutricionales y su impacto en la salud*. Grupo Q S.A.: Sociedad Argentina de Nutrición.

Robertson, G. y Groffman, P. (2007). Nitrogen Transformations. En E. Paul, *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (pp. 341-364). Elsevier.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C., Hughes, T., Van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R., Fabry, V., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. y Foley, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Journal Ecology and Society*, 14(2), 32-41.

Salmi, A., Guerra, J., Abboud, A. y Gonçalves, M. (2013). Avaliação agrônômica da rebrota, dinâmica de decomposição e liberação de nutrientes de flemingia (*Flemingia macrophylla* (Willd.) Kuntze ex Merr.). *Revista Ceres*, 60(5), 735-743.

Salgar, L. (2004). El cultivo de maíz en Colombia. *Revista Semillas*, (22/23), 2-7.

Salvagiotti, F., Cassman, K.G, Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A., & Dobermann, A. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108(1), 1-13.

Sánchez, M., Gómez, E., Muñoz, J., Barrios, E., Prager, M., Bravo, N., Mabrouk, E., Pérez, J., Azakawa, N., Marmolejo, F., Cadavid, L., Quintero, R., Miranda, J., Mier, C., Torres, R., Trinidad, J., Zapata, C., Tofiño, R., Benjumea, C., Díaz, G., Trujillo, L., Bonilla, F., Espinosa, J., Rodríguez, H., García, H., Triana, W., Carlosama, C. y Vargas, N. (2007). *Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

Sánchez, M., Posada, R., Velásquez, D. y Narváez, M. (2010). *Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

Sánchez, M., Prager, M., Naranjo, R. y Sanclemente Ó. (2012). El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología*, 7(1), 19-34.

Sanclemente, Ó. y 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. *Revista Brasileira de Agroecología*, 4(2), 4133-4138.

Sanclemente, Ó. (2009). *Efecto del cultivo de cobertura: Mucuna pruriens, en algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo Typic haplustalfs, cultivado con maíz (Zea mays L.) en zona de ladera del municipio de Palmira, Valle (Colombia)* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

Sanclemente, Ó. (2013). *Efecto de Mucuna pruriens asociada a una gramínea, 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, Palmira. Colombia.

Sanclemente, Ó., Prager, M. y Beltrán, L. (2013). Aporte de Nitrógeno al suelo por *Mucuna pruriens* y su efecto sobre el rendimiento de maíz dulce (*Zea mays* L.). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 149-155. <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/978/961>

Sanclemente, Ó, Ararat, M. y De la Cruz, C. (2015). Contribución de *Vigna unguiculata* L. a la sustentabilidad de sistemas de cultivo de caña de azúcar. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 47-55.

Sanclemente, Ó. y Ararat, M. (2017). Consideraciones tecnológicas para el manejo agronómico sostenible de maíz en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/1770/2003>

Sanclemente, Ó, Yacumal, V. y Patiño, C. (2017). Solubilización de fosfatos por bacterias nativas aisladas en tres agroecosistemas del Valle del Cauca (Colombia). *Revista Temas Agrarios*, 22(2), 62-70. <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/945>

Sarandón, S. y Flores, C. (2014). *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. Editorial de la Universidad de La Plata.

Vélez, F. (2012). *Efecto de abonos verdes en la agregación y micorrización en el cultivo de maíz (Zea mays L.) en un suelo de ladera de Palmira (Colombia)* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

Vélez, F. y Sánchez, M. (2014). Dinámica de los hongos de Micorriza Arbuscular (MA) en un Humic Dystrudepts sembrado con maíz *Zea mays* L. y Abonos Verdes (AV). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 69-79. <https://doi.org/10.22490/21456453.915>

Villanueva, E. y Quintana, A. (2012). Aislamiento y selección de bacterias nativas de rizobios fijadores de nitrógeno, a partir de nódulos radiculares de *Phaseolus vulgaris*. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Biológicas*, 32(1), 24-30.

Viveros (2017). Cinco años del TLC de Colombia con Estados Unidos: Balance sector maicero. *Revista El Cerealista*, (121), 13-15.

Wang, W., Dalal, R. y Moody, P. (2004). Soil carbon sequestration and density distribution in a Vertosol under different farming practices. *Australian Journal of Soil Research*, 42(8), 875-882.

Wolz, K. y DeLucia, E. (2018). Alley cropping: Global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 61-68.

Zúñiga, O., Osorio, J., Cuero, R. y Peña, J. (2011). Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos Degradados por Salinidad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín Medellín*, 64(1), 5769-5779.