

Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata 105 (2), 2004

ISSN 0041-8676, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina.

Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados

A. E. FERRARI & L. G. WALL

Universidad Nacional de Quilmes, R. Sáenz Peña 180, Bernal B1876BXD, Argentina
aferrari@unq.edu.ar / lgwall@unq.edu.ar

FERRARI, A. E. & L. G. WALL. 2004. Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. *Rev. Fac. Agron.* 105 (2): 63-87.

Los suelos degradados son abundantes en todo el mundo y su aprovechamiento agropecuario es muy difícil, antieconómico o directamente impracticable. El establecimiento de plantaciones forestales constituye una de las posibilidades de utilización de suelos degradados, así como elemento de estabilización y protección de sitios inestables como costas de ríos y mares, dunas de arena y laderas de alta pendiente. Los árboles fijadores de nitrógeno -leguminosas y actinorrizas- establecen una asociación simbiótica con microorganismos fijadores de nitrógeno del suelo de los géneros *Rhizobium* y *Frankia* respectivamente. Estos árboles también pueden formar simbiosis con hongos micorrízicos. Estas asociaciones permiten la fijación de nitrógeno atmosférico y mejoran la absorción de agua y la asimilación de nutrientes del suelo. En muchos sitios disturbados, los árboles fijadores de nitrógeno pueden crecer mejor que los no-fijadores e incluso mejor que plantas herbáceas fijadoras de nitrógeno. Entre estos árboles que fijan nitrógeno existen especies tolerantes a los distintos tipos de estrés propios de los suelos degradados, como salinidad, acidez, metales pesados, sequía, fuego, malezas invasoras, deficiencias de nutrientes, inundación, compactación y encostramiento. Estos árboles son capaces de reciclar importantes cantidades de materia orgánica y nutrientes a través de la descomposición de la hojarasca, y aunque otras formas de manejo de tierras degradadas pueden ser también importantes, aquellos constituyen una buena alternativa para rehabilitación de suelos. En este trabajo se citan y analizan casos de aplicación de más de 100 especies de árboles fijadores de nitrógeno en distintos tipos de suelos y situaciones geográficas.

Palabras clave: suelos degradados, fijación biológica de nitrógeno, leguminosas, actinorrizas, rehabilitación de suelos.

FERRARI, A. E. & L. G. WALL. 2004. Utilization of nitrogen fixing trees for revegetation of degraded soils. *Rev. Fac. Agron.* 105 (2): 63-87.

Degraded soils are abundant all over the world; the agricultural use of these soils is very difficult or unprofitable. Forestry is a possibility of use and rehabilitation of degraded soils, useful for stabilisation and protection of unstable sites like river and seashores, sand dunes and steep slopes. Nitrogen fixing trees, either legume or actinorrhizal trees, form a symbiotic association with nitrogen fixing soil microorganisms of the genus *Rhizobium* or *Frankia* respectively, and also with mycorrhizal fungi. These associations allow the fixation of atmospheric nitrogen and the improvement of the assimilation of soil nutrients. In disturbed lands, nitrogen fixing trees can grow better than non-fixing trees or than nitrogen fixing herbaceous plants. Within N_2 fixing trees there are species that are tolerant to different constraints like salinity, acidity, heavy metals, drought, fire, invasive weeds, nutrient deficiency, waterlogging, compactation and crusting. These trees are able to recycle big amounts of organic matter and nutrients through litter decomposition, and though other management practices should be also considered, they are an appreciated alternative for rehabilitation of marginal soils. In this work more than 100 tree species are reported and analysed for rehabilitation purpose in different kinds of degraded lands, and under different geographic situations.

Key words: degraded soils, biological nitrogen fixation, legume, actinorrhiza, soil rehabilitation.

Recibido: 06/02/03. Aceptado: 17/08/04

INTRODUCCIÓN

Las especies vegetales capaces de adaptarse a suelos degradados deben tener una baja demanda de nutrientes y permitir un eficiente reciclado externo de los mismos a través de la descomposición de hojarasca y de raíces muertas.

En la rehabilitación de suelos degradados se han recomendado proyectos de reforestación (Montagnini, 1992) y sistemas agroforestales (Lal, 1996). Sin embargo, es común el fracaso de estas plantaciones debido a la baja disponibilidad de nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno) y a las deficientes condiciones físicas de los suelos.

La deficiencia de nitrógeno en el suelo puede superarse mediante la fijación biológica de nitrógeno (FBN) que ocurre en nódulos radiculares de algunos géneros de plantas angiosperma que establecen simbiosis con ciertos microorganismos del suelo.

Existen dos tipos principales de simbiosis fijadoras de nitrógeno, las leguminosas que establecen asociación con bacterias de los géneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Synorhizobium*, *Azorhizobium* y *Mesorhizobium* (en adelante referidos genéricamente como rizobios) y las plantas actinorrizas que lo hacen con bacterias filamentosas (actinomicetes) del género *Frankia*.

La familia Leguminosae contiene más de 200 géneros y 17.000 especies de árboles, arbustos y plantas (Werner, 1992). Las actinorrizas incluyen más de 200 especies pertenecientes a 8 familias y 25 géneros, siendo todos árboles o arbustos a excepción del género *Datisca* (Baker & Schwintzer, 1990; Huss-Danell, 1997; Wall, 2000; Werner, 1992).

En este trabajo sólo consideraremos especies fijadoras de nitrógeno leñosas, es decir, árboles y arbustos leguminosos y actinorrízicos, a los que llamaremos conjuntamente árboles fijadores de nitrógeno (AFN).

Se ha confirmado (Brewbaker *et al.*, 1990) la nodulación radicular en 648 especies de árboles y arbustos, los cuales se supone que fijan nitrógeno; 520 especies corresponden a leguminosas pertenecientes a las subfamilias Mimosoideae (321 especies), Papilionoideae (173 especies) y Caesalpinioideae (26 especies); 117 especies son actinorrizas leñosas pertenecientes a las familias Betulaceae (38 especies), Casuarinaceae (20 especies), Coriariaceae (16 especies), Elaeagnaceae (10 especies), Myricaceae (14 especies), Rhamnaceae (14 especies) y Rosaceae (5 especies) y el resto a no-leguminosas de la familia Ulmaceae que establecen simbiosis con rizobios. Los principales géneros de árboles y arbustos fijadores de nitrógeno se muestran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Lista de los 23 géneros de actinorrizas arbóreas (Werner 1992, Baker & Schwintzer 1990).

List of 23 genus of actinorrhizal trees (Werner 1992, Baker & Schwintzer 1990).

familia	géneros
Betulaceae	<i>Alnus</i>
Casuarinaceae	<i>Allocasuarina</i> , <i>Casuarina</i> , <i>Ceuthostoma</i> , <i>Gymnostoma</i>
Coriariaceae	<i>Coriaria</i>
Elaeagnaceae	<i>Elaeagnus</i> , <i>Hippophae</i> , <i>Shepherdia</i>
Myricaceae	<i>Comptonia</i> , <i>Myrica</i>
Rhamnaceae	<i>Ceanothus</i> , <i>Colletia</i> , <i>Discaria</i> , <i>Kentrothamnus</i> , <i>Retanilla</i> , <i>Talguenea</i> , <i>Trevoa</i>
Rosaceae	<i>Cercocarpus</i> , <i>Charmaebatia</i> , <i>Cowania</i> , <i>Dryas</i> , <i>Purshia</i>

Tabla 2. Los principales géneros de leguminosas arbóreas, que contienen a las especies de mayor valor económico (recopilación de Werner 1992 y de Brewbaker et al., 1983).

The principal genus of legume trees, including the species of high economical value (compiled from Werner 1992 and from Brewbaker et al., 1983).

subfamilia	géneros
Caesalpinioideae	<i>Chamaecrista, Cordeauxia, Hardwickia, Intsia, Parkinsonia</i>
Mimosoideae	<i>Acacia, Albizia, Calliandra, Enterolobium, Faidherbia, Inga, Leucaena, Mimosa, Paraserianthes, Parkia, Pithecellobium, Prosopis, Pterocarpus, Samanea.</i>
Papilionoideae	<i>Aeschynomene, Baphia, Cajanus, Dalbergia, Derris, Eritrina, Flemingia, Gliricidia, Pongamia, Pterocarpus, Robinia, Sesbania, Sophora, Tephrosia, Tipuana</i>

Por otra parte la asociación con ciertos hongos del suelo formando endo- y ecto-micorrizas mejora la absorción de agua y la asimilación de fósforo y de otros nutrientes, ayudando también al establecimiento temprano de estos árboles en sitios marginales.

Los AFN suelen ser especies pioneras en estadíos tempranos de la sucesión (Werner, 1992) y pueden colonizar sitios bajo intenso disturbio como aquellos afectados por inundaciones, incendios, deslizamientos de tierra, actividad glacial y erupciones volcánicas (Dawson, 1986; 1990).

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente define degradación del suelo como una declinación transitoria o permanente de su capacidad productiva, es decir, de su potencial económico como recurso natural (Stocking & Murnaghan, 2000). La degradación física, la química y la biológica son las principales formas de degradación del suelo; las causas pueden ser naturales o debidas a la intervención del hombre. Algunos suelos son naturalmente susceptibles a sufrir degradación y por ello resultan menos aptos para la producción agropecuaria; son ejemplos de ello los suelos salinos, los fuertemente ácidos, los arenosos, los superficiales, los lateríticos, los compactados, los hidromórficos, las arcillas expansibles y las laderas de pendiente pronunciada, entre otros (FAO, 1994; FAO et al.,

1994; Stocking & Murnaghan, 2000). Las principales causas antrópicas de deterioro de la capacidad productiva del suelo son la deforestación y el manejo agrícola no sustentable, como la labranza convencional, el exceso de irrigación o de fertilización, los periodos de barbecho demasiado cortos, la sobreexplotación de cultivos o de pastos y las rotaciones inapropiadas (FAO et al., 1994; Montagnini, 1992).

El objetivo de esta revisión es enumerar y analizar algunos casos de uso de AFN en la rehabilitación de suelos afectados por erosión, por limitaciones físicas y químicas y por otras formas de degradación. Se citan más de 100 especies de AFN con aptitud para establecerse en suelos degradados. En la Tabla 3 se listan todas las especies citadas con el nombre científico completo, incluyendo las especies de alto valor económico o ecológico.

Rehabilitación de suelos erosionados

Prevención y control de la erosión

La erosión implica la eliminación de suelo superficial por acción del viento (erosión eólica) o de la lluvia (erosión hídrica). La pérdida de materia orgánica y de nutrientes va generalmente acompañada de cambios en la estructura física del suelo, que pueden ser gra-

Tabla 3. Listado de las especies de AFN (con nombre científico completo) citadas en el texto. Las especies seguidas por un círculo negro, están consideradas de alto valor económico o ecológico según Brewbaker et al. (1983, 1990) y Werner (1992). Familias: BET: Betulaceae, CAS: Casuarinaceae, COR: Coriariaceae, ELA: Eleagnaceae, LEG: Leguminosae, MYR: Myricaceae, RHA: Rhamnaceae, ROS: Rosaceae; Subfamilias: CAES: Caesalpinioideae, MIM: Mimosoideae, PAP: Papilionoideae.

List of nitrogen fixing trees species reported in the text. Species marked with black points are considered of high economical or ecological value according to Brewbaker et al. (1983, 1990) and Werner (1992). Families: BET: Betulaceae, CAS: Casuarinaceae, COR: Coriariaceae, ELA: Eleagnaceae, LEG: Leguminosae, MYR: Myricaceae, RHA: Rhamnaceae, ROS: Rosaceae; Subfamilias: CAES: Caesalpinioideae, MIM: Mimosoideae, PAP: Papilionoideae.

Nombre científico	Familia	Subfamilia
<i>Acacia ampliceps</i> Maslin	LEG	MIM
<i>Acacia aneura</i> F. Muell. ex Benth	LEG	MIM
<i>Acacia angustissima</i> (Miller) Kuntze	LEG	MIM
<i>Acacia aulacocarpa</i> A. Cunn. ex Benth	LEG	MIM
<i>Acacia auriculiformis</i> A. Cunn. ex Benth •	LEG	MIM
<i>Acacia catechu</i> (L.) Willd.	LEG	MIM
<i>Acacia caven</i> (Mol.) Molina	LEG	MIM
<i>Acacia cincinnata</i> F. Muell.	LEG	MIM
<i>Acacia crassicaarpa</i> A. Cunn. ex Benth	LEG	MIM
<i>Acacia eburnea</i> Willd.	LEG	MIM
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	LEG	MIM
<i>Acacia holosericea</i> A. Cunn. ex Don	LEG	MIM
<i>Acacia koa</i> A. Gray	LEG	MIM
<i>Acacia leptocarpa</i> A. Cunn. ex Benth	LEG	MIM
<i>Acacia leucophloea</i> (Roxb.) Willd.	LEG	MIM
<i>Acacia longifolia</i> (Andr.) Wildenow	LEG	MIM
<i>Acacia mangium</i> Willd. •	LEG	MIM
<i>Acacia melanoxyton</i> R. Brown	LEG	MIM
<i>Acacia mellifera</i> (Vahl.) Benth	LEG	MIM
<i>Acacia mearnsii</i> De Wild. •	LEG	MIM
<i>Acacia nilotica</i> (L.) Willd. ex Del. •	LEG	MIM
<i>Acacia reficiens</i> Wawra	LEG	MIM
<i>Acacia salicina</i> Lindl.	LEG	MIM
<i>Acacia saligna</i> (Labill.) H. Wendl. •	LEG	MIM
<i>Acacia senegal</i> (L.) Willd. •	LEG	MIM
<i>Acacia seyal</i> Del.	LEG	MIM
<i>Acacia spirorbis</i> Labill.	LEG	MIM
<i>Acacia stenophylla</i> Benth.	LEG	MIM
<i>Acacia tortilis</i> (Forsk.) Hayne •	LEG	MIM
<i>Adenanthera pavonina</i> (L.)	LEG	MIM
<i>Albizia chinensis</i> (Osbeck) Merr.	LEG	MIM
<i>Albizia guachapele</i> (Kunth.) Dugand	LEG	MIM
<i>Albizia lebbeck</i> (L.) Benth. •	LEG	MIM
<i>Albizia procera</i> (Roxb.) Benth. •	LEG	MIM
<i>Albizia saman</i> (Jacq.) F. Muell. •	LEG	MIM
<i>Alnus acuminata</i> (H.B.K.) O. Kuntze •	BET	
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn. •	BET	
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	BET	
<i>Alnus jorullensis</i> Humboldt B.G.K. (1)	BET	
<i>Alnus nepalensis</i> D. Don •	BET	
<i>Alnus rubra</i> Bong.	BET	
<i>Alnus viridis</i> (Vill.) Lam. & D.C.	BET	
<i>Allocasuarina decaisneana</i> (F. Muell.) L. Johnson	CAS	
<i>Allocasuarina littoralis</i> (Salisb.) L. Johnson	CAS	

(Continuación Tabla 3)

Nombre científico	Familia	Subfamilia
<i>Allocasuarina tortuosa</i> (Ait.) L. Johnson	CAS	
<i>Bauhinia variegata</i> L.	LEG	CAES
<i>Caesalpinia peltophoroides</i> Benth.	LEG	CAES
<i>Cajanus cajan</i> (L.) Millsp. •	LEG	PAP
<i>Calliandra calothyrsus</i> Meissn. •	LEG	MIM
<i>Casuarina collina</i> Poiss. ex Panch. & Seb.	CAS	
<i>Casuarina cunninghamiana</i> Miq.	CAS	
<i>Casuarina cristata</i> Miq.	CAS	
<i>Casuarina equisetifolia</i> Forst. •	CAS	
<i>Casuarina glauca</i> Sieb. ex Spreng.	CAS	
<i>Casuarina junguhniana</i> Miq.	CAS	
<i>Casuarina obesa</i> Miq.	CAS	
<i>Casuarina oligodon</i> L. Johnson	CAS	
<i>Clitoria fairchildiana</i> R. Howard	LEG	PAP
<i>Coriaria myrtifolia</i> L.	COR	
<i>Dalbergia sissoo</i> Roxb. •	LEG	PAP
<i>Desmodium nicaraguense</i> Oerst.	LEG	PAP
<i>Desmodium rensonii</i>	LEG	PAP
<i>Dichrostachys cinerea</i> (L.) W. & A.	LEG	MIM
<i>Discaria americana</i> Gilles & Hook	RHA	
<i>Discaria trinervis</i> Gilles & Hook	RHA	
<i>Elaeagnus angustifolia</i> (L.) •	ELA	
<i>Elaeagnus umbelata</i> Thunb.	ELA	
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong.	LEG	MIM
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb. •	LEG	MIM
<i>Erythrina fusca</i> Lour. •	LEG	PAP
<i>Erythrina glauca</i> Willd.	LEG	PAP
<i>Erythrina indica</i> Lam.	LEG	PAP
<i>Erythrina variegata</i> (L.) Merr. •	LEG	PAP
<i>Faidherbia albida</i> (Del.) A. Chev. •	LEG	MIM
<i>Flemingia congesta</i> Roxb.	LEG	PAP
<i>Flemingia macrophylla</i> (Willd.) Merr. •	LEG	PAP
<i>Geoffroea decorticans</i> (Gillies ex Hooker & Arnott) Burkart	LEG	PAP
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	LEG	CAES
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Steud.	LEG	PAP
<i>Gymnostoma deplancheanum</i> (Miq.) L. Johnson	CAS	
<i>Hardwickia binata</i> Roxb. •	LEG	CAES
<i>Hippophae rhamnoides</i> L. •	ELA	
<i>Indigosfera teysmannii</i> Miq.	LEG	PAP
<i>Inga cinnamomea</i> Benth.	LEG	MIM
<i>Inga davidsei</i> M. Sousa	LEG	MIM
<i>Inga dumosa</i> Benth.	LEG	MIM
<i>Inga edulis</i> Mart.	LEG	MIM
<i>Inga oerstediana</i> Benth.	LEG	MIM
<i>Inga punctata</i> Willd.	LEG	MIM
<i>Inga sapindoides</i> Willd.	LEG	MIM
<i>Inga spectabilis</i> (Vahl.) Willd.	LEG	MIM
<i>Leucaena diversifolia</i> Benth. •	LEG	MIM
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) De Wit •	LEG	MIM
<i>Leucaena shannoni</i> Donn. Smith	LEG	MIM
<i>Mimosa himalayana</i> Gramble	LEG	MIM
<i>Mimosa scabrella</i> Benth. •	LEG	MIM
<i>Myrica faya</i> Ait.	MYR	
<i>Myrica gale</i> L.	MYR	
<i>Myrica pubescens</i> Willd.	MYR	

(Continuación Tabla 3)

Nombre científico	Familia	Subfamilia
<i>Myrica rubra</i> Sieb. & Zucc.	MYR	
<i>Ougeinia dalbergioides</i> Benth.	LEG	PAP
<i>Ougeinia oojeninensis</i> Roxb. (2)	LEG	PAP
<i>Paraserianthes falcataria</i> (L.) Nielsen •	LEG	MIM
<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	LEG	CAES
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth. •	LEG	MIM
<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre	LEG	PAP
<i>Prosopis alba</i> (Grisebach) •	LEG	MIM
<i>Prosopis cineraria</i> (L.) Druce •	LEG	MIM
<i>Prosopis chilensis</i> (Molina) Struntz •	LEG	MIM
<i>Prosopis juliflora</i> (Swartz) DC •	LEG	MIM
<i>Prosopis pallida</i> (Humb & Bon ex Willd.) HBK •	LEG	MIM
<i>Prosopis tamarugo</i> F. Phil. •	LEG	MIM
<i>Robinia pseudoacacia</i> L. •	LEG	PAP
<i>Schleinitzia insularum</i> (Guillemin) Burkart	LEG	MIM
<i>Sclerolobium paniculatum</i> Vog.	LEG	CAES
<i>Sesbania aegyptica</i> (Poir.) Pers. (3)	LEG	PAP
<i>Sesbania bispinosa</i> (Jacq.) W. F. Wight	LEG	PAP
<i>Sesbania cannabina</i> (Retz.) Pers.	LEG	PAP
<i>Sesbania formosa</i> (F. Muell.) N. Burb.	LEG	PAP
<i>Sesbania glabra</i> R.K.G.	LEG	PAP
<i>Sesbania grandiflora</i> (L.) Poir. •	LEG	PAP
<i>Sesbania sesban</i> (L.) Merrill •	LEG	PAP
<i>Stryphnodendron adstringens</i> (Martius) Coville	LEG	MIM

(1) Citada por Dawson (1986), según Powell (1996) sería un sinónimo de *Alnus acuminata*.(2) Nombre anterior de *Ougeinia dalbergioides* según Roshetko y Gutteridge (1996).(3) Sinónimo de *Sesbania sesban* según Ghai *et al.* (1985).

ves como la formación de cárcavas. Los suelos limosos, los vertisoles y los suelos con menos del 2 % de materia orgánica son muy susceptibles de sufrir erosión (Stocking & Murnaghan, 2000). En los casos leves, la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos pueden recuperar parcialmente la fertilidad del suelo; pero en casos severos el rendimiento de los cultivos difícilmente igualará al de un suelo intacto por más insumos que se apliquen (FAO, 1994).

Los árboles son eficaces en el control de la erosión ya que la copa y la hojarasca reducen la erodabilidad por impacto de las gotas de lluvia (Montagnini, 1992). Se han usado árboles para consolidar los márgenes y las cabeceras de las cárcavas (Michelena, 2002).

Los alisos (*Alnus spp.*) son muy utilizados en la prevención y control de la erosión en

Europa, Colombia, Costa Rica y Nepal (Dawson, 1986; 1990; Wheeler & Miller, 1990). Especies de *Alnus*, *Elaeagnus* y *Myrica* se intercalan con pinos, cedros y cipreses para controlar la erosión en Japón (Dawson, 1986). En India y en el Himalaya se utilizan con este fin *Acacia catechu*, *Acacia eburnea*, *Acacia leucophloea*, *Acacia nilotica*, *Albizia chinensis*, *Albizia lebbek*, *Alnus nepalensis*, *Desmodium nicaraguans*, *Dichrostachys cinerea*, *Hardwickia binata*, *Paraserianthes falcataria* (sinónimo *Albizia falcataria*), *Pongamia pinnata*, *Prosopis juliflora* y *Robinia pseudoacacia* (acacia blanca, falsa acacia) (Dagar, 1998). Otras especies apropiadas para crecer en sitios erosionados son *Acacia auriculiformis*, *Coriaria myrtifolia*, *Ougeinia dalbergioides* y *Hippophae rhamnoides* (Powell, 1996; Roshetko & Gutteridge, 1996; Wheeler & Miller, 1990).

En la zona fitogeográfica de Las Yungas, en el Nordeste de Argentina, *Myrica pubescens* y *Alnus acuminata* crecieron bien en zonas fuertemente erosionadas llamadas «pedalares» (Easdale, 2000).

Los AFN no constituyen necesariamente la única forma de control de la erosión. Un experimento realizado en la región de Kandi (India) demostró que los pastos pueden ser más eficientes para un control inmediato de la erosión mientras que AFN como *Leucaena leucocephala* darían un mejor control a largo término, por lo que se supone que una combinación de ellos sería la mejor forma de controlar la erosión (Thind *et al.*, 1998).

Suelos degradados por minería y actividades industriales

Las actividades mineras dejan tierras fuertemente excavadas y compactadas, con riesgo de derrumbes, con severas deficiencias químicas, pH extremos, pérdida de estructura y restos de desechos metálicos tóxicos (Wheeler & Miller, 1990).

Para rehabilitar estos suelos se necesitan tanto medidas mecánicas como biológicas, entre estas últimas se han ensayado plantaciones de AFN (Dagar, 1998) con distintos resultados o limitaciones. En estos suelos de desechos mineros, la acidez es un factor muy importante que afecta negativamente la nodulación de plantas fijadoras de nitrógeno (Hussein Zahran, 1999). Este problema puede resolverse aplicando enmiendas para mejorar el crecimiento de los árboles, por ejemplo el agregado de calcio (encalado) corrige los bajos valores de pH y atenúa la toxicidad causada por metales pesados (Hensley & Carpenter, 1984; Wheeler & Miller, 1990).

En la rehabilitación de minas de níquel en las islas de Nueva Caledonia (Pacífico sur), sobre un sustrato infértil (deficiente en fósforo, potasio y nitrógeno) y con presencia de metales tóxicos, se plantaron con éxito árboles fijadores nativos de rápido crecimiento

como *Acacia spirorbis* y *Casuarina collina* en los bordes de las minas así como la especie endémica de crecimiento lento *Gymnostoma deplancheanum* en las zonas llanas (Sarrailh & Ayrault, 2001).

Se han utilizado acacias en la rehabilitación de minas de bauxita en Australia, contribuyendo a un rápido desarrollo de una capa de hojarasca sobre el suelo (Gardner, 2001).

La revegetación de minas de hierro del estado de Minas Gerais (Brasil) ha incluido las especies fijadoras *Acacia holosericea*, *Acacia mangium*, *Bauhinia variegata*, *Caesalpinia peltophoroides*, *Cajanus cajan*, *Enterolobium contortisiliquum* (timbó, pacará) y *Leucaena leucocephala* (Griffith & Toy, 2001).

En un experimento de 13 meses de reforestación de minas de bauxita en el estado brasileño de Pará (Franco *et al.*, 1995) se usaron 9 especies de AFN nodulados (*Acacia angustissima*, *Acacia holosericea*, *Acacia mangium*, *Albizia guachapele*, *Albizia saman*, *Clitoria fairchildiana*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Sclerolobium paniculatum* y *Stryphnodendron adstringens*) así como leguminosas no noduladas y árboles no fijadores. Se fertilizó con potasio y fósforo, se agregó estiércol de ganado a la mitad de los tratamientos y se inoculó con endomicorizas. El estiércol mejoró el crecimiento de todos los árboles, pero este efecto fue menos importante en los AFN que en los no-fijadores. Las acacias y albizias crecieron más sin el agregado de abono orgánico y la especie *A. mangium* fue la que mostró mayor crecimiento aún con agregado de abono. Estos resultados sugieren que el éxito de la plantación depende de la enmienda que se realiza según la especie vegetal en cuestión.

Otras especies útiles en la revegetación de minas abandonadas y tierras arruinadas por actividades mineras son *Acacia auriculiformis*, *Albizia lebbbeck*, *Alnus spp.*, *Casuarina spp.*, *Elaeagnus angustifolia* (olivo de Bohemia), *Hippophae rhamnoides*, *Mimosa himalayana*, *Pongamia pinnata* y *Robinia pseudoacacia*

(Dagar, 1998; Dawson, 1986; Keresztesi, 1988; Powell, 1996; Roshetko & Gutteridge, 1996).

En profundas excavaciones para extracción de piedra caliza en Mombasa, Kenia, fueron plantadas exitosamente *Casuarina cunninghamiana* (roble australiano), *Casuarina equisetifolia*, *Casuarina glauca*, *Prosopis juliflora*, *Prosopis pallida* y *Leucaena leucocephala*. La descomposición de la hojarasca de *C. equisetifolia* tras 20 años permitió el desarrollo de una delgada capa de suelo húmico que favoreció la formación de un ecosistema completamente nuevo (Wood, 1987).

Muchos AFN se muestran resistentes a la contaminación y son recomendados en sitios industrializados. Acacias y casuarinas se usan con éxito para revegetar tierras afectadas por emisiones de flúor en Tasmania (Diem & Dommergues, 1990). *Casuarina equisetifolia* tolera la contaminación causada por automóviles mejor que otras especies ornamentales (Diem & Dommergues, 1990).

Muchas especies de alisos como *Alnus glutinosa* (aliso negro), *A. incana* (aliso gris), *A. rubra* (aliso rojo) y *A. viridis* (aliso verde) pueden resistir suelos con pH extremos (Wheeler & Miller, 1990). Las especies *Alnus glutinosa*, *Discaria americana*, *Elaeagnus angustifolia*, *Hippophae rhamnoides* y *Robinia pseudoacacia* son tolerantes a contaminantes del suelo como boro, hierro, cadmio, plomo y zinc, así como a pH extremos (Bencat, 1993; Cusato, *com. pers.*, 2002; Wheeler & Miller, 1990;).

Respecto a la tolerancia frente a contaminantes del aire no existen hasta ahora resultados contundentes, reportándose en *Alnus glutinosa* casos tanto de resistencia como de sensibilidad al dióxido de azufre y otros contaminantes del aire, así como diferencias debidas a la variabilidad genética de las especies (Wheeler & Miller, 1990).

En zonas áridas y semiáridas algunos AFN admiten el riego con efluentes domésticos o industriales; en esos casos se han utilizado con éxito casuarinas (Diem & Dommergues, 1990; Ramirez-Saad & Valdes, 1989), *Acacia*

nilotica (Roshetko & Gutteridge, 1996) y *Geoffroea decorticans* (chañar) (Becker & Saunders, 1983).

Estabilización de laderas de alta pendiente

Los terrenos de laderas con altas pendientes (más del 20%) son muy fáciles de erosionar por la lluvia, al disminuir la velocidad de infiltración del agua en el suelo y aumentar el escurrimiento superficial (Lal, 1997). La deforestación es la principal causa de erosión en laderas de ambientes húmedos (FAO *et al.*, 1994). Esta situación puede originar deslizamientos de tierra en estaciones de intensas lluvias.

Acacia mearnsii (acacia del centenario) y *Alnus joruliensis* (aliso del cerro) son especies efectivas para prevenir la erosión en laderas (Dawson, 1986; Powell, 1996).

En los cultivos «en callejón» aplicados en laderas (Slope Agricultural Land Technology-SALT) el principal objetivo es la conservación del suelo mientras que el cultivo en sí tiene la finalidad de cubrir las necesidades de subsistencia (Montagnini, 1992). En estos casos se eligen especies que retoñen rápido después de podas repetidas. Los árboles se plantan en filas paralelas a las curvas de nivel, luego las hojas cortadas se usan como abono verde para el cultivo o como forraje para ganado y los restos se dejan junto al árbol para consolidar la barrera y controlar el escurrimiento. En Filipinas el sistema SALT permitió desarrollar exitosamente cultivos permanentes entre filas de *Desmodium rensonii*, *Erythrina fusca*, *Flemingia macrophylla*, *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala* (Ejercito, 1998). Laderas severamente erosionadas de Sri Lanka se intentan recuperar con sistemas silvopastoriles basados en *Desmodium rensonni*, *Erythrina variegata* y *Gliricidia sepium*, que producen un forraje de buena calidad y con mayor contenido de nitrógeno en hoja que los árboles no fijadores (Parera, 1998).

La construcción de pozos y zanjas constituyen otros sistemas usados en laderas, rete-

niendo agua y facilitando la posterior rehabilitación del sitio con árboles; son muy usadas las “media lunas” (pozos en forma de cuarto creciente) en el sur de Bolivia (FAO, 1994) y las zanjas en forma de “V” en India (Thind *et al.*, 1998).

Estabilización de dunas, médanos y terrenos costeros

Las dunas de arena y los terrenos costeros en general suelen ser inestables y poco resistentes frente a la erosión por el agua y por el viento. Las especies de árboles aptas para la fijación de terrenos arenosos (dunas y médanos) deben ser resistentes a la sequía, al viento y a la salinidad, así como tener un sistema radicular que proporcione un firme anclaje al suelo.

Las hifas de micorrizas asociadas a estos árboles mantienen unidas las partículas de arena, ayudando a la estabilización de dunas y suelos arenosos (Diem & Dommergues, 1990).

Las casuarinas son ideales para la estabilización de dunas costeras debido a su intrincado sistema radicular y a la también intrincada capa de hojarasca que origina (Dawson, 1986; Diem & Dommergues, 1990). Las casuarinas se introdujeron para controlar dunas de arena costeras en Australia, China, Egipto, India, México, Senegal, Túnez y Yemen (Dawson, 1986; Diem & Dommergues, 1990; Valdes, 2000). Sin embargo, no todas las especies son igualmente apropiadas. *C. cunninghamiana* no es apta para fijar dunas costeras debido a su intolerancia a las sales (Diem & Dommergues, 1990); en cambio fue exitosamente introducida en Argentina para la estabilización de terrenos costeros en el delta del Río de la Plata y su protección contra la erosión por oleaje (Dawson, 1986). En la costa meridional de China desde 1954 se plantaron un millón de casuarinas (principalmente *C. equisetifolia*) en forma de una cortina de 3.000 km. de largo por 0,5-5 km. de ancho. Con esta plantación se controló el desplazamiento de dunas de arena que amenazaban

enterrar tierras arables y se protegieron las poblaciones costeras de los vientos del mar (Dawson, 1986; 1990; Diem & Dommergues, 1990).

Las especies *Acacia senegal*, *Acacia tortilis*, *Albizia lebbbeck*, *Dichrostachys cinerea*, *Prosopis alba* (algarrobo blanco), *Prosopis chilensis*, *Prosopis cineraria* y *Prosopis juliflora* se usan en la fijación de dunas en regiones áridas (Dagar, 1998; Roshetko & Gutteridge, 1996).

En la costa atlántica de la provincia de Buenos Aires se logró una efectiva estabilización de las dunas costeras en los primeros 50 metros desde la costa mediante un sistema múltiple que incluía barreras inertes hechas con ramas cortadas, una cobertura herbácea y finalmente la forestación con coníferas y leguminosas, entre las últimas se usó *Acacia longifolia* (acacia trinervis) (Michelena & Mon, 1987).

Para la protección del “camino de la esperanza” en Mauritania contra el movimiento de dunas vivas fueron eficaces las especies *Parkinsonia aculeata* y *Prosopis juliflora* en los sectores con más de 100 milímetros de lluvia por año, donde crecieron bien sin riego alguno y constituyeron luego un beneficio socioeconómico para los pobladores (Jensen & Hajej, 2001). En ese caso de Mauritania el establecimiento forestal era difícil debido al excesivo secado del suelo superficial, a la exhumación de plantines por el viento, al enterramiento de plantines por movimiento de las dunas y a la abrasión de las raíces por los granos de arena; estos problemas se evitaron plantando plantines grandes y a bastante profundidad.

Otras especies usadas en dunas de arena y terrenos costeros son *Acacia holosericea*, *Acacia saligna*, *Alnus* spp., *Comptonia* spp., *Dichrostachys cinerea*, *Erythrina indica*, *Erythrina variegata*, *Faidherbia albida* (acacia albida), *Hippophae rhamnoides*, *Leucaena leucocephala*, *Myrica faya*, *Parkinsonia aculeata*, *Pongamia pinnata*, *Robinia pseudoacacia*

y *Sesbania sesban* (Brewbaker *et al.*, 1983; Dagar, 1998; Dawson, 1986; Keresztesi, 1988; Parrota, 1990; Roshetko & Gutteridge, 1996; Wheeler & Miller, 1990).

Los huracanes y las tempestades tropicales suelen provocar lluvias torrenciales con fuerte oleaje, aerosoles salinos y vientos sostenidos de más de 100 km/h que producen masiva defoliación de la vegetación, y erosión y salinización de los suelos costeros (CEPAL, 1990). El paso del huracán Hugo por Puerto Rico en Septiembre de 1989 permitió estudiar sus efectos sobre la vegetación costera, observándose tres días después una gran defoliación en algunas especies de *Gliricidia*, *Leucaena* y *Sesbania*; en cambio *Acacia auriculiformis*, *Casuarina equisetifolia* y *Leucaena leucocephala* mostraron una alta supervivencia tras tres semanas, sugiriendo que al ser plantas nativas de los suelos costeros resultan más resistentes al viento y a la salinidad (Parrota, 1990).

Rehabilitación de suelos degradados físicamente

Suelos compactados

La compactación (aumento de la densidad aparente) es la principal forma de degradación física del suelo, ocurre especialmente en suelos ricos en arcillas de baja actividad, con mucha arena y limo y poco carbono orgánico; algunos suelos son naturalmente compactados como los de Santa Cruz en Bolivia (Lal, 2000).

Las prácticas tradicionales de labranza y el exceso de laboreo deterioran rápidamente la estructura del suelo (Lal, 1996), produciendo en la superficie encostramiento y sellado (Lal, 1996) y en profundidad compactación y formación de horizontes impermeables como el "pie de arado" (Duchaufour, 1975). La reforestación de suelos de desechos de minería suele ser difícil debido al alto grado de compactación de este tipo de suelos (Gardner, 2001).

Varias especies de AFN se utilizaron con éxito en suelos que han sufrido intenso pastoreo y pisoteo, como los casos de *Acacia koa* en Hawai (Powell, 1996), *Casuarina* spp. en China y *Acacia mangium* en la cuenca del canal de Panamá (Puga & Bethancourt, 1990). Árboles no fijadores también pueden funcionar bien en terrenos compactados. Por ejemplo, en un suelo de alta densidad en Costa Rica por 25 años de pastoreo continuo, una plantación fertilizada de *Terminalia amazonia* (Gmel.) Exell. (árbol no fijador) mostró similar crecimiento que plantaciones mixtas con *Erythrina glauca* e *Inga spectabilis* (Stanley & Nichols, 1995).

En un suelo de India, sin estructura y con una capa impermeable calcárea de 45 cm de espesor a una profundidad de 75-100 cm, *Prosopis juliflora* mostró mayor supervivencia y crecimiento que otros árboles ensayados (Chaturvedi, 1985).

En Filipinas, una plantación de *Acacia auriculiformis* aumentó la conductividad hídrica y mejoró la estructura y la porosidad de los 5 cm superficiales del suelo (Ohta, 1990).

Suelos de zonas áridas y semiáridas

Las zonas áridas se caracterizan por lluvias ocasionales, frecuentes sequías, intensa radiación solar, temperaturas extremas y fuertes vientos; originando suelos pobres en materia orgánica y nutrientes. Para mejorar la fertilidad de suelos áridos o desérticos se suele agregar abono orgánico y fertilizantes inorgánicos; sin embargo, la FBN sería la mejor forma de introducir nitrógeno en ecosistemas desérticos (Hussein Zahran, 1999). Algunos AFN se adaptan bien a los suelos de zonas áridas ya que al tener raíces profundas pueden extraer humedad a profundidades mayores que los pastos o forrajeras herbáceas (Gutteridge & Akkasaeng, 1985). De todos modos el estrés hídrico y térmico producen menores infección, nodulación y fijación biológica de nitrógeno, siendo esta última más afectada que el metabolismo de tallo y raíz (Hussein Zahran,

1999). En estas situaciones extremas, la inoculación con hongos micorrícicos permitiría aliviar el estrés hídrico en condiciones áridas (Hussein Zahran, 1999), planteando una posible solución al problema antes citado.

De los miembros de la familia Casuarinaceae, las especies más resistentes a la sequía son *Casuarina obesa*, *Casuarina cristata* y *Allocasuarina decaisneana*. Interesantemente los híbridos *C. junghuhniana* x *C. equisetifolia* crecieron mejor durante severas sequías en Tailandia que la especie *C. equisetifolia*, a pesar de que *C. junghuhniana* es nativa de áreas más húmedas (700-1500 mm anuales) (Diem & Dommergues, 1990).

El género *Prosopis* nodula bien bajo estrés por sequía y puede crecer en climas extremadamente secos, donde no llueve en años, siempre que haya suficiente cantidad de agua subterránea. *P. cineraria* crece fácilmente con tan solo 75 mm anuales de lluvia o con estaciones secas de más de 8 meses de duración. *P. chilensis* puede crecer con menos de 250 mm anuales si dispone de agua subterránea a unos 3 a 30 metros bajo el suelo superficial, o en zonas sin agua subterránea pero con 350-400 mm de precipitación anual (Rossetko & Gutteridge, 1996).

En un experimento de 30 meses en Haryana, zona árida de India, las especies exóticas *Faidherbia albida* y *Acacia tortilis* crecieron mejor que las autóctonas (*Prosopis cineraria* y *Acacia nilotica*) al ser más resistentes a la sequía y a las heladas (Puri & Kumar, 1993).

En las islas de Cabo Verde, de clima muy árido, los vientos costeros húmedos le permitieron a *Acacia holosericea* crecer con solo unos 200 mm de lluvia distribuidos en 5 años (Rossetko & Gutteridge, 1996). Otro experimento realizado en condiciones de aridez extrema mostró en cambio una mala adaptación de *A. holosericea* a los persistentes vientos salinos costeros y en cambio una alta supervivencia de *Prosopis juliflora*, *Acacia cavendishii* (espinillo) y *Acacia tortilis* luego de 10 meses sin lluvia alguna (Pasiiecznik *et al.*, 1993; 1995).

La especie de mayor crecimiento y supervivencia fue *P. juliflora*, sin embargo, no hubo diferencia de crecimiento entre las plantas inoculadas y la no-inoculadas con rizobios (Pasiiecznik *et al.*, 1995). El análisis químico del suelo reveló que los AFN, respecto del suelo desnudo, disminuyeron la salinidad pero también el contenido de nitrógeno total (Pasiiecznik *et al.*, 1993), desconociéndose en este caso la efectividad de la nodulación o de la fijación biológica en las especies ensayadas. La defoliación inducida por la sequía permitió la acumulación de hojarasca bajo los árboles, pero su descomposición y consiguiente liberación de nitrógeno habrían sido muy lentas, tal vez debido a la aridez del sitio (Pasiiecznik *et al.*, 1993).

En un experimento realizado en la región de Luuq en Somalia -considerado uno de los sitios más cálidos del mundo- *Parkinsonia aculeata*, *Prosopis* spp. y acacias nativas (*A. mellifera*, *A. reficiens*, *A. seyal*) crecieron bien con solo 80 mm de lluvia en cuatro meses; los plantines se ubicaron en pozos para captación de la escasa agua de lluvia y estos se cubrieron con piedra caliza y yeso para minimizar la evaporación, también se construyeron canales para irrigar los pozos con el agua de escurrimiento (Wieland *et al.*, 1985).

La estructura foliar de hojas reducidas de *Casuarina* la hace muy resistente a la sequía (Dawson, 1986). *Leucaena leucocephala* tolera sequías severas debido a la caída de sus hojas en la estación seca, produciendo menos transpiración durante las épocas de estrés hídrico (Natarajan & Paliwal, 1995).

Otras especies de AFN resistentes a la sequía y apropiadas para crecer en climas áridos y semiáridos (incluso en desiertos) son *Acacia aneura* (mulga), *Acacia auriculiformis*, *Acacia leucophloea*, *Acacia senegal*, *Albizia lebbekii*, *Albizia saman*, *Allocasuarina* spp., *Cajanus cajan*, *Faidherbia albida*, *Hardwickia binata*, *Hippophae rhamnoides* y *Pithecellobium dulce* (Baker, 1990; Powell, 1996; Rossetko & Gutteridge, 1996).

Suelos hidromórficos

Estos suelos se encuentran saturados de agua durante largos periodos del año, produciendo anaerobiosis temporal o permanente, con baja disponibilidad de oxígeno para las raíces (Stocking y Murnaghan, 2000).

Los árboles mantienen el buen drenaje del suelo y tienen un fuerte consumo de agua que se elimina como evapo-transpiración. Algunos de estos suelos (los de tipo pseudogley) pueden mejorarse introduciendo AFN de profundo enraizamiento y de hojarasca fácilmente descomponible, como *Alnus glutinosa* que se considera uno de los mejores árboles para mejorar estos suelos (Duchaufour, 1975).

El anegamiento reduce la disponibilidad de oxígeno para el funcionamiento del nódulo en especies fijadoras de nitrógeno. Sin embargo, las casuarinas son capaces de sobrevivir en suelos muy inundables (Baker, 1990) gracias al desarrollo de raíces adventicias y de lenticelas hipertrofiadas que aumentan la disponibilidad de oxígeno, permitiendo una efectiva nodulación en condiciones de anegamiento.

La inoculación con hongos endomicorrizicos mejoraría la tolerancia al anegamiento al suprimir sustancias tóxicas generadas por la respiración anaeróbica (Osundina, 1998).

Otras especies resistentes al anegamiento son *Acacia auriculiformis*, *Acacia holosericea*, *Albizia saman*, *Alnus acuminata*, *Alnus rubra*, *Faidherbia albida*, *Myrica gale* y *Sesbania sesban* (Harrington *et al.*, 1994; Powell, 1996; Roshetko & Gutteridge, 1996; Wheeler & Miller, 1990; Zhao Kefu *et al.*, 1990).

Pueden existir grandes diferencias entre especies, como se ha reportado con *Acacia* (Marcar, 1998) y con *Inga* (Lawrence *et al.*, 1994, 1995), donde algunas especies se muestran muy tolerantes al anegamiento (como *A. salicina*, *A. saligna*, *A. stenophylla*, *I. cinnamomea*, *I. dumosa*, *I. oerstediana*, *I. punctata*) y otras muy sensibles (como *A. ampliceps*, *I. davidsei*, *I. sapindoides*).

En un experimento en invernadero, varias

especies de *Sesbania* mostraron crecimientos similares en un suelo con buen drenaje y en otro inundado hasta 5 centímetros por encima del nivel del suelo; el desarrollo de tejido aerénquima en tallos y raíces como respuesta a la inundación facilita el transporte de aire en los espacios intercelulares bajo el nivel de agua, permitiendo la respiración radicular y la actividad de los nódulos (Evans, 1986).

Un experimento con plantines de *Alnus incana* demostró que la FBN es adversamente afectada por inundaciones estacionales muy prolongadas, especialmente en la estación de crecimiento (Kaelke & Dawson, 2003).

Los AFN se usan en Indonesia para recuperar tierras de pantanos o ciénagas, de difícil uso agrícola por ser arcillosas y ácidas. Allí los granjeros solían hacer zanjas y canales para drenaje, y con la tierra extraída construían lomas y terraplenes donde plantaban *Acacia auriculiformis* y *Paraserianthes falcataria* para estabilizar el terreno (Achmad Mawardi, 1986).

En los suelos de turberas, la baja actividad biológica hace que la descomposición y humificación de la materia orgánica sean muy lentas. Son suelos asfixiantes, muchas veces ácidos, y pobres ya que los nutrientes están almacenados en formas no disponibles (Duchaufour, 1975). Estos suelos son difíciles de rehabilitar; pueden mejorarse por mezclado mecánico de horizontes orgánicos y minerales, por drenaje del exceso de agua y por eventual encalado para subir el pH (Duchaufour, 1975). *Alnus incana* ha crecido con éxito en turberas de Suecia, Finlandia y Alemania (previo drenaje y encalado), donde se retiran grandes cantidades de hojarasca y de turba para ser usadas como combustible; en cambio algunas especies de alisos no crecieron bien en turberas ácidas del Reino Unido e Irlanda (Wheeler & Miller, 1990). *Myrica gale* y *Alnus glutinosa* son nativos de sitios pantanosos y de turberas (Wheeler & Miller 1990), y podrían utilizarse en la rehabilitación de estos suelos.

Un experimento en invernadero demostró que para crecer *Alnus rubra* y *Alnus glutinosa*

sobre un sustrato proveniente de turberas ácidas se necesita agregar fósforo, ya que en estos suelos el desarrollo de micorrizas en alisos es pobre (Wheeler & Miller, 1990).

Rehabilitación de suelos degradados químicamente

Suelos deficitarios en nitrógeno

La mayoría de los suelos pobres en el mundo son deficitarios en nitrógeno y en fósforo (Hussein Zahran, 1999). La FBN puede ser utilizada como una herramienta de mejora en esos casos. Las hojas de 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 & 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.*, *Leucaena leucocephala*, *Mimosa scabrella* y *Paraserianthes falcataria* (Brewbaker *et al.*, 1983; Dawson, 1986; Halenda, 1990; Halenda & Ting, 1993; Powell, 1996; Roshetko & Gutteridge, 1996).

El mayor crecimiento de los AFN respecto de los no fijadores puede generar en aquellos una mayor demanda de nutrientes del suelo (Zheng *et al.*, 1989), especialmente de nitrógeno, fósforo y magnesio (Binkley y Giardina, 1997), situación que puede limitar su crecimiento.

En un experimento de invernadero sobre un suelo deficiente en nitrógeno y fósforo, las especies *Paraserianthes falcataria*, *Adenantha pavonina* y *Schleinitzia insularum* respondieron al agregado de fertilizante mostran-

do un mayor crecimiento temprano; este hecho demostraría que los árboles no eran capaces de fijar simbióticamente suficiente nitrógeno para producir el máximo crecimiento (Moloney *et al.*, 1986).

Huss-Danell (1986) encontró una respuesta incierta a la fertilización de *Alnus incana* en un suelo forestal degradado del norte de Suecia (pobre en nitrógeno y en materia orgánica), ya que los árboles no fertilizados crecieron más en 6 años que los fertilizados con nitrógeno. La explicación podría ser que el nitrógeno agregado al suelo es asimilado por otras plantas que entonces mejorarían su competencia con los árboles por los nutrientes del suelo. En cambio se obtuvo una fuerte respuesta al agregado de cal, observándose mayor crecimiento y mayor biomasa de nódulos y de hojarasca. Se concluye así que *A. incana* se presenta como una especie apropiada para mejorar el contenido de nitrógeno en suelos pobres, si se encala previamente.

En suelos infértiles de Malasia, abandonados por agricultura migratoria, *Acacia mangium* creció más que *Leucaena 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 AFN crezcan mejor que los no fijadores (Puri & Naugraiya, 1998), sin embargo, no se verificó si los árboles tenían nódulos o si estaban fijando nitrógeno.

En suelos deficientes en nitrógeno, la selección de genotipos puede ser importante dada la variabilidad 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 nitrógeno mineral (Sanginga *et al.*, 1990).

Los AFN pueden estimular el crecimiento

de la vegetación vecina debido a la descomposición de sus hojas ricas en nitrógeno, a la exudación radicular de nitrógeno fijado y al rol de las micorrizas (Binkley & Giardina, 1997).

En Puerto Rico se ensayaron interplantaciones entre *Casuarina equisetifolia*, *Leucaena leucocephala* y *Eucalyptus robusta* Sm. La mezcla *Casuarina-Leucaena* tuvo la mayor biomasa tras 4 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 nitrógeno puede ser mitigado por competencia por otros nutrientes del suelo (Binkley & Giardina, 1997).

En general se acepta que la FBN es reducida o eliminada si existen altos niveles de amonio o de nitrato en el suelo (Marschner, 1986; Wall, 2000), aunque este efecto podría ser contrarrestado por fósforo (Wall, 2000). Algunos autores indican que el contenido de nitrógeno en suelos raramente es tan alto como para reducir la FBN (Binkley & Giardina, 1997).

Los suelos de Hawai presentan limitaciones en nitrógeno para el crecimiento de *Eucalyptus* (Schubert *et al.*, 1988), por lo cual se ensayan interplantaciones con AFN.

En la costa húmeda de Hamakua en Hawai (4.600 mm anuales de lluvia), *Eucalyptus saligna* Sm. creció más en 5 años en mezclas 50:50 con *Acacia melanoxylon* (acacia australiana) o con *Paraserianthes falcataria* que en la plantación pura (Schubert *et al.*, 1988). En otro experimento, la mezcla *Eucalyptus-Paraserianthes* (50:50) sin fertilización durante 6 meses creció más que una plantación pura de *Eucalyptus* fertilizada cada 6 meses con nitrógeno durante los 3 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 nitrógeno después del primer año pudo ser reemplazada por plantaciones mixtas 50:50 con *Paraserianthes falcataria* (Schubert *et al.*, 1988).

Otros experimentos realizados en Hawai, descritos por Binkley y Giardina (1997), demostraron que la productividad de estas 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.

Las experiencias de Hawai y Puerto Rico también describieron complejos cambios químicos ocurridos en el suelo bajo los diferentes tratamientos, que deberían ser tenidos en cuenta para evaluar el proceso de rehabilitación del suelo degradado.

Suelos deficitarios en fósforo

El fósforo es un nutriente esencial para la nodulación y para la FBN. Las plantas dependientes de nitrógeno fijado simbióticamente tienen una alta demanda de fósforo (Marschner, 1986), es decir, requieren más fósforo que las plantas dependientes de nitrógeno combinado del suelo (Hussein Zahran, 1999).

Experimentos con AFN tropicales muestran una respuesta significativa de la FBN al agregado de fósforo (Binkley & Giardina, 1997). Se ha demostrado para algunas actinorrizas (Reddell *et al.*, 1997; Valverde *et al.*, 2002; Yang, 1995) que el requerimiento de fósforo para la nodulación es menor que para el crecimiento vegetal, observándose mayor respuesta al agregado de fósforo en el crecimiento de la planta hospedadora que en la formación de nódulos.

De todos modos no estaría muy claro si esta alta demanda de fósforo se relaciona con el proceso mismo de FBN o simplemente con la nutrición general de la planta (Binkley & Giardina, 1997).

Según algunos autores (Yang, 1995; Reddell *et al.*, 1997; Sanginga *et al.*, 1989), el fósforo afectaría la nodulación y la fijación de nitrógeno en forma indirecta a través del crecimiento de la planta (que tendría mayores requerimientos de este elemento que la FBN) y no por un efecto directo sobre el proceso en sí.

Por el contrario, se ha demostrado que el

efecto positivo del fósforo en la nodulación de *Discaria trinervis* (Valverde *et al.*, 2002) y en *Alnus incana* (Wall *et al.*, 2000) se explicaría como un efecto específico de ese elemento en la regulación del crecimiento de los nódulos.

En experiencias de laboratorio se ha observado que el fósforo ejerce un fuerte efecto en el crecimiento, morfología y actividad enzimática de cultivos puros de *Frankia*, sin embargo, su crecimiento y supervivencia en el suelo difícilmente estarían limitados por ese elemento (Yang *et al.*, 1997).

Se ha reportado el importante rol de las micorrizas en la nutrición de leguminosas (Desmond, 1995; Chang *et al.*, 1986; Gardezi *et al.*, 1990; Manguiat *et al.*, 1990) y de actinorrizas (Sidhu & Behl, 1992) en suelos deficitarios en fósforo.

Con respecto a la interacción entre las simbiosis de micorrizas y de *Rhizobium/Frankia*, se han citado varios casos de efectos benéficos (sinergismo) en el crecimiento del árbol hospedador, dado que la micorrización mejoraría la asimilación de fósforo complementando la demanda por ese elemento que genera la fijación de nitrógeno.

En suelos pobres en fósforo, la doble inoculación mejoró la nodulación y la FBN en *Acacia auriculiformis* (Chang *et al.*, 1986), en *Cajanus cajan* (De Lucena Costa *et al.*, 1990; De Lucena Costa & Paulino, 1990) y en *Casuarina equisetifolia* (Vasanthakrishna *et al.*, 1994; Sempavalan *et al.*, 1995) respecto de la inoculación con *Rhizobium/Frankia* sin el agregado de micorrizas.

Por otra parte también se reportaron posibles casos de antagonismo en la simbiosis tripartita de *Gliricidia sepium* (Manguiat *et al.*, 1990).

Suelos salinos y alcalinos

En la recuperación de suelos salinos se usan árboles, cultivos y pastos tolerantes a las sales; en casos de salinidad baja o mediana algunos árboles no fijadores adaptados a la salinidad pueden crecer mejor que los AFN

(Sun & Dickinson, 1995).

La salinidad produce efectos tóxicos y estrés osmótico tanto en plantas como en rizobios; estos últimos cuentan con diversos mecanismos de adaptación a las sales (Husein Zahran, 1999).

Tanto para leguminosas como para actinorrizas, la nodulación y el funcionamiento de la simbiosis son más afectadas por la salinidad que el crecimiento de los simbiontes *Frankia* y *Rhizobium*, mostrándose estos más tolerantes que sus plantas hospedadoras (Husein Zahran, 1999).

El algarrobo (*Prosopis chilensis*, *P. tamarugo*) y el chañar (*Geoffroea decorticans*) habitan en desiertos de Chile y Argentina, siendo muy tolerantes a los suelos salinos (Becker & Saunders, 1983). *Sesbania formosa*, *Sesbania sesban* y *Sesbania bispinosa* toleran los suelos salinos y alcalinos en India, China y Pakistán (Hansen & Munns, 1985; Hussain *et al.*, 1986; Zhao Kefu *et al.*, 1990). *Hippophae rhamnoides* tolera en China suelos con pH 9,5 y con contenido de sales entre 0,6 y 1,1 %, mientras que *Acacia nilotica* tolera pH 9 y 3 % de sales solubles (Roshetko & Gutteridge, 1996).

En áreas fuertemente salinas de Pakistán, con suelos de conductividad eléctrica (CE) entre 2,7 y 2,8 deciSiemens por metro (dS/m), *Casuarina equisetifolia* fue la mejor de entre 10 especies ensayadas (Diem & Dommergues, 1990). Pero no todas las casuarinas son igualmente tolerantes a la sal. De nueve especies de *Casuarina* crecidas en hidroponía, *C. equisetifolia*, *C. obesa* y *C. glauca* fueron las más resistentes a las sales (Diem & Dommergues, 1990).

Pithecellobium dulce es adecuada para suelos sódico-salinos ya que tolera suelos con pH mayor de 10 y CE de hasta 35 dS/m (Dagar, 1998).

Otras especies resistentes a los suelos salinos son *Acacia ampliceps*, *Acacia farnesiana*, *Acacia nilotica*, *Acacia auriculiformis*, *Acacia holosericea*, *Casuarina equisetifolia*,

Casuarina glauca, *Casuarina cunninghamiana*, *Casuarina equisetifolia*, *Elaeagnus angustifolia*, *Geoffroea decorticans*, *Hippophae rhamnoides*, *Leucaena leucocephala*, *Prosopis chilensis*, *Prosopis juliflora*, *Prosopis tamarugo*, *Sesbania formosa*, *Sesbania sesban* y *Sesbania bispinosa* (Becker & Saunders, 1983; Brewbaker *et al.*, 1983; Dagar, 1998; Roshetko & Gutteridge, 1996). En suelos alcalinos se usan *Acacia nilotica*, *Acacia auriculiformis*, *Acacia tortilis*, *Albizia lebbeck*, *Albizia procera*, *Alnus spp.*, *Cajanus cajan*, *Casuarina junghuhniana*, *Dalbergia sissoo*, *Dichrostachys cinerea*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Erythrina variegata*, *Hippophae rhamnoides*, *Pongamia pinnata*, *Prosopis spp.*, *Sesbania formosa*, *Sesbania cannabina* y *Sesbania sesban* (Dagar, 1998; Powell, 1996; Roshetko & Gutteridge, 1996).

El género *Sesbania* se muestra especialmente promisorio tanto en suelos alcalinos como salinos, pero existen grandes diferencias entre especies. Por ejemplo *S. grandiflora* es muy sensible tanto a la salinidad como a la alcalinidad, *S. aegyptica* tolera mejor el estrés salino, *S. glabra* tolera mejor la alcalinidad y *S. grandiflora* muestra cierto carácter halofítico (Ghai *et al.*, 1985; Hansen & Munns, 1985). La germinación sería la etapa crítica para el establecimiento exitoso de árboles propagados de semilla en suelos salinos (Ghai *et al.*, 1985). Se han reportado efectos benéficos del cloruro de colina, del ácido ascórbico y de la sacarosa en la germinación de especies de *Sesbania* en suelos salinos (Hussain *et al.*, 1986). *Sesbania sesban* germina pero no forma nódulos en suelos con CE mayor a 12 dS/m, y directamente no germina con CE mayor a 16 dS/m (Arshad *et al.*, 1985).

Las leguminosas tropicales bajo estrés salino-alcalino muestran un desarrollo de raíces laterales que las ayuda a sobrevivir en esos suelos (Misra & Singh, 1987).

En un experimento realizado en un suelo de pH 10,5 con especies resistentes a suelos alcalinos (*Acacia catechu*, *Acacia nilotica*, *Al-*

bizia lebbeck, *Leucaena leucocephala*, *Pithecellobium dulce*, *Pongamia pinnata*, *Prosopis juliflora* y *Sesbania sesban*), a las 30 semanas las plantas crecieron más cuando se plantaron en pozos profundos (100-120 cm) que en los de menor profundidad (40-60 cm), aunque no hubo diferencia en la supervivencia (Dagar, 1998). Tras 6 años de crecimiento en pozos profundos, *Prosopis juliflora* disminuyó el pH (desde 10,2 hasta 7,3) y la CE (desde 1,70 a 0,5 dS/m) del suelo superficial, mejorando también el contenido de carbono orgánico, potasio y fósforo disponible.

En la preparación de plantines de árboles en regiones muy áridas y calurosas, se ha recomendado no utilizar para riego agua con una salinidad mayor de 0,860 dS/m (Wieland *et al.*, 1985).

Suelos ácidos

Se consideran ácidos los suelos con pH menor a 6,8, aunque el crecimiento vegetal es afectado solo a pH inferiores a 5,0 (Dagar, 1998). Los suelos Oxisoles, Ultisoles, Ferrisoles y Podzoles son naturalmente ácidos (Szott, 1995), así como los suelos de regiones tropicales húmedas, muy meteorizados (Fassbender, 1982).

Los suelos ácidos son generalmente de baja fertilidad debido a niveles tóxicos de aluminio y manganeso y a deficiencias en calcio, magnesio, potasio y molibdeno (Fisher & Juo, 1995; Hussein Zahran, 1999).

La acidez afecta tanto la supervivencia y persistencia de rizobios en el suelo como la nodulación y fijación de nitrógeno, las condiciones de acidez o de niveles tóxicos de aluminio o manganeso afectarían más a la planta que a los simbioses y la nodulación sería más afectada que el crecimiento vegetal (Hussein Zahran, 1999).

Se han citado varios mecanismos posibles por medio de los cuales los árboles (incluyendo los fijadores de nitrógeno) pueden crecer en suelos de bajo pH y pueden tolerar la baja fertilidad que acompaña a la acidez (Hussein

Zahran, 1999). Al tener los AFN mayores requerimientos en fósforo que los no-fijadores, su crecimiento en suelos ácidos sería muy dependiente de la formación de micorrizas (Fisher & Juo, 1995; Powell, 1995).

Los suelos ácidos suelen corregirse por encalado con carbonatos de calcio y de magnesio (calizas, dolomitas), cal, silicatos de calcio o escorias industriales (Fassbender, 1982).

Se han citado mejoras en el crecimiento y la nodulación de AFN en suelos ácidos encalados (Desmond, 1995; Huss-Danell, 1986; Hussein Zahran, 1999; Wheeler & Miller, 1990); ya sea por el efecto corrector del pH o por una mejora en la nutrición del calcio.

Sin embargo, el encalado no mejoraría el crecimiento de AFN no adaptados a suelos ácidos como en algunas especies de *Flemingia*, *Leucaena*, *Pithecellobium* y *Prosopis* (Kass, 1995), o directamente lo empeoraría en suelos con alta saturación de aluminio (Hutton, 1995; Kass *et al.*, 1995). Además, un encalado excesivo puede llevar a la alcalinización del suelo, con efectos inhibitorios tanto para las plantas como para sus simbiontes (Hussein Zahran, 1999).

Muchos AFN adaptados a suelos ácidos también responden bien a la fertilización, lo que sugiere que existen límites nutricionales múltiples para el crecimiento que no se pueden aliviar por agregado de un solo nutriente (Szott, 1995). Por ejemplo se ha citado (Kass, 1995) que *Gliricidia sepium* y *Paraserianthes falcataria* necesitan calcio y *Calliandra calothyrsus* magnesio para crecer bien en suelos ácidos. Otros AFN como *Acacia mangium*, *Inga edulis* y *Calliandra calothyrsus* crecen tan bien en suelos ácidos como en suelos más fértiles, pero igualmente responden a la fertilización (Szott, 1995).

Los sistemas de cultivos en callejón con un encalado leve, son muy útiles y económicos para la producción de cultivos en suelos ácidos de zonas lluviosas como en India (Dagar, 1998) y Costa Rica (Lawrence *et al.*, 1995), facilitando una mejor sincronía entre la libera-

ción de nutrientes y su demanda por el cultivo en comparación con los sistemas de abono verde.

Sin embargo, la producción del cultivo no siempre es mayor que en el monocultivo con agregado de fertilizantes, aparentemente el problema no sería la cantidad de nitrógeno atmosférico fijado sino su transferencia al cultivo (Kass, 1995).

Muchos arbustos fijadores de nitrógeno presentan ventajas sobre plantas herbáceas presentando mayor cantidad de materia seca, mejor persistencia, mejor tolerancia al mal manejo y capacidad de retener el follaje bajo condiciones de estrés; características muy útiles en suelos ácidos (Argel y Maass, 1995).

En suelos ácidos de China se trabaja para obtener híbridos entre *Leucaena leucocephala* (apreciada por su valor forrajero y maderero) y las especies *Leucaena diversifolia* y *Leucaena shannoni*, que crecen mejor que la primera en suelos ácidos (Xu & Hongfeng, 1994). Cruzamientos similares entre especies de *Leucaena* se han ensayado en oxisoles de Colombia, Brasil y Malasia (Hutton, 1995).

Powell (1995) ha realizado un inventario de AFN tolerantes a los suelos ácidos bajo diferentes condiciones climáticas. De todos modos los AFN no necesariamente funcionan mejor que árboles no fijadores adaptados a suelos ácidos, ya que estos últimos pueden reciclar mayores cantidades de calcio y magnesio, elementos que son más limitantes que el nitrógeno en suelos ácidos (Kass, 1995).

Rehabilitación de suelos con otras formas de degradación

Suelos minerales

Los suelos minerales brutos están casi desprovistos de humus y tienen poca o nula actividad biológica. Quizás la mejor forma de utilización de estos suelos sea la forestación (Duchaufour, 1975), ya que los árboles se adaptan bien a las características de estos suelos, estabilizándolos y protegiéndolos con-

tra la erosión. Se recomienda (Duchaufour, 1975) primero instalar una cubierta herbácea –resistente a la movilidad del sustrato y a la carencia de nitrógeno- luego una arbustiva y finalmente un bosque; de este modo en algunos años se formará un horizonte superficial húmifero.

Especies que crecen bien en suelos minerales son *Alnus rubra* (Foth, 1990; Harrington *et al.*, 1994), *Casuarina* spp. (Diem & Dommergues, 1990; Huss-Danell, 1997) y *Myrica rubra* (Hiyoshi *et al.*, 1985).

Un experimento con *Acacia auriculiformis* y *Pinus kesiya* Royle ex Gordon en suelos minerales de Filipinas mostró mejora en la población de macrofauna y en las propiedades físicas del suelo bajo *Acacia* a costa de la disminución del contenido de nutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo disponible y calcio) bajo ambas plantaciones (Ohta, 1990).

Suelos superficiales

Los suelos superficiales o poco profundos presentan inconvenientes para el crecimiento de árboles, afectando la profundidad alcanzada por las raíces y la cantidad de agua disponible (Power *et al.*, 1981). *Acacia auriculiformis* crece bien en suelos poco profundos debido a su sistema radicular extendido superficialmente (Powell, 1996). Varias especies de *Acacia* (*A. holosericea*, *A. aulacocarpa*, *A. crassicarpa*, *A. mangium*) crecen bien en suelos superficiales siempre que la humedad sea suficiente (Bruford Briscoe, 1995). *Gleditsia triacanthos* (acacia negra) crece bien en suelos superficiales y rocosos del sur de Francia (Foroughbakhch *et al.*, 1995). *Adenanthera pavonina* y *Alnus acuminata* crecen bien tanto en suelos profundos como en superficiales (Powell, 1996; Roshetko & Gutteridge, 1996).

Suelos enterrados

Los suelos enterrados son aquellos donde sedimentos poco fértiles provenientes de zonas altas erosionadas cubren suelos fértiles. Los sedimentos pueden originarse en

erupciones volcánicas, en deslizamientos de tierra durante grandes lluvias o por tormentas de viento y polvo provenientes de zonas erosionadas. *Alnus glutinosa*, *Casuarina* spp., *Elaeagnus angustifolia* y *Prosopis cineraria* se usan para estabilizar depósitos recientes en áreas con deslizamientos de tierra o actividad volcánica (Huss-Danell, 1997; Roshetko & Gutteridge, 1996; Wheeler & Miller, 1990).

Los alisos se emplean como rutina para estabilizar depósitos recientes en casos de inundaciones y avalanchas en Europa (Dawson, 1986; Harrington *et al.*, 1994). *Prosopis cineraria* puede tolerar enterramientos periódicos (Roshetko & Gutteridge, 1996).

Algunos AFN pueden usarse como cortinas de protección («shelterbelts») contra vientos cargados de polvo y arena que amenazan enterrar tierras productivas o construcciones humanas, como *Casuarina cunninghamiana*, *C. equisetifolia* (en China, Senegal, India y Túnez), *C. glauca* (en Egipto, Túnez, Israel y Yemen), *C. oligodon* (Papua-Nueva Guinea) y *C. junghuhniana* (Diem & Dommergues, 1990; Powell, 1996). También se usan con este propósito *Acacia nilotica*, *Acacia tortilis*, *Albizia lebbbeck*, *Albizia saman*, *Dalbergia sissoo* y *Leucaena* spp.

Incendios de bosques y de pastos

Los incendios, ya sean intencionales o accidentales, producen cambios en la humedad del suelo, aumento del pH, menor actividad microbiana, altas pérdidas de carbono, nitrógeno y azufre por volatilización y mineralización de fósforo, calcio, magnesio y potasio. Estos últimos se transforman en cenizas las cuales, excepto fósforo, son susceptibles de pérdida en el perfil del suelo por percolación y lixiviación (Fassbender, 1982). La acumulación de iones básicos en la ceniza causa una fuerte pero temporaria fertilización del terreno, pero al poco tiempo se produce una abrupta declinación de las propiedades químicas. Muchos AFN son resistentes al fuego y pueden utilizarse como cortinas de protección

contra incendios. *Alnus rubra* protege de incendios a coníferas adyacentes ya que su corteza es resistente al fuego y forma pocos residuos combustibles (Harrington *et al.*, 1994). *Acacia mangium* se suele plantar a lo largo de carreteras en Sumatra para impedir la extensión de los incendios debido a su rápido crecimiento y a su corona cerrada (Seibert, 1988). *Mimosa scabrella* se establece en el estado de Paraná (Brasil) donde bosques nativos de araucaria han sido cortados y quemados (Powell, 1996). En una plantación de 18 meses de *Acacia mangium* en Indonesia dañada accidentalmente por un incendio de pastos, se observó que los árboles con diámetro a la altura de pecho menor a 4 cm murieron mientras que los de más de 7 cm pudieron sobrevivir (Seibert & Kuncoro, 1987). *Allocauarina littoralis* y *A. tortuosa* se regeneran vegetativamente luego de incendios (Crowley, 1986). Otras especies tolerantes al fuego son *Acacia leucophloea*, *Acacia crassicaarpa*, *Acacia mangium*, *Albizia lebbeck*, *Allocauarina decasneana* y *Erythrina variegata* son (Dawson, 1986; Crowley, 1986; Powell, 1996; Roshetko & Gutteridge, 1996; Xu & Hongfeng, 1994).

Suelos dominados por malezas

Los árboles suelen ser susceptibles frente a la competencia con malezas debido a que su sistema radicular (preparado para la supervivencia a largo término) es menos denso que el de las hierbas, con lo cual tienen menor acceso a los nutrientes móviles del suelo y entonces su establecimiento en terrenos dominados por malezas es difícil (Gutteridge, 1998).

Imperata cilíndrica (L.) Beauv. es una maleza de raíz profunda, con rizomas bien desarrollados, muy agresiva y muy difícil de controlar, que rebrota vigorosamente luego de incendios o en períodos de barbecho demasiado breves. La rehabilitación de terrenos dominados por *Imperata*, si es posible, es costosa y los planes de reforestación generalmen-

te fracasan o son antieconómicos (Seibert & Kuncoro, 1987). Algunos AFN, especialmente los de canopea cerrada y corona ancha, son eficaces para controlar malezas en suelos pobres, eliminándolas por su sombra o por la capa de hojarasca. La inoculación con rizobios y con hongos endomicorrízicos mejoraría el establecimiento y el crecimiento temprano de estos árboles (Gutteridge, 1998).

Gliricidia sepium crece bien en pastizales degradados dominados por *Imperata cilíndrica* y *Themeda triandra* Forssk. en Filipinas, reportándose una buena respuesta a la inoculación con rizobios (Manguiat *et al.*, 1989).

Flemingia macrophylla e *Inga edulis* se usan en control de malezas, ya que sus hojas son de lenta descomposición y la capa de hojarasca previene la germinación de semillas de malezas (Powell, 1996). El mantillo de hojarasca es eficiente para controlar malezas mientras permanece en el suelo sin descomponerse ya que previene la germinación de semillas de malezas anuales, este tipo de control no sería efectivo para malezas propagadas vegetativamente. Son mejores las especies que generen capas gruesas de hojarasca de lenta descomposición; la morfología de la hoja es también importante en el sentido que el mantillo no sea fácilmente arrastrable por el viento y permanezca junto al tronco el mayor tiempo posible (Kintomo *et al.*, 1995).

Se ha reportado que para un mejor control de malezas las combinaciones de leguminosas herbáceas y arbóreas funcionan mejor que establecer solo árboles o solo plantas (Kass, 1995), y que las interplantaciones de árboles fijadores con no fijadores lo hacen mejor que estos últimos en plantaciones puras (Stanley & Nichols, 1995).

En campos dominados por *Imperata* en Nigeria, una densa canopea sin poda de *Gliricidia sepium* que persista unos 8 o 9 meses del año suprime la maleza por sombra durante un periodo de barbecho de 2 a 3 años (Aken'Ova & Atta-Krah, 1986).

Dos experimentos realizados en suelos

pobres y ácidos de Indonesia dominados por *Imperata cylindrica*, muestran un buen potencial de las acacias para competir con malezas, principalmente las especies *A. mangium*, *A. auriculiformis*, *A. cincinnata*, *A. crassicarpa* y *A. leptocarpa* (Hadi *et al.*, 1996; Otsamo & Adjers, 1995).

Otras especies tolerantes a la competencia con malezas son *Elaeagnus umbelata*, *Flemingia congesta*, *Indigofera teysmanni*, *Sesbania sesban* y *Sesbania formosa* (Dawson, 1986; Gutteridge, 1998; Neil, 1990; Roshetko & Gutteridge 1996).

CONCLUSIONES

Los AFN son capaces de establecerse y crecer sobre sustratos de muy mala aptitud, tolerando desde una extrema aridez hasta inundaciones persistentes, desde suelos ácidos a alcalinos, desde suelos orgánicos a minerales, así como arenas del desierto, suelos decapitados, suelos superficiales y suelos compactados; siendo también capaces de resistir incendios, tempestades tropicales, derrumbes y malezas agresivas. Para algunos sitios en particular, hay suficiente información científica para asegurar que los AFN son la mejor, o tal vez la única opción de rehabilitación. Son ejemplos de esos casos los suelos de pendiente pronunciada, sitios bajo intensa erosión y terrenos invadidos por malezas.

El mero establecimiento de AFN no necesariamente constituye la única política de rehabilitación de suelos degradados, muchas veces se necesitan tareas adicionales (con su correspondiente costo) como ser construcción de terrazas, terraplenes y pozos, el agregado de enmiendas y fertilizantes, los sistemas de captación de agua y de drenaje y otras formas de manejo (poda, rotaciones, etc.). La utilización de AFN para recuperar suelos degradados no esta desprovista de limitaciones y potenciales peligros, como el riesgo de transformarse en plagas invasoras o el hecho de que

no siempre funcionan mejor que los árboles no fijadores, que los sistemas agroforestales o que las plantaciones forestales mixtas. La sustentabilidad de la fertilidad del suelo a largo plazo se podría lograr a través de una óptima combinación de fijación biológica de nitrógeno y de fertilización mineral. (Binkley y Giardina, 1997).

En la mayoría de los trabajos científicos citados aquí se compara el rendimiento de AFN con árboles no-fijadores, pero en pocas ocasiones se ha señalado si los árboles tenían nódulos o si estaban efectivamente fijando nitrógeno. Muchos AFN nodulan bien con microsimbiontes nativos del suelo, aunque estos nódulos pueden ser ineficientes (Almaraz Suarez & Ferrera Cerrato, 2000; Wolters, 1998). Sin embargo, la inoculación con cultivos puros de *Rhizobium* o *Frankia* aseguraría una óptima nodulación.

Para verificar y cuantificar la fijación de nitrógeno existen técnicas como el ensayo de reducción de acetileno o la técnica de dilución isotópica con ¹⁵N que pueden utilizarse tanto a campo como en invernadero.

Los datos recopilados en este trabajo permiten concluir que los AFN son adecuados para utilizar en terrenos muy degradados donde las practicas agrícolas y ganaderas serian muy costosas o directamente impracticables. Y si bien los beneficios económicos a corto plazo de los árboles no pueden equipararse al producido por los cultivos en un suelo fértil, aquellos pueden asegurar la subsistencia de los poseedores de la tierra a través de necesidades básicas como leña, carbón, forraje, madera y productos comestibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Achmad Mawardi, A. M.** 1986. Some NFT species used in mound culture in tidal swamp areas of South Kalimantan, Indonesia. Nitrogen Fixing Tree Research Report 4: 24.
- Aken'Ova, M. E. & A. N. Atta-Krah.** 1986. Control of Spear Grass (*Imperata cylindrica* (L.)

- Beauv.) in an alley-cropping fallow. Nitrogen Fixing Tree Research Report 4: 27-28.
- Almaraz Suarez, J. J. & R. Ferrera Cerrato.** 2000. Inoculación de leguminosas con cepas de rizobios. En: La Fijación Biológica de Nitrógeno en América Latina: El aporte de las técnicas isotópicas. Peña Cabrales J. J., Ed. Improsa S. A., Irapuato. pp 53-58.
- Argel, P. J. & B. Maass.** 1995. Evaluación y adaptación de leguminosas arbustivas en suelos ácidos infértiles de América tropical. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp 215-227.
- Arshad, M., A. Hussain. & A. Hussain.** 1985. Growth of *Sesbania sesban* under saline conditions. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 35.
- Baker, D. D.** 1990. Actinorhizal plants: underexploited trees and shrubs for forestry and agroforestry. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 8: 3-7.
- Baker, D. D. & C. R. Schwintzer.** 1990. Introduction. En: The Biology of Frankia and Actinorhizal Plants. Schwintzer C. R. & J. D. Tjepkema, Ed. Academic Press, San Diego, pp 1-13.
- Becker, R. & R. M. Saunders.** 1983. Stress tolerant crops from nitrogen fixing trees. Nitrogen Fixing Tree Research reports 1: 32-34.
- Bencat, T.** 1993. Heavy metal content of Robinia pseudoacacia leaves in southern Slovakia. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 11: 109-111.
- Binkley, D. & C. Giardina.** 1997. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. En: Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forest. Sadanandan Nambiar E.K. & A. G. Brown, Ed. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, pp 297-337.
- Brewbaker, J. L., J. Halliday & J. Lyman.** 1983. Economically important nitrogen fixing tree species. Nitrogen Fixing Tree Research Reports, 1, 35-40.
- Brewbaker, J. L., K. B. Willers & B. Macklin.** 1990. Nitrogen fixing trees: validation and prioritization. Nitrogen Fixing Tree Research Report 8: 8-16.
- Bruford Briscoe, C.** 1995. Four acacia species for acid soils. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp 265-271.
- CEPAL.** 1990. Los recursos hídricos de América Latina y del Caribe: Planificación, desastres naturales y contaminación. Estudio científico Nº 77, Santiago de Chile, 266 pp.
- Crowley, G. M.** 1986. Factors affecting regeneration in north Queensland populations of *Allocastraria littoralis* and *A. tortuosa*: A preliminary report. Nitrogen Fixing Tree Research Report, 4, 1-2.
- Chang, K. P., H. T. Hu & P. C. Kao.** 1986. Effect of endomycorrhizal fungi and rhizobium inoculation on growth of *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 4: 40-41.
- Chaturvedi, A. N.** 1985. Biomass production on saline-alkaline soils. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 7-8.
- Dagar, J. C.** 1998. Nitrogen fixing fodder trees for degraded and problematic lands. En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, pp. 73-81.
- Dawson, J.O.** 1986. Actinorhizal plants: Their use in forestry and agriculture. Outlook in Agriculture 15: 202-208.
- Dawson, J.O.** 1990. Interaction among Actinorhizal and associated plant species. En: The Biology of Frankia and Actinorhizal Plants. Schwintzer C. R. & J. D. Tjepkema, Ed. Academic Press, San Diego, pp 299-316.
- De Lucena Costa, N. & V. T. Paulino.** 1990. Forage production of pigeon pea varieties in Rondonia's savannas. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 8: 120.
- De Lucena Costa, N., V. T. Paulino & N. A. Rodrigues.** 1990. Response of pigeonpea to Rhizobium and mycorrhiza inoculation. Nitrogen Fixing trees Research Report 8: 121-122.
- Desmond, D.** 1995. *Calliandra calothyrsus* and *Gliricidia sepium* seedling growth response to phosphorus and soil acidity. Nitrogen Fixing Tree Research reports 13: 10-15.
- Diem, H. G. & Y. R. Dommergues.** 1990. Current and potential uses and management of casuarinaceae in the tropics. En: The Biology of Frankia and Actinorhizal Plants. Schwintzer C. R. & J. D. Tjepkema, Ed. Academic Press, San Diego, pp.317-342.
- Duchauffour, P.** 1975. Manual de edafología. Ed. Toray-Masson S. A., Barcelona, 478 pp.
- Easdale, T.** 2000. Crecimiento de 12 especies de árboles pioneros de bosque montano en suelos de cultivos, pastisales, "peladares" y suelos fertilizados. Actas de la XXII Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, Río Cuarto, Provincia de Córdoba.
- Ejercito, M. G. A.** 1998. A sustainable development program in the Philippines. En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.120-124.
- Evans, D. O.** 1986. *Sesbania* research in Hawaii: Summary of a project. Nitrogen Fixing Tree

- Research Report 4: 57-58.
- FAO.** 1994. Erosión de suelos en América latina. Disponible en http://www.fao.org/desertification/search_doc_dett.as?id_doc=2316. Último acceso: Marzo 2004
- FAO, UNDP & UNEP.** 1994. Land degradation in south Asia: Its severity, causes and effects upon the people. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/V4360E/V4360E00.htm>. Último acceso: Marzo 2004
- Fassbender, H. W.** 1982. Química de Suelos-Con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, 398 pp.
- Fisher, R. F. & A. S. R. Juo.** 1995. Mechanism of tree growth in acid soils. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.1-18.
- Foroughbakhch, R., L. A. Hauad, C. Dupraz & R. Cordese R.** 1995. Pod yield of 16 accessions of *Gleditsia triacanthos*. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 13: 58-59.
- Foth, H. D.** 1990. Fundamentals of Soil Science. Ed. John Wiley & Sons, New York.
- Francis, G. S., F. J. Tabley & K. M. White.** 1999. Restorative crops for the amelioration of degraded soil conditions in New Zealand. Australian Journal of Soil Research 37: 1017-1034.
- Franco, A. A., E. F. C Campello, L. E. Dias & S. M. De Faria.** 1995. Revegetation of acidic residues from bauxite mining using nodulated and mycorrhizal legume trees. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.313-320.
- Gardezi, A. K., D. Jaen Contreras, R. A. Guzman-Plazola & R. Ferrera-Cerrato.** 1990. Growth of *Acacia farnesiana* associated with mycorrhizal fungi in three types of mexican soils. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 8: 99-102.
- Gardner, J.** 2001. Rehabilitating mines to meet land use objectives: bauxite mining in the jarrah forest of Western Australia. Unasylva 52. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y2795e/Y2795e00.HTM>. Último acceso: Marzo 2004.
- Ghai S. K., D. L. N. Rao & L. Batra.** 1985. Effect of salinity and alkalinity on seed germination of three type sesbanias. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 10-12.
- Griffith, J. J. & T. J. Toy.** 2001. Evolution in revegetation of iron-ore mines in Minas Gerais State, Brazil. Unasylva 52. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y2795e/Y2795e00.HTM>. Último acceso: Marzo 2004.
- Gutteridge, R. C.** 1998. The potential of nitrogen fixing trees in livestock production systems. En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.1-16.
- Gutteridge, R. C. & R. Akkasaeng.** 1985. Evaluation of nitrogen fixing trees in northeast Thailand. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 46-56.
- Hady, T. S., G. Adjers, A. Otsamo & R. Vuokko.** 1996. Early growth of 27 *Acacia mangium* provenances on Imperata cylindrica grassland in South Kalimantan, Indonesia. Forest, Farm & Community Tree Research Reports 1: 45.
- 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. & S. P. Ting.** 1993. Performance of three legume tree species on degraded acidic soils. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 11: 29.
- Hansen, E. H. & D. N. Munns.** 1985. Screening of *Sesbania* species for NaCl tolerance. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 60-61.
- Harrington, C. A., J. C. Zasada & E. A. Allen.** 1994. Biology of Red Alder. En: The Biology and Management of Red Alder. Hibbs D. E., D. S. DeBell & R. F. Tarrent, Ed. Oregon State University Press, Corvallis, Hensley D. L. & P. L. Carpenter. 1984. Effect of lime additions to acid strip-mine spoils on survival, growth and nitrogen fixation (acetylene reduction) of several woody legume and actinomycete-nodulated species. Plant and Soil 79: 353-367.
- Hiyoshi, T., H. Sasakawa & M. Yatazawa.** 1985. Nitrogen fixing root nodule of *Myrica rubra*. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 33-34.
- Hussain, A. M., M. Arshad, A. M. Ranjha, A. Hussain & F. Ali.** 1986. Role of choline chloride in salt tolerance of *Sesbania bispinosa*. Nitrogen Fixing Tree Research Report 4: 34-35.
- Huss-Danell, K.** 1986. Growth and production of leaf litter nitrogen by *Alnus incana* in response to liming and fertilization on degenerated forest soil. Canadian Journal of Forest Research 16: 847-853.
- Huss-Danell, K.** 1997. Actinorhizal symbioses and their N_2 fixation. New Phytologist 136: 375-405.
- Hussein Zahran, H.** 1999. Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. Microbiology and Molecular Biology Reviews 63: 968-989.
- Hutton, E. M.** 1995. Very acid soil constraint for

- tree legumes like *Leucaena* and selection and breeding to overcome them. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp. 258-264.
- Jensen, A. M. & M. S. Hajej.** 2001. The Road of Hope: control of moving sand dunes in Mauritania. *Unasylyva* 52. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y2795e/Y2795e00.HTM>. Último acceso: Marzo 2004.
- Kaelke, C. M. & J. O. Dawson.** 2003. Seasonal flooding regimes influence survival, nitrogen and biomass in *Alnus incana* ssp. *rugosa*. *Plant and Soil* 254: 167-177.
- Kass, D. L.** 1995. Are nitrogen fixing trees a solution for acid soils? En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & Szott L.T., Ed. Winrock International, Morrilton, pp.19-31.
- Kass, D. L., A. Tineo, J. Faustino, N. Arriaza, E. Viquez, M. Rodriguez & J. Jimenez.** 1995. Performance of *Erythrina fusca* associated with annual crop following liming of an Acrudoxic Melanudand having 70 percent aluminium saturation. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.42-52.
- Keresztesi, B.** 1988. Natural range of black locust and its distribution in other countries. En: The Black Locust. Keresztesi B., Ed. Akademiai Kiadó, Budapest, pp.9-17.
- Kintomo, A. A., A. A. Agboola & H. J. W. Mutsaers.** 1995. Weed control effects of mulch from prunings of *Leucaena leucocephala* and *Senna siamea*. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 13: 75-78.
- Lal, R.** 1996. Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. II: Soil chemical properties. *Land Degradation & Rehabilitation* 7: 87-98.
- Lal, R.** 1997. Soil degradative effects of slope length and tillage method on alfisols in Western Nigeria. III Soil physical properties. *Land Degradation & development* 8: 325-342.
- Lal, R.** 2000. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21 st century. *Soil Science* 165: 191-207.
- Lawrence, A., T. D. Pennington, M. R. Hands & R. A. Zuniga.** 1995. Inga: High diversity in the neotropics. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.130-141.
- Lawrence, A., T. D. Pennington, R. A. Zúniga & M. Micas.** 1994. Early growth of Inga species in central and South America. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 12: 74-79.
- Manguiat, I. J., D. M. Padilla, D. M. Mendoza & A. M. Pérez.** 1990. Rhizobia-mycorrhiza inoculation and N-P fertilization of *Gliricidia* in a degraded upland area. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 8: 140-142.
- Markar, N. E.** 1998. Fodder value of four salt-tolerant Australian Acacias. En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & Roshetko J. M. Ed. Winrock International, Morrilton, pp.92-101.
- Marschner, H.** 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, New York, 674 pp.
- Michelena, R. O.** 2002. Como controlar la erosión para que no destruya los suelos. INTA, Instituto de Suelos, Castelar, Centro de Investigación en Recursos Naturales. Disponible en http://www.inta.gov.ar/suelos/info/documentos/informes/La_erosion_hidrica.htm. Último acceso: Marzo 2004.
- Michelena, R. O. y R. Mon.** 1987. Stabilization of sand dunes in the Buenos Aires Atlantic coast. Resúmenes del X Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- Misra, C. M. & S. L. Singh.** 1987. Ecological evaluation of certain leguminous trees for agroforestry. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 5: 5.
- Moloney, R. A., A. L. Aitken & R. C. Gutteridge.** 1986. The effect of phosphorus and nitrogen applications on the early growth of *Adenantha pavonina*, *Albizia falcata* and *Schleinitzia insularum*. *Nitrogen Fixing Tree Research Report* 4: 3-6.
- Montagnini, F.** 1992. Sistemas agroforestales-Principios y aplicaciones en los trópicos. Organización para Estudios Tropicales. San José, Costa Rica.
- Natarajan, K. & K. Paliwal.** 1995. Photosynthesis by *Leucaena leucocephala* during water stress. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 13: 79-83.
- Neil, P. E.** 1990. Experience with *Indigofera teysmanni* in Nepal. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 8: 143.
- Ohta, S.** 1990. Initial soil changes associated with afforestation with *Acacia auriculiformis* and *Pinus kesiya* on denuded grasslands of the Pantabangan area, Central Luzon, The Philippines. *Soil Science & Plant Nutrition* 36: 633-643.
- Osundina, M. A.** 1998. Nodulation and growth of mycorrhizal *Casuarina equisetifolia* J. R. and G. First in response to flooding. *Biology and Fertility of Soils* 26: 95-99.
- Otsamo, A. y G. Adjers.** 1995. Early growth of five *Acacia* species on *Imperata cylindrica* grassland. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 13: 23-26.
- Parera, A. N. F.** 1998. Dry matter yield and feeding

- value of leguminous shrub species grown in the marginal lands of central Sri Lanka. Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, pp. 82-91.
- Parrotta, J. A.** 1990. Hurricane damage and recovery of multipurpose tree seedlings at a coastal site in Puerto Rico. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 8: 64-66.
- Parrota, J. A., D. D. Baker & M. Fried.** 1994. Application of ¹⁵N-enrichment methodologies to estimate nitrogen fixation in *Casuarina equisetifolia*. Canadian Journal of Forest Research 24: 201-207.
- Pasiecznik, N. M., F. M. A. Harris & P. J. C. Harris.** 1993. *Prosopis* and *Acacia* species growth and effects on soil fertility. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 11: 1-3.
- Pasiecznik, N. M., M. T. Vera Cruz & P. J. C. Harris.** 1995. *Prosopis juliflora* withstands extreme aridity and goat browsing in the Republic of Cape Verde. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 13: 89-91.
- Powell, M. H.** 1995. Nitrogen fixing trees and shrubs for acid soils-An overview. En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.73-81.
- Powell, M. H.** 1996. Species tolerant of acid soils (Appendix A: Nitrogen fixing tree highlights). En: Nitrogen fixing trees for acid soils- A field manual. Ed. Winrock International, Morrilton, pp. 51-91.
- Power, J. F., F. M. Sandoval, R. E. Ries & S. D. Merrill.** 1981. Effects of topsoil and subsoil thickness on soil water content and crop production on a disturbed soil. Soil Science Society of America Journal 45: 124-129.
- Puga, R. C. & R. Bethancourt.** 1990. Early growth of *Acacia mangium* Willd. on an Ultisol of Panama. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 8: 111.
- Puri, S. & M. N. Naugraiya.** 1998. Performance of fodder tress on a entisol of Chhattisgarh region. En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.110-115.
- Puri, S. & A. Kumar.** 1993. Growth of indigenous and exotic trees in arid Haryana. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 11: 16.
- Ramirez-Saad, H. & M. Valdes.** 1989. Sewage watering at the nursery improves growth and nodulation on casuarinas. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 7: 87-88.
- Reddell, P., Y. Yang & M. Shipton.** 1997. Do *Casuarina cunninghamiana* seedlings dependent on symbiotic N₂ fixation have higher phosphorus requirements than those supply with adequate fertilizer nitrogen? Plant and Soil 189: 213-219.
- Roshetko, J. M. & R. C. Gutteridge.** 1996. Nitrogen fixing fodder trees (Appendix D: Special FACT sheets). En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production - A field Manual. Ed. Winrock International, Morrilton, pp.81-125.
- Sanginga, N., G. D. Bowen & S. K. A. Danso.** 1990. Genetic variability in symbiotic nitrogen fixation within and between provenances of two *Casuarina* species using the ¹⁵N-labeling methods. Soil Biology & Biochemistry 22: 539-547.
- Sanginga, N., S. K. A. Danso & G. D. Bower.** 1989. Nodulation and growth response of *Allocauarina* and *Casuarina* species to phosphorus fertilization. Plant Soil 118: 125-132.
- Sarrailh, J. M. & N. Ayrault.** 2001. Rehabilitation of nickel mining sites in New Caledonia. Unasylyva 52. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y2795e/Y2795e00.HTM>. Último acceso: Marzo 2004.
- Schubert, T. H., D. S. DeBell & C. D. Whitesell.** 1988. *Eucalyptus*/legume mixtures for biomass production in Hawaii. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 6: 26-27.
- Seibert, B.** 1988. Groundfire damage to a young *Acacia mangium* Willd. stand. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 6: 38-39.
- Seibert, B. & I. Kuncoro.** 1987. Rehabilitation of *Imperata cylindrica* (L.) Beauv. Grassland with *Acacia mangium* Willd. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 5: 18-19.
- Sempavalan, J., C. T. Wheeler & J. E. Hooker.** 1995. Lack of competition between *Frankia* and *Glomus* for infection and colonization of roots of *Casuarina equisetifolia* (L.). New Phytologist 130: 429-436.
- Sidhu, O. P. & H. M. Behl.** 1992. Infectivity and effectiveness of VAM fungi in *Casuarina obesa* for alkaline soil sites. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 10: 150-154.
- Stanley, S. A. & J. D. Nichols.** 1995. *Terminalia amazonia* intrepanted with nitrogen fixing trees on a degraded pasture in Uvita de Osa, Costa Rica. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & L. T. Szott, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.237-249.
- Stocking, M. & N. Murnaghan.** 2000. Land degradation-Guidelines for field assessment. Disponible en <http://www.unu.edu/env/plec/l-degrade/index-toc.html>. Último acceso: Marzo 2004.
- Sun, D. & G. R. Dickinson.** 1995. Salinity effects on tree growth, root distribution and transpiration of *Casuarina cunninghamiana* and *Eucalyptus camaldulensis* planted on a saline site in tropical north Australia. Forest Ecology and Management 77: 127-138.

- Szott, L. T.** 1995. Growth and biomass production of nitrogen fixing trees on acid soils. En: Nitrogen Fixing Trees for Acid Soils. Evans D.O. & Szott L.T. Ed. Winrock International, Morrilton, pp.61-76.
- Thind, H. S., S. S. Bawa & H. S. Sur.** 1998. Integration of nitrogen fixing trees in different farming systems of submontaneous areas through on-farm applied research. En: Nitrogen Fixing Trees for Fodder Production. Daniel J. N. & J. M. Roshetko, Ed. Winrock International, Morrilton, pp.136-140.
- Valdés, M.** 2000. La simbiosis actinorrhiza. En: La Fijación Biológica de Nitrógeno en América Latina: El aporte de las técnicas isotópicas. Peña Cabriales J. J., Ed. Impresa S. A., Irapuato, pp. 29-40.
- Valverde, C., A. Ferrari & L. G. Wall.** 2002. Phosphorus and the regulation of nodulation in the actinorrhizal symbiosis between *Discaria trinervis* (Rhamnaceae) and *Frankia* BCU110501. New Phytologist 153: 43-52.
- Vasanthakrishna, M., D. J. Bagyaraj & P. J. Nirmalnath.** 1994. Responses of *Casuarina equisetifolia* to inoculation with *Glomus fasciculatum* and/or *Frankia*. Forest Ecology and Management 68: 399-402.
- Wall, L. G.** 2000. The actinorrhizal symbiosis. Journal of Plant Growth Regulation 19: 167- 182.
- Wall, L. G., A. Hellsten & K. Huss-Danell.** 2000. Nitrogen, phosphorous, and the ratio between them affect nodulation in *Alnus incana* and *Trifolium pratense*. Symbiosis 29: 91-105.
- Weiland, R. G., B. D. Orr & W. Helin.** 1985. Species elimination trials for reforestation in SW Somalia. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 42-45.
- Werner, D.** 1992. Symbiosis of plants and microbes. Ed. Chapman & Hall, Cambridge, 389 pp.
- Wheeler, C. T. & I. M. Miller.** 1990. Current and potential uses of actinorrhizal plants in Europe. En: The Biology of Frankia and Actinorrhizal Plants. Schwintzer C. R. & J. D.Tjepkema, Ed. Academic Press, San Diego, pp.365-389.
- Wood, C. V.** 1987. Trees for wastelands. Mombasa Boabad farm Ltd, Bamburi, Kenia. Wolters D. J. 1998. Ineffective Frankia in wet alder soils. Ph. D. Tesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 163 pp.
- Xu, Y. & W. Hongfeng.** 1994. Introduction and development of *Leucaena leucocephala* in Guangdong Province. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 12: 114-116.
- Yang, Y.** 1995. The effect of phosphorus on nodule formation and function in the *Casuarina-Frankia* symbiosis. Plant and Soil 176: 161-169.
- Yang, Y., W. A. Shipton & P. Reddell.** 1997. Effect of phosphorus supply on in vitro growth and phosphatase activity of *Frankia* isolates from Casuarina. Plant and Soil 189: 75-79.
- Zhao Kefu, Z. Baoze, L. Yinhu & P. J. C. Harris.** 1990. Growth of Sesbania species in saline soils of the Yellow River delta, China. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 8: 165.
- Zheng, H., L. Hanxing, H. Kejun & C. Mantang.** 1989. A study of silviculture techniques of fast growing fuelwood crops in tropical China. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 7: 25-27.