

ASOCIACIÓN DE ESPECIES ARBÓREAS FORRAJERAS PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD Y EL RECICLAJE DE NUTRIMENTOS*

FODDER TREE SPECIES IN ASSOCIATION TO IMPROVE PRODUCTIVITY AND NUTRIENTS CYCLING

Judith Petit Aldana^{1§}, Fernando Casanova Lugo¹ y Francisco Javier Solorio Sánchez¹

¹Cuerpo Académico de Producción Animal en Agroecosistemas Tropicales. Campus - Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Carretera Mérida-Xmatkuil, km. 15.5 C. P. 97100, Mérida, Yucatán, México. Tel. 01 99 99 42 32 00 y 9423205, (fkzanov@gmail.com) (ssolorio@uady.mx). [§]Autora para correspondencia: jcpetita@ula.ve.

RESUMEN

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica relacionada con la asociación de especies arbóreas forrajeras para mejorar la productividad y el reciclaje de nutrientes en agroecosistemas. Los temas tratados abarcan la situación actual de los sistemas de producción y las alternativas para mejorar su eficiencia. Asimismo, se discute acerca de la contribución de los sistemas agroforestales al ciclo de nutrientes y su mejoramiento a través de estrategias de manejo, también se analizan algunos trabajos realizados en plantaciones forestales mixtas y su aporte en la fertilidad de los suelos, reciclaje de nutrientes y fijación biológica de nitrógeno. Se concluye que, la asociación de especies arbóreas forrajeras puede contribuir a la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas, ya que estas adquieren elementos de alto valor nutricional que ayudan a mejorar la fertilidad del suelo; producen materia orgánica de alta calidad para un eficiente reciclaje de nutrientes, lo que podría incrementar la productividad. De igual forma, se fundamenta que las asociaciones con leguminosas arbóreas establecen simbiosis con microorganismos que mejoran la disponibilidad de elementos en el suelo. Por otra parte, lo anterior no sólo depende de las especies, si no también de los recursos disponibles en el sitio y del manejo del agroecosistema. Sin embargo, aun existen vacíos de

investigación en este tema, puesto que la mayoría de trabajos se han realizado para especies arbóreas maderables en plantaciones forestales.

Palabras clave: forraje, producción, reciclaje de nutrientes.

ABSTRACT

A bibliographical review was made related to the association of fodder tree species for improving the productivity and nutrients recycling in agroecosystems. The covered topics include the situation of actual production systems and strategies to improve their efficiency. Also, the contribution of agroforestry systems in nutrient cycling and their improvement through management is discussed. Documents on mixed forest plantations and their role in soil fertility, nutrient cycling and biological nitrogen fixation, were also analyzed. It was concluded that fodder tree species in association can contribute to the productivity and sustainability of agroecosystems, since they take up nutrients of high nutritional value and contribute towards the improvement of soil fertility, they produce litter of high-

* Recibido: Enero, 2008
Aceptado: Marzo, 2009

quality in an efficient nutrient recycling, that can improve productivity. Furthermore associations of legumes trees species in symbiosis with microorganisms upgrade the availability of soils nutrients. On the other hand, the above-mentioned facts do not depend exclusively on the species, but on the resources available and the management of the agroecosystem. Moreover, there is a lack of research studies in this topic, since most research has been conducted in wooden species in forest plantations.

Key words: fodder, production, nutrient cycling.

INTRODUCCIÓN

La asociación de especies leñosas forrajeras para la alimentación animal es una práctica antigua. Sin embargo, recientemente ha cobrado mayor atención debido a la creciente necesidad de buscar alternativas locales, que reduzcan la dependencia de insumos externos y minimicen daños sobre los recursos naturales.

Algunas leguminosas producen alimentos ricos en proteínas. En ciertas circunstancias los árboles pueden producir más forraje que los cereales, caso del algarrobo de las zonas secas del norte de África. Los árboles y los arbustos pueden contribuir a asegurar una dieta nutritiva para el ganado. Muchos árboles forrajeros son originarios de zonas áridas y semiáridas, donde las condiciones del medio son difíciles para el cultivo de los pastos tradicionales; y en estos casos los animales no podrían sobrevivir, sin embargo el pastoreo depende exclusivamente de estos árboles (National Academy of Sciences, 1979).

En muchas zonas tropicales donde la estacionalidad del clima concentra las labores de arado y siembra en la estación lluviosa, se necesitan muchos más animales de los que pueden mantenerse con los alimentos producidos dentro del sistema agrícola. Esto hace que el agricultor tenga acceso a pastos o forrajes fuera de la explotación agrícola, en este caso los bosques y matorrales son a menudo la principal fuente suplementaria de alimentos, y es allí donde los árboles forrajeros toman un papel fundamental en la alimentación animal (Petit, 1994).

Por lo tanto, cada vez se presta más atención a las relaciones existentes entre las actividades forestales comunitarias y la obtención de forraje: el potencial de

aumentar los suministros de forraje derivado de árboles y bosques, y la necesidad de no interrumpir los suministros actuales de forraje, así como las interacciones entre agricultura y ganadería cuando la tierra se dedica a la silvicultura (National Academy of Sciences, 1979).

Lo anterior, forma parte del panorama mundial del manejo y uso de la tierra, en donde el papel del árbol como estabilizador de suelos no ha sido tomado en cuenta. Muchos árboles restablecen al suelo los nutrientes que habían absorbido los cultivos, y como protegen el humus, salvaguardan los suministros de fertilizantes naturales (Petit, 1994).

En muchas zonas de los trópicos subhúmedos y semiáridos, la producción ganadera se ve seriamente limitada por la escasez y la baja calidad de forraje durante la estación seca. El bajo contenido de proteína cruda es la limitación más común de la producción ganadera de los pastos nativos y algunos sistemas se han desarrollado para complementar o mejorar la ingesta de proteína cruda de los animales que pastorean en pastos nativos mediante el acceso, ya sea por temporadas o todo el año. Para ello se establecen áreas sembradas de leguminosas arbóreas tropicales que forman lo que se conoce como un banco de proteínas. Esta forma de disposición de una alta calidad de forraje para el ganado se ha utilizado con éxito utilizando *Leucaena leucocephala* como suplemento alimenticio para el ganado en pastos nativos (Solorio y Solorio, 2002).

En África y la India, los ganaderos confían excesivamente en el pastoreo y el ramoneo como suplemento alimenticio, particularmente en los últimos meses de la larga estación seca que conlleva la escasez de alimentos. Por ejemplo, se estimó para Botswana que 25% de la dieta anual del ganado fue compuesta por ramoneos en árboles y arbustos, también se observó que durante los meses de mayor sequía del año, este consumo se eleva a un 45% y representa esencialmente toda la proteína adquirida por los animales (National Academy of Sciences, 1979).

Esta revisión discute los aspectos más importantes de los sistemas asociados de especies arbóreas, los cuales requieren de estrategias de manejo adecuadas que puedan interactuar conjuntamente para lograr un nivel equilibrado de productividad. Por ello, es oportuno explicar las técnicas de manejo eficiente de los nutrientes, que se emplean como indicadores para

determinar la productividad y sustentabilidad de los sistemas agropecuarios. En este sentido, la búsqueda y fomento de prácticas tendientes a maximizar la productividad y eficiencia en el reciclaje de nutrientes se hace indispensable.

Situación actual de los sistemas de producción y alternativas

El continuo crecimiento poblacional y la demanda por alimento han sobrepasado la capacidad de los suelos para mantener la productividad de manera constante, lo que ha ocasionado la degradación ambiental poniendo en riesgo la estabilidad productiva de los sistemas agropecuarios (Craswell *et al.*, 2004). El problema de la fertilidad de suelos se encuentra estrechamente relacionado con un balance negativo de nutrientes y es uno de los principales problemas a los que se enfrentan los sistemas de producción agropecuarios (Craswell *et al.*, 2004). El balance de nutrientes, es decir, la diferencia entre las entradas y salidas de un sistema, es negativo en casi todos los sistemas de producción actuales tradicionales (Powell *et al.*, 2004).

La remoción excesiva y constante de vegetación en el caso de la ganadería resulta en un desbalance de nutrientes dejando los suelos sin suficientes reservas para mantenerse productivos. El problema se agudiza cuando los nutrientes “cosechados” no son, aunque sea en parte, regresados a su lugar de origen tal es el caso de la ganadería extensiva con base en pastizales. Estos aunque se mantienen productivos los primeros años son de mala calidad, principalmente deficientes en nitrógeno (N) e insuficientes en la época de secas, ya que declinan drásticamente su productividad. Numerosos estudios en los trópicos han concluido que la proteína y la energía son los principales elementos que limitan la producción de los sistemas agropecuarios basados en pastos (Ku-Vera *et al.*, 1999).

Es de primordial importancia mantener la productividad de los sistemas incorporando estrategias tendientes a mejorar la fertilidad del suelo por medio de un reciclaje más eficiente de nutrientes entre los diferentes componentes de un sistema agroforestal. Estos sistemas deben tener el potencial de aportar nutrientes a los sistemas de producción animal principalmente de proteína, ya que es considerada el factor principal que limita la producción animal en los trópicos (Nair *et al.*, 1999).

Las especies arbustivas juegan un papel principal en la fertilidad de los suelos ya que incorporan N atmosférico y reciclan cantidades significativas de nutrientes por medio de producción e incorporación de hojarasca al suelo (Chikowo *et al.*, 2006; Sileshi y Mafongoya, 2007). Estudios recientes indican que las arbustivas cuando crecen en callejones producen aproximadamente 20 t por ha de MS al año contenido alrededor de 358 kg de N, 28 kg de P, 232 kg de K y 144 kg de Ca (Palm, 1995). Las leguminosas como *Leucaena* (Huaxim) tienen la capacidad de liberar en un tiempo corto más de 50% del contenido total de nutrientes como el N, K y el P cuando se incorporan al suelo (Bossa *et al.*, 2005), lo cual indica la excelente calidad de la biomasa que estas especies poseen para ser utilizadas en la recuperación de suelos degradados.

El asociar especies podría ser una estrategia para mejorar la fertilidad del suelo como es el caso de asociar especies fijadoras de N atmosférico con especies no leguminosas. Datos exploratorios indican que la mezcla del follaje de especies de diferente calidad con una relación C/N baja puede favorecer la descomposición el follaje de otra especie de baja calidad, adicionalmente fomentan significativamente el reciclaje de nutrientes en sistemas de cultivos asociados (Forrester *et al.*, 2005).

Sin embargo, la dinámica de estos nutrientes y como pueden estar relacionadas estas diferencias en tasa descomposición son aún desconocidas, ya que los estudios de producción y descomposición de materia orgánica (MO) de especies que crecen asociadas han sido escasos (Forrester *et al.*, 2006) pero con resultados muy prometedores en cuanto a la calidad y pertinencia en la liberación e incorporación de nutrientes al suelo ya que ocurre un mayor flujo de estos nutrientes causados principalmente por las diferencias en la composición química y propiedades físicas de la hojarasca originadas por las distintas especies (Hättenschwiler *et al.*, 2005).

Adicionalmente, las arbustivas como *L. leucocephala* y *Moringa oleifera* son especies de rápido crecimiento que producen considerables cantidades de biomasa de excelente calidad para alimentar animales (rumiantes y monogástricos), principalmente como suplemento de pasturas en la época de escasez (Gutteridge y Shelton, 1994). *Leucaena* puede fijar aproximadamente 70% del

N que necesita (Van Kessel *et al.*, 1994). Si se considera de que en sistemas asociados se incrementa los niveles de N por consiguiente también se incrementa el área foliar y la captura de luz y fotosíntesis y por tanto se incrementa la calidad y producción total del sistema (Smethurst *et al.*, 2003). Estudios agroforestales han mostrado que una gran proporción del N fijado puede ser transferido a las plantas no leguminosas asociadas (Crews y Peoples, 2005); sin embargo, los procesos que explican dichas interacciones entre especies arbóreas cuando estas se encuentran asociadas no han sido dilucidados del todo (Moyer-Henry *et al.*, 2006).

En el sistema suelo-planta, los nutrientes de la planta están en un estado de continua transferencia dinámica. Las plantas toman los alimentos del suelo y los utilizan para los procesos metabólicos. Algunas de las partes de la planta tales como hojas y raíces muertas vuelven al suelo durante el crecimiento vegetal, y dependiendo del tipo de utilización del suelo y de la naturaleza de las plantas, las partes de la planta son adicionadas al suelo cuando son cosechadas (Nair, 1993).

La hojarasca o biomasa agregada se descompone a través de los microorganismos del suelo, y los nutrientes que han sido confinados en las partes de las plantas son liberados al suelo donde llegan a estar una vez más disponibles para ser tomados de nuevo por las plantas. En sentido limitado, el ciclo de nutrientes se refiere a esta continua transferencia de nutrientes del suelo a la planta y de vuelta al suelo. En un sentido amplio el ciclo de nutrientes implica la continua transferencia de nutrientes dentro de los diferentes componentes del ecosistema e incluye procesos como: la meteorización de los minerales, actividades de la biota del suelo, y otras transformaciones que ocurren en la biosfera, atmósfera, litosfera e hidrosfera (Jordan, 1985).

Los sistemas agroforestales y otros sistemas basados en árboles son reconocidos como más eficientes en el ciclo de nutrientes que muchos otros sistemas, porque la presencia del componente leñoso sugiere efectos beneficiosos sobre el suelo. Estas leñosas perennes tienen, teóricamente, sistemas radiculares más extensos y profundos que las plantas herbáceas,

puesto que tienen un potencial para capturar y reciclar una gran cantidad de nutrientes. La contribución de la hojarasca a la superficie del suelo es probablemente mayor que aquella de las plantas herbáceas (Nair, 1993).

Contribución de los sistemas agroforestales al ciclo de nutrientes

Una representación esquemática del patrón general del ciclo de nutrientes en un sistema agroforestal en comparación con un sistema agrícola y un sistema forestal se muestra en la Figura 1. Se puede observar que los ciclos del N, P, K y otros elementos, varían considerablemente, y deben ser considerados en forma individual. No obstante, todos ellos tienen algunas características comunes tal como se indica en el modelo. El ciclo consiste de entradas (ganancias), salidas (pérdidas) y transferencia y retorno dentro del sistema. Las rutas de estas ganancias, pérdidas y transferencias también son similares: las entradas a través de fertilizantes, precipitación, polvo, materiales orgánicos fuera del sistema, y fijación de N, así como meteorización de las rocas (por otros elementos); las principales salidas se derivan de la erosión, percolación, y de la cosecha de los cultivos (para todos los nutrientes), desnitrificación y volatización (por N) y combustión (por N y S).

Los ecosistemas forestales representan ciclo de nutrientes en sistemas cerrados y eficientes, esto significa que estos sistemas tienen altas tasas de retorno y bajas tasas de pérdidas (así como también de ganancias), en otras palabras, son autosostenibles. Por otra parte, los sistemas agrícolas a menudo son abiertos o permeables, lo que significa que el retorno dentro del sistema es relativamente bajo y las pérdidas así como las ganancias son comparativamente altas. El ciclo de nutrientes en sistemas agroforestales está entre estos dos extremos, más nutrientes en el sistema son reusados por las plantas antes de que se pierdan del mismo. La principal diferencia entre sistemas agroforestales y otros usos de la tierra yace en la transferencia o retorno de los nutrientes dentro del sistema de un componente a otro, y de la posibilidad del manejo del sistema o sus componentes para facilitar el aumento de las tasas de retorno sin afectar la productividad total del mismo (Nair, 1993).

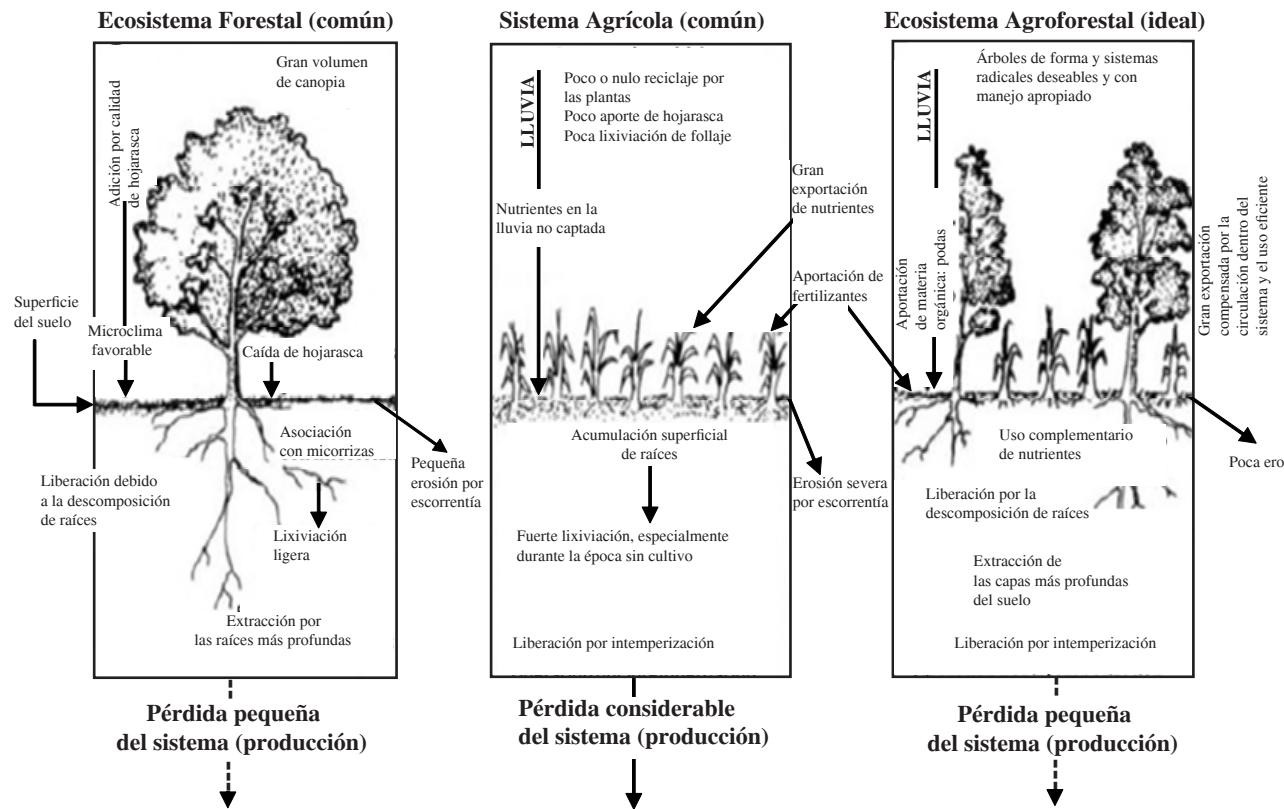


Figura 1. Representación esquemática de las relaciones de nutrientes y ventajas de un sistema agroforestal “ideal” en comparación con sistemas forestales y agrícolas. Fuente: Nair (1993).

Mejoramiento de la eficiencia del ciclo de nutrientes a través del manejo

Los sistemas agroforestales proporcionan una oportunidad para modificar el ciclo de nutrientes a través del manejo, cuando se comparan con sistemas agrícolas, el cual resulta en el uso más eficiente de los nutrientes del suelo, sin agregados externos (tal como los fertilizantes) o la disponibilidad a través de procesos naturales (e.g., la meteorización). Los mecanismos fundamentales que contribuyen a un eficiente ciclaje de nutrientes, así como también a otras consideraciones en sistemas agroforestales, las resume Nair (1993) a como sigue:

- 1) hay un potencial para mejorar la absorción de nutrientes desde los horizontes más profundos del suelo.
- 2) las ganancias de la fijación simbiótica de N por los árboles pueden ser mejoradas a través de la selección de especies de árboles y las mezclas de estos.
- 3) los nutrientes liberados desde la biomasa del árbol pueden ser sincronizados con los requerimientos del cultivo al controlar la calidad, cantidad, tiempo y método

de aplicación de las podas, como el abono, especialmente en cultivos en callejones.

4) prácticas de manejo que conducen a mejorar el estado de materia orgánica en el suelo, inevitablemente conducirán a mejorar el ciclo de nutrientes y la productividad del suelo. 5) otra consideración principal de manejo en agroforestería es la posibilidad de reducir la pérdida de nutrientos a través de métodos de conservación de suelos.

El papel de las plantaciones mixtas

Las plantaciones mixtas son plantaciones con dos o más especies, que pueden estar constituidas tanto por varias especies principales como por una o más especie(s) principal(es) asociadas a una o más especie(s) secundaria(s), sean éstas arbóreas o arbustivas.

Las plantaciones mixtas tienen el potencial de aumentar la producción de biomasa y el secuestro de carbono (Kaye *et al.*, 2000; Resh *et al.*, 2002; Binkley *et al.*, 2003; Bauhus *et al.*, 2004), así como otros beneficios, entre ellos la mejora de la fertilidad del suelo y el ciclaje de nutrientes (Binkley

et al., 2000; Montagnini, 2000), la protección contra plagas y enfermedades, y la conservación de agua (FAO, 1992; Montagnini, 2000). Además, pueden funcionar como un sistema silvicultural para la producción de madera de alto valor y una gama más amplia de productos (Keenan *et al.*, 1995; Montagnini *et al.*, 1995; De Bell *et al.*, 1997). Por lo tanto, las plantaciones mixtas, puede ser utilizada para satisfacer una amplia gama de objetivos económicos, silvicultura, y sostenibilidad. El éxito de una plantación mixta dependerá de los objetivos específicos del rodal. Por otra parte es difícil predecir qué combinaciones de especies conducirán a los aumentos en productividad en las plantaciones mixtas cuando no existe ninguna información. Esto depende no sólo de las cualidades de la especie, sino también de factores del sitio tales como disponibilidad del agua y de alimento (Forrester *et al.*, 2005).

La mayoría de los suelos pobres en el mundo son deficitarios en N y en P (Hussein Zahran, 1999). La fijación biológica de N (AFN) puede ser utilizada como una herramienta de mejora en esos casos. Las hojas de los árboles fijadores de N (AFN) se suelen usar para mejorar la fertilidad de suelos pobres ya sea en forma de mantillo o de abono verde; esta hojarasca suele ser de rápida descomposición aunque existen grandes diferencias entre géneros (Binkley y Giardina, 1997).

Cuando se utilizan AFN en sistemas agroforestales, la liberación de nutrientes desde la hojarasca debe estar en sincronía con la demanda del cultivo para obtener el beneficio buscado (Powell, 1995). En la rehabilitación de suelos agotados por actividades agrícola-ganaderas intensivas se han utilizado pasturas y cultivos perennes o anuales (Francis *et al.*, 1999) y también la reforestación con AFN como *Acacia mangium*, *Alnus* spp., *Casuarina* spp., *L. leucocephala*, *Mimosa scabrella* y *Paraserianthes falcataria* (Halenda, 1990; Halenda y Ting, 1993; Powell, 1995). El mayor crecimiento de los AFN respecto de los no fijadores puede generar en aquellos una mayor demanda de nutrientes del suelo, especialmente de N, P y Mg (Binkley y Giardina, 1997), situación que puede limitar su crecimiento.

En suelos infértilles de Malasia, abandonados por agricultura migratoria, *Acacia mangium* creció más que *L. leucocephala* y mostró una buena producción de hojarasca que contribuyó a estabilizar el sitio contra la erosión (Halenda, 1988). Por el contrario, experimentos realizados en suelos de India empobrecidos por décadas de deforestación y mal uso

de la tierra, permitieron concluir que no hay suficiente evidencia de que los árboles fijadores de N crezcan mejor que los no fijadores (Puri y Naugraiy, 1998, citado por Ferrari y Wall, 2004), aunque no se verificó si los árboles tenían nódulos o si estaban fijando N.

En suelos deficientes en N, la selección de genotipos puede ser importante dada la diversidad genética observada en algunas especies en cuanto a la FBN; en un experimento con *Casuarina* spp. las plantas de distintos orígenes inoculadas con *Frankia* tuvieron crecimiento más variable que las plantas bien fertilizadas con N mineral (Sanginga *et al.*, 1990).

Los AFN, pueden estimular el crecimiento de la vegetación vecina debido a la descomposición de sus hojas, a la exudación radicular de N fijado y a la intervención de las micorrizas (Binkley y Giardina, 1997).

En Puerto Rico, se realizó un estudio en plantaciones mixtas, entre *Casuarina equisetifolia*, *L. leucocephala* y *Eucalyptus robusta*. La mezcla *Casuarina-Leucaena* tuvo la mayor biomasa tras cuatro años de crecimiento mientras que la biomasa de *Eucalyptus* en la mezcla con *Leucaena* fue menor que en el monocultivo (Parrotta *et al.*, 1994), indicando que el beneficio de una mejor nutrición de N puede ser mitigado por competencia por otros nutrientes del suelo (Binkley y Giardina, 1997).

Los suelos de Hawái presentan limitaciones en N para el crecimiento de *Eucalyptus*, por lo cual se ensayan plantaciones mixtas con AFN. En la costa húmeda de Hamakua en Hawái (4 600 mm anuales de lluvia), *Eucalyptus saligna* creció más en cinco años en mezclas 50:50 con *Acacia melanoxylon* (acacia australiana) o con *Paraserianthes falcataria* que en la plantación pura. En otro experimento, la mezcla *Eucalyptus-Paraserianthes* (50:50) sin fertilización durante seis meses creció más que una plantación pura de *Eucalyptus* fertilizada cada 6 meses con N durante los tres primeros años. En cambio en la costa sudeste más seca (1 700 mm anuales) la mezcla no funcionó tan bien. Se concluye que en la costa húmeda la necesidad de fertilizar *Eucalyptus* con N después del primer año pudo ser reemplazada por plantaciones mixtas 50:50 con *Paraserianthes falcataria* (Schubert *et al.*, 1988; citado por Ferrari y Wall, 2004).

Otros experimentos realizados en Hawái, referidos por Binkley y Giardina (1997), demostraron que la productividad de las plantaciones mixtas dependería

de complejas interacciones entre el suministro de recursos y la eficiencia de uso de los mismos, así como de características propias de cada sitio.

Los tres tipos más importantes de interacciones que pueden presentarse en plantaciones mixtas son: la competencia, reducción de la competencia, y facilitación (Vandermeer, 1989; Kelty, 1992). La competencia se produce cuando las plantas interactúan y al menos una especie ejerce un efecto negativo sobre la otra (Vandermeer, 1989). La reducción de la competencia se produce cuando la competencia ínterespecífica por la limitación de recursos en la asociación es más débil que la competencia intra-específica en los monocultivos (Kelty y Cameron, 1995). Esto ocurre a menudo, cuando hay una repartición de los recursos, ya sea superficial (luz) o subterráneo (agua o nutrientes) (Kelty y Cameron, 1995; Casanova *et al.*, 2007).

La facilidad se produce cuando una especie tiene un efecto positivo en la otra especie (Vandermeer, 1989), por ejemplo, cuando las especies que fijan el N aumentan el crecimiento de otra especie. Las plantaciones de especies mixtas serán más productivas que los monocultivos, en el caso de que la facilitación y reducción de la interacción por competencia superen las interacciones competitivas.

Uno de los objetivos principales de la plantación de especies fijadoras de N con árboles como *Eucalyptus* spp, es aumentar la disponibilidad de N a través de la fijación simbiótica y la aceleración de las tasas del ciclaje de nutrientes. En un ensayo de plantaciones mixtas de *Eucalyptus globulus* y *Acacia mearnsii*, el aumento en la disponibilidad de nutrientes surgió a los 25 meses, cuando los incrementos en las concentraciones de N en el follaje senescente de *E. globulus* se produjo en las plantaciones mezcladas en comparación con las plantaciones puras (Khanna, 1997).

Existen varios mecanismos mediante los cuales la disponibilidad de N se haya incrementado para *E. globulus* en asociación con *A. mearnsii*: 1) las especies que no fijan N pueden utilizarlo después que la planta y los tejidos microbianos mueren y se descomponen expulsando el N para así completar su ciclo en el ecosistema (Van Kessel *et al.*, 1994; May y Attiwill, 2003); 2) también el N puede ser transferido entre las plantas vía exudación de la raíz o por las conexiones de las

micorizas entre los sistemas radiculares, cuando ambas especies forman simbiosis con las mismas micorizas. *Eucalyptus* spp. y *Acacia* spp. pueden formar simbiosis con los hongos de la micorriza arbuscular (Bellei *et al.*, 1992; Adjoud-Sadadou y Halli-Hargas, 2000).

Sin embargo, no hay evidencias que este proceso ocurra en mezclas de eucaliptos y de acacias; 3) porque las plantas fijadoras de N, a menudo dependen mucho del N fijado, el cual puede estar entre 10% hasta aproximadamente 100% del usado por la planta fijadora (Binkley y Giardina, 1997; Khanna, 1998; Fisher y Binkley, 2000; May y Attiwill, 2003) y así, más N puede estar disponible en el suelo para las plantas antes que N fijado sea ciclado y transferidos a los árboles de *Eucalyptus globulus*.

Las tasas de fijación de N son muy variables y en general son causadas por los mismos factores que afectan el crecimiento de las plantas (Danso *et al.*, 1992; Binkley y Giardina, 1997; Fisher y Binkley, 2000). Las altas tasas de fijación de N ($>50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se han estimado para muchas especies, por ejemplo, *L. leucocephala* y *Facaltaria moluccana* (Binkley, 1992; Binkley y Giardina, 1997; Khanna, 1998; Fisher y Binkley, 2000; May y Attiwill, 2003). Sin embargo, algunas especies fijadoras de N como *A. melanoxylon* parecen tener bajas tasas de fijación de N ($<10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y pueden no ser capaces de contribuir de manera significativa a la nutrición de las especies no fijadoras de N. La capacidad de facilitación de estas especies dependerá de sus habilidades para realizar el ciclo de nutrientes.

Además de los aumentos en la disponibilidad de N a través de la fijación simbiótica, mediciones en hojarasca mostraron que las tasas de ciclaje de N y P fueron significativamente mayores en las parcelas que contienen sólo 25% *A. mearnsii*, en comparación con *E. globulus* en plantaciones puras (Forrester *et al.*, 2004). Las parcelas que contienen sólo *A. mearnsii* también tuvieron altas tasas de descomposición de la hojarasca en comparación con las plantaciones puras de *E. globulus*. Incrementos similares en el ciclo de nutrientes o en la disponibilidad de N y P de especies fijadoras de N han sido observados en otros estudios, tanto en plantaciones y bosques nativos, incluyendo algunas comunidades con mezcla de especies que contienen *Eucalyptus* (Binkley *et al.*, 2000; May y Attiwill, 2003). Es importante señalar que los aumentos en el ciclo del N y en la disponibilidad de plantas fijadoras de N, pueden influir en la disponibilidad de otros nutrientes (Binkley *et al.*, 2000; Kaye *et al.*, 2000).

El efecto de las plantas fijadoras de N sobre el ciclo de nutrientes en plantaciones mixtas depende de la cantidad de N (y de otros nutrientes) en la hojarasca y de la velocidad a la que estos nutrientes son liberados a través de la descomposición. Para aumentar efectivamente las tasas del ciclo de nutrientes en plantaciones mixtas, las especies fijadoras de N deben producir grandes cantidades de hojarasca fácilmente descomponible. Incluso especies con bajas tasas de fijación de N ($<10 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), pero con alto contenido de nutrientes foliares pueden mejorar el ciclo de nutrientes en rodales mixtos. En plantaciones mixtas de 11 años de edad, en mezclas 1:1 de *E. globulus* y *A. mearnsii*, cayeron 44 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de hojas en el mantillo en comparación con plantaciones puras *E. globulus* que aportaron 14 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y las tasas de descomposición fueron del 0.56 y 0.32 año^{-1} , respectivamente (Forrester *et al.*, 2004).

Pocos estudios han examinado los mecanismos responsables del crecimiento resultante de una alta disponibilidad de N en rodales mixtos. Esa alta disponibilidad puede acrecentar el crecimiento por el aumento y la eficiencia del área foliar (Cromer y Eldridge, 2001).

CONCLUSIONES

Esta revisión, evidencia que la asociación de especies arbóreas forrajeras puede contribuir a la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas.

Es de resaltar que las especies arbóreas poseen elementos de alto valor nutricional que ayudan a reducir problemas de fertilidad en los suelos; incorporando hojarasca de buena calidad para un eficiente reciclaje de nutrientes y de esta manera aumentar la posibilidad de mejorar la productividad de la especie(s) asociada(s).

Del mismo modo, las leguminosas arbustivas pueden establecer simbiosis con bacterias y hongos, que mejoran la disponibilidad de elementos limitantes para su crecimiento.

La asociación de especies arbóreas, puede utilizarse para satisfacer una amplia gama de objetivos productivos, ecológicos y económicos. Sin embargo, esto no sólo depende de las características de las especies, sino también en

gran medida de los recursos disponibles del sitio, tales como; luz, agua y nutrientes del suelo, así como también del manejo del agroecosistema.

Es importante señalar que existen vacíos de investigación sobre este tema en la literatura, específicamente con especies arbóreas forrajeras, puesto que la mayoría de trabajos se han realizado para especies arbóreas maderables en plantaciones forestales.

LITERATURA CITADA

- Adjoud-Sadadou, D. and Halli-Hargas, R. 2000. Occurrence of arbuscular mycorrhiza on aged *Eucalyptus*. *Mycorrhiza* 9:287-290.
- Bauhus, J.; van Winden, A. P. and Nicotra, A. B. 2004. Above-ground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. *Can. J. Forest. Res.* 34:686-694.
- Bellei, M. M.; Garbaye, J. and Gil, M. 1992. Mycorrhizal succession in young *Eucalyptus viminalis* plantations in Santa Catarina (southern Brasil). *Forest. Ecol. Manag.* 54:205-213.
- Binkley, D. 1992. Mixtures of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species. In: Cannell, M.G.R., Malcolm, D. C., Robertson, P. A. (Eds.). *The ecology of mixed species stands of trees*. Blackwell Scientific, London, p. 99-123.
- Binkley, D. and Giardina, C. 1997. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: Nambiar, E. K. S., Brown, A. G. (Eds.), *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. p. 297-337.
- Binkley, D.; Giardina, C. and Bashkin, M. A. 2000. Soil phosphorous pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Albizia falcataria*. *Forest. Ecology and Management*. 128:241-247.
- Binkley, D.; Senock, R.; Bird, S. and Cole, T. G. 2003. Twenty years of stand development in pure and mixed stands of *Eucalyptus saligna* and N-fixing *Facaltaria moluccana*. *Forest Ecol. Manag.* 182:93-102.
- Bossa, J. R.; Adams, J. F.; Shannon, D. A. and Mullins, G. L. 2005. Phosphorus and potassium release pattern from leucaena leaves in three environments of Haiti. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 73:25-35.

- Casanova, L. F.; Ramírez, A. L. and Solorio, S. F. J. 2007. Interacciones radiculares en sistemas agroforestales: mecanismos y opciones de manejo. Avances en Investigación Agropecuaria. 11(3):41-52.
- Chicowo, R.; Mapfumo, P.; Leffelaar, P. A. and Giller, K. E. 2006. Integrating legumes to improve N cycling on smallholder farms in sub-humid Zimbabwe: resource quality, biophysical and environmental limitations. Nutr. Cycl. Agroecosys. 76:219-231.
- Craswell, E. T.; Grote, U.; Henao, J. and Vlek, P. L. G. 2004. Nutrient flows in agricultural production and international trade: ecological and policy issues. Discussion papers on development policy, Center for Development Research (ZEF) Bonn, Germany.
- Crews, T. E. and Peoples, M. B. 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. Nutr. Cycl. Agroecosys. 72:101-120.
- Danso, S. K. A.; Bowen, G. D. and Singinga, N. 1992. Biological nitrogen-fixation in trees in agroecosystems. Plant. Soil. 141:177-196.
- De Bell, D. S.; Cole, T. C. and Whitesell, C. D. 1997. Growth, development, and yield of pure and mixed stands of *Eucalyptus* and *Albizia*. For. Sci. 43:286-298.
- Ferrari, A. E. y Wall, L. G. 2004. Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. Rev. Fac. Agron. 105 (2):63-87.
- Fisher, R. F. and Binkley, D. 2000. Ecology and management of forest soils. Wiley, New York.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1992. Mixed and pure forest plantations in the tropics and subtropics. FAO. Forestry paper 103 (based on the work of T. J. Wormald). FAO of the UN, Rome, Italy.
- Forrester, D. I.; Bauhus, J. and Cowie, A. L. 2005. On the success and failure of mixed-species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. For. Ecol. Managem. 209:147-155.
- Forrester, D. I.; Bauhus, J.; Cowie, A. L. and Vanclay, J. 2006. Mixed-species plantations: of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* with nitrogen-fixing trees: a review. For. Ecol. Managem. 233:211-230.
- Francis, G. S.; Tabley, F. J. and White, K. M. 1999. Restorative crops for the amelioration of degraded soil conditions in New Zealand. Aust. J. Soil Res. 37:1017-1034.
- Gutteridge, R. C. and Shelton, H. M. 1994. Forage tree legumes in tropical agriculture. CAB International, Wallingford, UK.
- Halenda, C. 1988. Performance of *Acacia mangium* Willd. and *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. at Niah forest reserve, Sarawak. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 6:15-17.
- Halenda, C. J. 1990. Growth rates of three leguminous tree species on degraded acidic soils. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 8:40.
- Halenda, C. J. and Ting, S. P. 1993. Performance of three legume tree species on degraded acidic soils. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 11:29.
- Hättenschwiler, S.; Tiunov, A. V. and Scheu, S. 2005. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 36:191-218.
- Hussein-Zahran, H. 1999. Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. Microbiol. Molec. Biol. 63:968-989.
- Jordan, C. F. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. John Wiley & Sons. Chichester. 189 p.
- Kaye, J. P.; Resh, S. C.; Kaye, M. W. and Chimmer, R. A. 2000. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of *Eucalyptus* and *Albizia* trees. Ecology. 81:3267-3273.
- Keenan, R.; Lamb, D. and Sexton, G. 1995. Experience with mixed species rainforest plantations in North Queensland. Commun. For. Rev. 74:315-321.
- Kelty, M. J. 1992. Comparative productivity of monocultures and mixed-species stands. In: Kelty, M. J., Larson, B. C., Oliver, C. D. (Eds.). The ecology and silviculture of mixed-species forests. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p. 125-141.
- Kelty, M. J. and Cameron, I. R. 1995. Plot designs for the analysis of species interactions in mixed stands. Commun. For. Rev. 74:322-332.
- Khanna, P. K. 1997. Comparison of growth and nutrition of young monocultures and mixed stands of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. For. Ecol. Managem. 94:105-113.
- Khanna, P. K. 1998. Nutrient cycling under mixed-species tree systems in Southeast Asia. Agroforestry Systems. 38:99-120.

- Ku-Vera, J. C.; Ramírez, A. L.; Jiménez, F. G.; Alayon, J. A. and Ramírez, C. L. 1999. Árboles y arbustos para la producción animal en el trópico. In: Sánchez, M. D. y Rosales, M. M. (eds). Agroforestería para la producción animal en América Latina. Roma, Italia. p. 231-258.
- May, B. M. and Attiwill, P. M. 2003. Nitrogen-fixation by *Acacia dealbata* and changes in soil properties 5 years after mechanical disturbance or slash-burning following timber harvest. *For. Ecol. Managem.* 181:339-355.
- Montagnini, F. 2000. Accumulation in above-ground biomass and soil storage of mineral nutrients in pure and mixed plantations in a humid tropical lowland. *For. Ecol. Managem.* 134:257-270.
- Montagnini, F.; Gonzales, E. and Porras, C. 1995. Mixed and pure forest plantations in the humid neotropics: a comparison of early growth, pest damage and establishment costs. *Commun. For. Rev.* 74:306-314.
- Moyer-Henry, K. A.; Burton, J. W.; Israel, D. W. and Rufty, T. W. 2006. Nitrogen transfer between plants: A ¹⁵N natural abundance study with crop and weed species. *Plant. Soil.* 282:7-20.
- Nair, P. K. R.; Buresh, D. N.; Mugendi, D. N. and Latt, C. R. 1999. Nutrient Cycling in tropical agroforestry systems: Myths and science. In: Buck L. E., Lassoie J. P. and Fernandez E. C. M. (ed) Agroforestry in sustainable agricultural systems. CRC Press, Lewis Publ., Boca Raton, FL.
- Nair, P. K. R. 1993. An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht, The Netherlands. 499 p.
- National Academic of Sciences. 1979. Tropical legumes: resources for the future. NAS Washington D.C. 331 p.
- Palm, C. A. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agrofores. Systems.* 30:105-124.
- Parrotta, J. A.; Baker, D. D. and Fried, M. 1994. Application of ¹⁵N-enrichment methodologies to estimate nitrogen fixation in *Casuarina equisetifolia*. *Canadian J. Forest. Research.* 24:201-207.
- Petit, A. J. 1994. Árboles y arbustos forrajeros. Instituto Forestal Latinoamericano. Mérida, Venezuela 174 p.
- Powell, J. M.; Pearson, A. R. and Hiernaux, P. H. 2004. Crop-Livestock Interactions in the West African Drylands. Review and Interpretation. *Agron. J.* 96:469-483.
- Powell, M. H. 1995. Nitrogen fixing trees and shrubs for acid soils-An overview. In: Nitrogen fixing trees for fodder production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, p.73-81.
- Resh, S. C.; Binkley, D. Parrotta, J. A. 2002. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with *Eucalyptus* species. *Ecosystems* 5:217-231.
- Sanganga, N.; Danso, S. K. A. and Bower, G. D. 1989. Nodulation and growth response of *Allocasuarina* and *Casuarina* species to phosphorus fertilization. *Plant. Soil.* 118:125-132.
- Solorio, S. F. J and Solorio, S. B. 2002. Integrating fodder trees in to animal production systems in the tropics. *Tropical & Subtropical Agroecosystems.* 1:1-11.
- Sileshi, G. and Mafongoya, P. L. 2007. Quantity and quality of organic inputs from coppicing leguminous trees influence abundance of soil macrofauna in maize crops in eastern Zambia. *Biology Fertility Soils.* 43:333-340.
- Smethurst, P.; Baillie, C.; Cherry, M. and Holz, G. 2003. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus* nitens plantations. *For. Ecol. Managem.* 176:531-542.
- Van Kessel, C.; Farrel, R. E.; Roskoski, J. P. and Keane, K. M. 1994. Recycling of the naturally occurring ¹⁵N in an established stand of *Leucaena leucocephala*. *Soil Biology Biochemistry.* 26:757-762.
- Vandermeer, J. 1989. The ecology of intercropping. Cambridge University Press, New York.