

---

# HISTORIA DEL USO RECIENTE DE TIERRAS DE LAS SABANAS DE AMÉRICA DEL SUR. ESTUDIOS DE CASOS EN SABANAS DEL ORINOCO

DANILO LÓPEZ-HERNÁNDEZ, ROSA MARY HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ  
y MICHEL BROSSARD

---

Las sabanas representan 43% de la superficie terrestre, por lo que constituyen el primer bioma intertropical, el mismo ocupa vastas regiones en América del Sur, África, Sureste Asiático y Australia. Las sabanas son caracterizadas por asociaciones de vegetación herbácea con presencia, o no, de árboles esparcidos y con patrones estacionales de disponibilidad de agua determinados por una marcada estación climática seca. Las sabanas de Sudamérica con una superficie de más de 269×10<sup>6</sup>ha extendidas en Brasil (204×10<sup>6</sup>ha), Colombia (23×10<sup>6</sup>ha), Venezuela (25×10<sup>6</sup>ha), Guyana (4×10<sup>6</sup>ha) y Bolivia (13×10<sup>6</sup>ha) (Rippstein *et al.*, 2001; Tabla I) representan a escala mundial una de las mayores extensiones de tierra lo cual le da potencialidad para la producción agrícola o silvícola. Véanse los ensayos y programas de los organismos gubernamentales involucrados, tales como EMBRAPA en Brasil, ICA (hoy CORPOICA) en Colombia, FONAIAP (hoy INIA) en Venezuela, al igual que centros científicos como CIAT, en Colombia. Sin embargo, es bien conocido que no toda esa superficie es apta para ser cultivada; en buena extensión los suelos adolecen de limitaciones físicas y químicas, que junto con la marcada estacionalidad climática reducen el espectro de posibilidades para la producción agrícola. Más aún,

los cultivos recién implantados en sabanas, al igual que en otras regiones del trópico, son sujetos inmediatamente a estrés biológicos (plagas), inducidos por los hongos y bacterias endémicos y los insectos que cohabitan en el ambiente.

Las grandes extensiones de sabanas son, al mismo tiempo, la principal alternativa para evitar la expansión hacia áreas tropicales que se suponen de mayor fragilidad ecológica como las laderas de montañas y el bosque tropical húmedo (López-Hernández, 1999).

Hasta hace unos 40 años las sabanas de Sudamérica estuvieron dedicadas principalmente a la ganadería extensiva, con pastoreo sobre gramíneas nativas de baja calidad nutricional (Tabla I). Combinado a este manejo subsiste el uso de la quema para eliminar el material lignificado de las especies nativas y permitir el rebrote de pastos tiernos más palatables, como única práctica agrícola (Kornelius *et al.*, 1979; López-Hernández, 1995; Lopes *et al.*, 1999).

En los últimos 40 años, tanto en la zona del Cerrado brasileño como en las sabanas (Llanos) de Colombia y Venezuela las pasturas nativas de bajos requerimientos nutricionales han venido siendo reemplazadas por pastos introducidos de África, principalmente de los géneros *Brachiaria* y *Andropogon* (Pizarro

*et al.*, 1996). En el caso de Colombia estas pasturas han sido asociadas a leguminosas forrajeras como *Arachis pintoi*, *Desmodium ovalifolium* y *Centrosema acutifolium*. Igualmente y puesto que el ambiente (suelos y clima) se presta, en las sabanas orientales venezolanas, también se ha impuesto una reforestación extensiva con especies introducidas de pinos y eucaliptos (Tabla I) con fines comerciales para producción de madera y papel. No obstante, la introducción de todas esas nuevas prácticas agrícolas, en los llanos colombianos y venezolanos persiste el sistema de ganadería extensiva como el sistema de manejo agrícola predominante.

La introducción de pastos africanos y de cultivos anuales y perennes en sabanas solo fue posible bajo un esquema de fertilización, principalmente con abonos inorgánicos (N, P, K y encalado), ya que con escasas excepciones los suelos altamente intemperizados de la región, ferrasoles (oxisoles) y acrisoles (ultisoles) poseen una baja o muy baja fertilidad natural y reacción ácida (Tabla I). Por otro lado, dado sus características, los suelos de estas regiones presentan niveles de P total muy variables, mientras que el P y el N disponible a las plantas son generalmente muy bajos (Hernández-Valencia y López-Hernández, 1999; Corazza *et al.*, 2003).

---

PALABRAS CLAVE / Cerrado / Ciclos Biogeoquímicos / Gases Invernadero / Indicadores de Sostenibilidad / Llanos /

Recibido: 11/04/2005. Modificado: 18/08/2005. Aceptado: 01/09/2005.

Danilo López-Hernández. **Biólogo. Doctor en Ciencia del Suelo, Universidad de Londres, Inglaterra. Profesor, Universidad Central de Venezuela, (UCV). Dirección: Instituto de Zoología Tropical, Apartado 47058, Caracas 1041-A, Venezuela e-mail: lopezd@mpl.ird.fr**

Rosa Mary Hernández-Hernández. **Bióloga. Doctora en Ecología, UCV, Venezuela. Profesora CEDAT, IDECYT, Universidad Simón Rodríguez, Venezuela. e-mail: rhernandez@reaciu.ve**

Michel Brossard. **Edafólogo. Doctor en Suelos y Alteraciones, Universidad de Poitiers, Francia. Investigador, Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier, Francia. e-mail: brossard@mpl.ird.fr**

---

En estos ecosistemas los bajos niveles nutricionales, al igual que la marcada estacionalidad en la precipitación, que por lo general corresponde con seis meses de intensas lluvias (con ocasionales veranillos, particularmente en el Cerrado) y seis meses de sequía, (Tabla I), hacen que igualmente los contenidos de materia orgánica (MO) y de los elementos involucrados a la actividad de producción-descomposición, los llamados elementos biógenos (C, N, S), sean muy variables comparados a suelos de otros biomas (Brosard *et al.*, 1997; Chapuis-Lardy *et al.*, 2001). De la misma manera, la actividad biológica de la meso y microfauna y la de los microorganismos, se ve afectada por los bajos niveles nutricionales y de MO, al igual que por la estacionalidad del ciclo lluvia-sequía (Araujo y López-Hernández, 1999; Nethuzhilin *et al.*, 1999). Las modificaciones introducidas por las transformaciones de estos paisajes son en los sitios alejados de los grandes centros urbanos, relativamente poco perceptibles (dependiendo de la escala), pero si se toma en consideración las grandes extensiones de tierras de sabanas que están siendo afectadas, y las que se afectarán en futuros proyectos de expansión agrícola, una modificación profunda de esos biomas será inevitable. Así, las lecciones que nos darán la reciente intervención humana en sabanas y cerrados debe nutrir los debates y reflexiones sobre el devenir del dominio agrícola intertropical. En este ensayo se hace una revisión comparativa del proceso de colonización agrícola en los llanos y cerrados, particularizando la necesidad de generar indicadores que permitan evaluar los cambios inherentes a los diferentes componentes de los agro-ecosistemas de sabanas, en especial a la calidad del suelo. Particular énfasis se coloca en el subsistema suelo, por ser este subsistema uno de los principales recursos responsable del desarrollo productivo, y muchos de estos indicadores a su vez están ligados a los procesos biogeoquímicos afectados.

### Evolución de la Agricultura en Sabanas

Las sabanas sudamericanas, no obstante constituir ecosistemas continuos, presentan entre ellas importantes diferencias ecológicas, fisiográficas, estructurales y funcionales. Así, los Llanos de Colombia y Venezuela son comparativamente más homogéneos, con relación a los factores climáticos y edáficos, que las sabanas en Brasil, Bolivia y Guyana. En las sabanas de Brasil y Bolivia la principal limitación es la baja fertilidad de los suelos y alta fijación de P; los suelos de las sabanas colombianas y venezolanas tienen además otras limitaciones de tipo físico,

como el sellado y la compactación, que disminuyen considerablemente el movimiento de agua en el perfil (Amézquita *et al.*, 2004), o las fuertes limitaciones por estrés hídrico debido a sequía ambiental o períodos de fuerte inundación en las sabanas hiperestacionales y estacionales de los Llanos venezolanos (López-Hernández *et al.*, 1994).

A pesar que el clima de las sabanas de los Llanos colombianos y venezolanos es marcadamente estacional unimodal, existe un claro gradiente de disminución de la precipitación total anual que va en sentido oeste (2700mm) - este (800mm), con un gradiente en la duración de la estación de sequía, variando desde 1 a 3 meses en el suroeste, a 5 a 6 meses en el este (Tabla I). El gradiente en las condiciones climáticas, las diferentes posiciones del paisaje (planicies aluviales, planicies eólicas, altiplanicies y colinas), resulta en un gradiente de las especies dominantes de la vegetación y en diferencias en las condiciones y tipos de suelos, que inciden en las formas de manejo que deben ser implementadas para la producción agrícola y pecuaria en las sabanas.

Estas características del medio físico llevaron a que durante muchos años se consideraran los biomas sabanas como no aptos para la producción agrícola, reservándose básicamente para la ganadería extensiva. Lo que en sí no deja de ser una paradoja, ya que es en las sa-

banas africanas donde evolucionó la especie humana y donde numerosas sociedades africanas han logrado adaptar sus prácticas agrícolas (Pieri, 1995). En las sabanas sudamericanas, la presencia humana es de más reciente data, sin embargo hay registros prehistóricos de más de 12000 años (Barbosa y Schmitz, 1998).

En Venezuela, hasta la primera mitad del siglo XX, la agricultura en sabanas, básicamente de subsistencia, se limitaba a los suelos jóvenes (entisoles) de las márgenes de ríos y vegas (Carvalho, 1995; López-Hernández y Ojeda, 1996). La agricultura de excedentes llega a las sabanas de la Orinoquía colombo-venezolana en el momento en que se pudieron corregir sus deficiencias nutricionales, utilizándose altas dosis de fertilizantes solubles y esquema de producción de altos insumos (López-Hernández y Ojeda, 1996). En el Cerrado brasileño ocurrió un proceso similar (Goedert, 1983. Lopes *et al.*, 1999) fruto de una política agrícola gubernamental orientada. También se hizo necesario la introducción o generación *in situ* de cultivares mejorados y en muchos casos se ha implementado una red de riego adecuada para aumentar el número de ciclos de cultivo.

Las variaciones en la intensidad de uso de la tierra en muchos casos han sido definidas por el tipo de paisaje; así en las sabanas colombo-venezolanas, gran parte de las tierras bajo cultivos

TABLA I  
LOS GRANDES ECOSISTEMAS DE SABANAS DE AMÉRICA

País	Brasil	Venezuela	Colombia
Ecosistema	Cerrados	Llanos	Llanos
Tipología	Isotérmicos bien drenados	Isohipertérmicos bien drenados e inundables	
Superficie (km <sup>2</sup> )	2,04×10 <sup>6</sup>	0,25×10 <sup>6</sup>	0,23×10 <sup>6</sup>
Pluviosidad anual (mm)	500-2400	700-1400	>1060
Meses sequía	5-7	3-6	6-8
Suelos*	Ferrasoles (50-60%), Acrisoles, Luvisoles Arenosoles (15%)	Inceptisoles Acrisoles Arenosoles	Ferrasoles Inceptisoles Acrisoles
Vegetación herbácea natural	<i>Axonopus</i> spp. <i>Echinolanaea</i> spp. <i>Paspalum</i> spp. <i>Trachypogon</i> spp.	<i>Trachypogon</i> spp. <i>Axonopus</i> spp. <i>Paspalum</i> spp.	
Vegetación arbórea natural	<i>Byrsonima</i> spp. <i>Myrcia</i> spp. <i>Kielmeyera</i> spp. <i>Miconia</i> spp. <i>Annona</i> spp.	<i>Curatella</i> spp. <i>Byrsonima</i> spp. <i>Bowdichia</i> spp.	
Vegetación introducida***	Pastizales: <i>Brachiaria</i> spp., <i>Panicum maximum</i> , y otras** Silvicultura: <i>Pinus</i> spp., <i>Eucalyptus</i> spp.		

\* ISSS, 1998

\*\* Unas seis Poaceas durante la época colonial, y leguminosas en los últimos 35 años.

\*\*\* En Cerrados y Llanos coinciden las especies vegetales introducidas.

y pasturas están concentradas en las altiplanicies y en las planicies aluviales.

De gran importancia en la extensión agrícola de la sabana han sido los cultivos de algodón, sorgo, arroz y maní (un proceso similar de expansión en rubros agrícolas ocurrió en los últimos 50 años durante la tecnificación de la agricultura en las sabanas de África Central; Pieri, 1989), así como la producción de ganado (leche y carne) en forma intensiva en las sabanas del piedemonte andino, pasando por los cultivos de sorgo y maíz en los Llanos Centrales venezolanos y hacia las altiplanicies orientales, que tienen suelos de muy baja fertilidad donde ha ocurrido una expansión importante de la agricultura en los rubros de maní, melón, sésamo, sorgo, maíz y extensas plantaciones de *Pinus caribaea*.

La conversión de las sabanas en campos bajo cultivo, en el caso de Colombia, comenzó igualmente en la década de 1960, cultivándose principalmente arroz como paso previo para establecer las pasturas (Sanz *et al.*, 2004). Hacia la década de 1980, algunas áreas fueron plantadas con palma aceitera y en los 90, con el desarrollo de variedades e híbridos de maíz adaptadas a suelos ácidos, ha habido una inusitada dedicación a la producción de cereales, especialmente bajo sistemas de rotación con cultivos de soya tolerantes a suelos ácidos (Narro *et al.*, 2004). Por otra parte, en el Cerrado, la rotación soya-maíz se estableció rápidamente en 1970-75, y hasta ahora representa el sistema de rotación más común.

En las sabanas pobres drenadas la principal forma de uso de la tierra es la ganadería. La ubicación de los animales se ha realizado desde tiempos coloniales bajo una práctica con división de potreros en función de separar unidades fisiográficas en áreas bajo condiciones de inundación y áreas bien drenadas, en estas últimas predominan especies menos nutritivas pero accesibles en la época de lluvia (López-Hernández, 1994). En el caso de los llanos inundados venezolanos un programa de construcción de diques modulares para represar el agua, regular inundaciones y mejorar la condición hídrica de especies vegetales hidrófilas tal es el caso de *Leersia hexandra*, *Hymenachne unplexicaulis* y *Paspalum fasciculatum* se adelantó bajo iniciativa estatal en los años 70 (López-Hernández *et al.*, 1994). Bajo el esquema de modulación el ganado se alimenta con pastos de mejor calidad nutricional, una vez que los niveles de agua descienden en los períodos de transición lluvia-sequía y sequía, y los animales son trasladados de un lugar a otro. En las sabanas inundables colombianas pocos cambios se han realizado bajo este particular tipo de manejo.

Vemos así que entre las sabanas sudamericanas al intensificarse el uso de las tierras ha habido diferentes grados de desarrollo agropecuario. Sobre esos procesos ha influido, desde factores ambientales a factores políticos y socioeconómicos. En el caso de las sabanas colombianas, la intensificación de la agricultura se ha dado hacia las sabanas vecinas de las principales ciudades (Villavicencio, Granada, Puerto Gaitán) y a lo largo de las principales carreteras que las conectan. En Venezuela, a pesar que en los últimos 20 años no existen registros exactos de la proporción de tierras bajo diferentes modalidades de cultivos y manejos (Rondón *et al.*, 2005) se conoce que aproximadamente 26% de las sabanas están bajo manejo agrícola, lo que no es de extrañar ya que el país dispone de una extensa red de carreteras, indicando así un uso más intensivo de las sabanas venezolanas en relación a las colombianas. Cabe resaltar que hay una vasta extensión de este bioma Llano que aún podría ser convertido en unidades de producción agropecuaria, mientras que en el caso brasileño, la dedicación del Cerrado al uso agrícola ha transformado este bioma en uno de los potenciales más importantes en la producción del país (Théry y Mello, 2005). Sin duda la situación política de Colombia, en lo que concierne a los conflictos internos con la guerrilla, afecta la intensidad de uso agropecuario, en particular de sus Llanos orientales.

### Problemas Asociados a la Agricultura Intensiva

#### *Los sistemas de producción convencionales y su sostenibilidad*

La utilización intensiva de las sabanas sudamericanas para actividades agrícolas condujo a i) la introducción de maquinarias, ii) el uso de altas dosis de fertilizantes, iii) la introducción de agroquímicos para el control de plagas y vegetación indeseable, y iv) la sustitución de los pastos nativos por pasturas introducidas de alto valor alimenticio. Este proceso de tecnificación de la agricultura en sabanas, en particular en los casos brasileño y venezolano, estuvo asociado a una política de subsidio que adelantó el gobierno de Brasil a partir de los años 50 y el de Venezuela en la década de los 70 (Waniez, 1992; López-Hernández y Ojeda, 1996; Lopes *et al.*, 1999).

La utilización de manejos altamente tecnificados se ha reflejado en una mejora significativa en los niveles de producción tanto de cultivos como en los pastos introducidos; sin embargo, con el devenir de los años se ha evidenciado

un rápido deterioro de los suelos de sabanas que se refleja principalmente en sus propiedades físicas (compactación, erosión). Igualmente se refleja en sus propiedades químicas, especialmente por el impacto en la disminución de la MO, señalada en más de un 20%, cuando se usa de forma continua la labranza convencional, ocasionando desarreglos nutricionales y toxicidades (Hernández y López-Hernández, 2002b). No menos importante es el impacto en las propiedades biológicas del suelo, relacionadas con el desarrollo de la biomasa de organismos y de sus actividades (Campos, 1999). Para el Cerrado las pérdidas de propiedades físicas, al parecer no son fáciles de evidenciar (Balbino *et al.*, 2002). En el caso de las pasturas el fenómeno de deterioro se refleja en la llamada degradación o pérdida de producción de los pastos introducidos y la invasión de malezas (Boddey *et al.*, 1996).

En la esfera ambiental, la conservación de las sabanas y de su biodiversidad es un tema preocupante cuando se analiza lo que ha sido su intervención hasta la fecha y se considera que éstas son unas de las principales áreas previstas para la expansión agrícola. Tanto el efecto del fuego, el pastoreo y la deforestación son factores asociados al incremento de la desertificación a escala mundial y el aumento de la emisión de gases a la atmósfera. Lo cierto es que, en la región, el fuego y la deforestación son más recurrentes y extensos de lo que era originalmente, pudiendo potenciar un cambio de régimen regional de las lluvias (Lobo, 2001). Las quemadas periódicas de las sabanas colombianas de las altiplanicies son las responsables, por ejemplo, de las emisiones de un 41% del total de metano y 3% del óxido nitroso en esas zonas (Rondón, 2000). Cabe también resaltar la contribución al CO<sub>2</sub> de los carbonatos utilizados en el encalado (Bernoux *et al.*, 2003). Sin embargo el suelo de las sabanas puede convertirse, con un manejo adecuado, en un sumidero de carbono, contrarrestando en cierta medida las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente. La dirección del equilibrio fuente-sumidero, es generalmente determinada por el manejo dado al suelo.

#### *Sistemas de manejo de labranza convencional y conservacionistas*

El principal tipo de labranza utilizado en los sistemas de producción de cereales y leguminosas en sabanas es la labranza convencional (Sánchez, 1989; Lopes *et al.*, 1999). Sin embargo, una fuerte y continua mecanización conlleva a la compactación (FAO, 1992) y a la formación de costras y de piso de arado. Una intensa mecanización produce

cambios en el balance hídrico del suelo, disminuyendo la infiltración y el intercambio gaseoso que afecta la actividad y número de microorganismos (Doran *et al.*, 1998; Hernández y López-Hernández, 2002a,b). Estos cambios pueden activar procesos de erosión intensos que llevan a la degradación del suelo y finalmente, a largo plazo, a la disminución de la producción. Al respecto, la información presentada por Stocking (2003) es un claro ejemplo de esta interrelación, pues muestra una caída de la producción de cultivos tropicales estrechamente relacionada al aumento de la erosión de los suelos.

En relación a la intensidad de labranza, en el otro extremo, están los sistemas conservacionistas de manejo como la siembra directa y mínima labranza, que llevan la mecanización para la siembra y el control de malezas a su mínima expresión (FAO, 1992). En estos manejos se usa una cobertura vegetal (viva o muerta) de 30% como mínimo.

Los sistemas conservacionistas de preparación del suelo no son novedosos, ya que han sido utilizados en Europa desde hace mucho tiempo; sin embargo, han sido poco usados particularmente en Venezuela y Colombia debido a: i) Los altos rendimientos que se logró obtener en el pasado siglo, a través de la revolución verde (cultivares mejorados) en conjunto con la opción biotecnológica (organismos genéticamente modificados); el incremento en producción, sin embargo conllevó a un aumento en el uso de agroquímicos y de fertilizantes, prácticas que han resultado en efectos deletéreos para el suelo y el ambiente en general (Siqueira y Moreira, 1999). b) La resistencia al cambio por parte de los agricultores motivado por el temor a no poder controlar plagas y malezas, así como a la inexistencia de estudios económicos del costo de este tipo de manejo (Swift *et al.*, 1994). c) La dificultad para producir solo con sistemas conservacionistas los crecientes e inmediatos requerimientos de alimentos de la población. d) La política de subsidio estatal que se dió a fertilizantes y otros insumos por parte de algunos gobiernos, en particular el brasileño y el venezolano, durante la década de los años 70 y buena parte de los 80 (López-Hernández y Ojeda, 1996; Lopes *et al.*, 1999). Los sistemas de labranza reducida en condiciones de sabanas son sin embargo grandes consumidores de productos fitosanitarios para el control de malezas. Dados los problemas en física y química de suelos encontrados en los sistemas intensivos, y las necesidades de conservación de suelos (Blancaneaux *et al.*, 1993; Seguy *et al.*, 1996), los productores brasileños decidieron pasar a cultivos bajo labranza "semi-reducida" durante los 80 y actualmente 13,47×10<sup>6</sup>ha se cultivan con este esquema,

lo que representa 32% de la superficie bajo siembra de granos. También se calcula que en el Cerrado por lo menos 2×10<sup>6</sup>ha están siendo sembradas bajo estos sistemas. Es de notar, sin embargo, que en Venezuela y Colombia es muy escasa la superficie cultivada bajo labranza mínima, apenas 0,17×10<sup>6</sup>ha y 0,001×10<sup>6</sup>ha, respectivamente (Rondón *et al.*, 2005).

#### *Los sistemas integrados agricultura-ganadería*

En los últimos años se ha popularizado un sistema de producción integrado entre ganadería y agricultura que aprovecha principalmente el potencial sinérgico de ambos componentes en el tiempo y el espacio. El sistema busca recuperar la productividad de pasturas degradadas y simultáneamente restablecer las condiciones del suelo en sistemas de cultivos anuales (Oliveira *et al.*, 1996; Ayarza *et al.*, 1998). Lopes *et al.* (1999) señalan que esta estrategia de utilización de las sabanas se ha hecho más atractiva con la inclusión de técnicas de labranzas conservacionistas (cero-labranza y labranza mínima) en cultivos anuales. En Venezuela diversos grupos de investigación realizan evaluaciones agro-ecológicas de estos sistemas integrados en las sabanas de los llanos centrales. En los ensayos se determinan rotaciones de cultivos más promisorias, fuentes de fertilización más «amigables» con el ambiente, que incluyen desde fertilización orgánica y uso de roca fosfórica hasta biofertilizantes a partir de cepas nativas. Igualmente se hacen investigaciones en la determinación de las coberturas, o mezclas de coberturas asociadas, que tengan un impacto positivo en los agro-sistemas de sabana.

#### *Necesidad del Desarrollo de Parámetros o Indicadores para Medir la Sostenibilidad en Sabanas*

La agricultura sostenible al igual que el desarrollo sostenible, al cual va enlazado de manera inherente, debe incluir el manejo exitoso de los recursos disponibles para satisfacer las necesidades de la población actual y de las generaciones futuras, y a la vez debe mantener o mejorar la calidad ambiental y los recursos naturales (Bruntland, 1987). Para que este *desideratum* sea posible se debe lograr una adecuada calidad ambiental que en muchos casos se traduce en una buena calidad de suelo, concepto que se ha venido desarrollando en los últimos 15 años (Doran y Parkin, 1996) y que se ha rediscutido recientemente por Martin y Leroy (2002) y Stocking (2003).

La sostenibilidad de un sistema de producción es un concepto muy

complejo que debe ser evaluado tomando en consideración el tipo de tierra y ecosistema específico, pero esta evaluación es válida solo para un período de tiempo definido y dentro de las limitaciones físicas, económicas y sociales de la región (Dumansky, 1993). Por tanto, un sistema que es sostenible bajo determinadas condiciones socioeconómicas y edafoclimáticas, no necesariamente lo es cuando cambian estas condiciones (García-Guadilla y López-Hernández, 1998).

Buena parte de los estudios de sostenibilidad se basan en que existen atributos de los recursos que conforman los sistemas agrícolas que pueden ser utilizados como indicadores de calidad. En estas evaluaciones ha sido más común la cuantificación de indicadores "técnicos", basadas en medición de variables del sistema, que han llevado al establecimiento de agroecosistemas "sostenibles", a partir de los cuales se hacen recomendaciones a los productores para que usen las tecnologías propuestas. Menos frecuente es determinar las necesidades de las comunidades y la percepción de éstas sobre el manejo de los recursos, de forma que sugieran las recomendaciones a ser tomadas en la formulación de políticas, programas o proyectos de desarrollo de agroecosistemas sostenibles regionales. Estos últimos indicadores, producto de la generación del conocimiento local en el manejo de recursos y manifestados en un lenguaje propio del productor, son los denominados indicadores locales. Experiencias en la generación de este tipo de indicadores para estudios de calidad de suelo han sido desarrolladas con éxito por el CIAT en los Llanos colombianos. Los mismos, podrían tener cabida a futuro en las nuevas políticas de desarrollo agrícola para los Llanos venezolanos, dominados por ecosistemas de sabanas con numerosas unidades de producción que abarcan de pequeños a grandes productores. La identificación del indicador, el establecimiento de los niveles críticos y la priorización de los indicadores, deben llevar a desarrollar un monitoreo de calidad de recurso en continuo "feedback" con el usuario, para establecer un sistema de monitoreo que permita finalmente decidir una lista de indicadores que conduzcan a tomar decisiones de manejo de recursos naturales. Las investigaciones en esta línea son muy escasas y establecen un gran reto en las evaluaciones de programas de producción agrícolas en las sabanas con una visión de sostenibilidad.

Por otro lado, la definición de parámetros e indicadores "técnicos" para medir la sostenibilidad es una tarea compleja, más aun si lo que se quiere es evaluar los nuevos sistemas de producción o sistemas alternativos; los estu-

dios de factibilidad necesarios en estos casos no pueden hacerse a corto sino a largo plazo (Amézquita *et al.*, 1999). En este último punto, las amenazas de eliminación, o el cambio de experimentos de larga duración a ensayos a corto plazo por causas estrictamente financieras, constituye un problema que debe plantearse formalmente en nuestras comunidades científicas y los centros de decisiones en políticas de investigación.

La sostenibilidad de los sistemas agrícolas de producción depende del mantenimiento o de las mejoras que se hagan a las características físicas, químicas y biológicas del suelo. Por tanto, es necesario establecer parámetros para detectar en forma temprana la degradación del suelo y en consecuencia poder así evaluar los efectos de los manejos agronómicos.

Entre los factores físico-químicos del suelo que pueden influenciar la sostenibilidad se incluyen la presencia de la MO, nutrientes (déficit o toxicidad), al igual que la activación o retardo de procesos como acidificación, salinización, compactación, etc. Todos estos factores se interrelacionan en los procesos dinámicos que ocurren en el suelo, por lo que pueden ser utilizados como indicadores de cambios en los sistemas (Chacón *et al.*, 1998). La Tabla II presenta información sobre el conjunto mínimo de datos físicos, químicos y biológicos que son necesarios para monitorear la condición, calidad y salud del suelo de acuerdo a las normas propuestas por la *Soil Science Society of America*, entre los que se encuentran datos de larga data de utilización en el estudio de procesos en suelos, tal es el caso del pH, MO y conductividad eléctrica, entre otros. Igualmente se destacan parámetros de más reciente utilización como es el caso de las biomasa microbianas.

A fin de demostrar la bondad de algunos de estos parámetros, se referirán tres estudios de casos realizados en los Llanos Centrales y Orientales de Venezuela. Información similar puede ser presentada para el Cerrado y las sabanas de Colombia, como lo demuestra la amplia información generada por los equipos de investigación del CIAT establecidos en la Orinoquia de Colombia y del EMBRAPA en el Cerrado (Guimarães *et al.*, 1999).

*Cambios en una sabana protegida de quema y pastoreo durante 30 años.* La Estación Biológica de los Llanos en Guárico Central, Venezuela, estuvo protegida de la quema y pastoreo durante unos 30 años, situación que ha permitido un cambio en la composición de especies vegetales reflejado principalmente en una disminución del componente herbáceo y un incremento

en la densidad y diversidad del componente leñoso (Fariñas y San José, 1985). La ausencia de fuego en la Estación también permitió la permanencia y acumulación de una capa de hojarasca que, aunada a una disminución en la pérdida de nutrientes por la quema (volatilización, en particular de N y S), contribuyó de manera notable a un aumento en el componente leñoso en la sabana protegida, así como a incrementos en parámetros asociados con los indicadores de sostenibilidad reseñados en la Tabla II. Los cambios inducidos por la protección de la sabana se ven reflejados en la naturaleza física y estructural del suelo y en los parámetros asociados con la fertilidad y bioquímica de suelos (Tabla III; Guerere, 1992). En la sabana protegida del fuego y pastoreo ocurre una mejora del estado de agregación del suelo (disminu-

ción de la compactación) que tiene un efecto marcado sobre la capacidad de campo y disponibilidad de agua en la superficie. Parámetros asociados a la mejora de la biofertilidad se incrementan a través de la protección de la sabana; tal es el caso de la suma de bases cambiables, contenido de C y N, al igual que la biomasa microbiana, que aumentó en un 25%.

*Indicadores de sostenibilidad en una sabana bajo cultivo anual con diferentes intensidades de labranza.* Otro estudio de caso corresponde a una comparación de parámetros físico-químicos y biológicos en suelos bajo labranza convencional y conservacionista en una región de los Llanos Centrales del Estado Guárico, uno de los principales productores de cereales de Venezuela. La forma de manejo predominan-

TABLA II  
CONJUNTO MÍNIMO DE DATOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS  
NECESARIOS PARA MONITOREAR LA CONDICIÓN,  
CALIDAD Y SALUD DEL SUELO

Indicadores	Función y procesos que regulan
Físicos	
Textura	Retención y transporte de agua y nutrientes
Profundidad del suelo	Productividad potencial y erosión
Infiltración y densidad aparente	Productividad, lixiviación y erosividad
Capacidad de retención de agua	Disponibilidad de agua, transporte y erosión
Químicos	
pH	Fertilidad, disponibilidad de nutrientes
Materia orgánica	Actividad biológica y disponibilidad de nutrientes
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica, salinización
N, P y K extraíbles	Fertilidad e indicadores calidad ambiental
Biológicos	
C y N microbianos	Potencial catalítico microbiano
N potencialmente mineralizable	Fertilidad, productividad
Fracción ligera de la MO	Elementos potencialmente mineralizables, fertilidad
Respiración basal	Pérdida de C, actividad microbiana

Adaptado de Doran y Parkin, 1996.

TABLA III  
COMPARACIÓN DE VALORES DE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO  
OBTENIDOS EN UNA SABANA NATURAL (SOMETIDA A FUEGO  
Y PASTOREO) Y UNA SABANA PROTEGIDA DURANTE 30 AÑOS

Indicadores	Sabana natural	Sabana protegida
Físicos		
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,66 ±0,04a	1,54 ±0,4b
% Capacidad de campo	4,97 ±0,49a	16,51 ±0,41b
% Contenido de humedad	13,35 ±0,27a	14,84 ±0,18b
Químicos		
pH	5,61 ±0,19a	6,29 ±0,19b
Bases cambiables (cmol/kg)	0,57 ±0,05a	0,76 ±0,03b
P disponible (mg P/kg)	1,67 ±0,06a	1,63 ±0,05a
% C	1,15 ±0,02a	1,09 ±0,01b
N (mg N/ kg)	458 ±87a	530 ±137b
Biológicos		
C microbiano (mg C/kg)	114 ±45a	153 ±13b

Promedios seguidos de letras diferentes corresponden a diferencias significativas (test Kruskal-Wallis, p= 0.05). Modificado de Guerere (1992).

te en la región es el monocultivo de maíz bajo labranza convencional; sin embargo, se están implementando otras formas de producción de maíz a través del uso de la siembra directa. Bajo esta modalidad se cuenta con experiencias de varios años de siembra de maíz dejando restos de residuos de la cosecha anterior, o el uso de la asociación de maíz con coberturas perennes de gramíneas y leguminosas. La forma usual de manejo conservacionista implica ningún pase de rastra superficial, con uno o dos pases de rotativa, aplicación de herbicida sistémico, siembra y fertilización mecanizada mediante un equipo diseñado para siembra directa (Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002b).

Una comparación entre los manejos propuestos permite señalar que la siembra directa (Tabla IV) es una forma de manejo que crea condiciones en el suelo que propician un funcionamiento similar al suelo de sabana natural (Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002b). En ambos casos se favorecen los compartimientos de materia orgánica que conservan N y C en un plazo corto de tiempo. Se minimiza la activación de los procesos de erosión por un incremento de la estabilidad de los macroagregados en un 30% aproximadamente en los suelos bajo siembra directa (Hernández *et al.*, 2000). Los procesos de ganancia de MO prevalecen sobre los procesos de pérdida. En este sentido hay un menor impacto en las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente por esta vía en 0,02Mg·ha<sup>-1</sup> (Tabla IV). Si se considera que en las sabanas de Venezuela hay aproximadamente 0,17×10<sup>6</sup>ha sembradas con cultivos anuales bajo labranza reducida (Rondón *et al.*, 2005), donde solo en

dos años hubo un incremento de 78,6% en el área de sabanas de los Llanos Centrales venezolanos cultivadas con siembra directa, y este tipo de manejo aumenta en un 36% el C total del suelo comparado con la labranza convencional, y 7% con respecto a la sabana natural (Tabla IV), se evidencia el papel destacado de la siembra directa en el aumento del secuestro de C en el suelo de sabana. De hecho, el C almacenado en el suelo hasta los 30cm de profundidad, ha aumentado en 4Mg·ha<sup>-1</sup> sobre el promedio de los suelos de sabanas donde esta práctica ha sido implementada (Rondón *et al.*, 2005). Según la Tabla IV, los indicadores señalan que este aumento se produce principalmente por el incremento de la fracción ligera de la MO en un 270%, lo que confiere a este indicador una alta sensibilidad a los cambios, mayor que a la biomasa microbiana.

En contraposición a lo anterior, la labranza convencional promueve los procesos de pérdida de la MO al disminuir los compartimientos de fácil y lenta descomposición, favorece la descomposición sobre la inmovilización, disminuye la estabilización de los agregados y activa los procesos de erosión, al reducirse en un 80% la proporción de macroagregados estables (Hernández *et al.*, 2000). Como resultado de este funcionamiento, no obstante que se usen cantidades considerables de fertilizantes, la tendencia es que estos sean ineficientemente utilizados en el agroecosistema, por la intensificación de los procesos de irrupción de los mecanismos de conservación de elementos. En conclusión, los suelos de los Llanos Centrales que están bajo siembra directa pueden funcionar más lentamente en la diná-

mica del N y C y tener menos disponibilidad de nutrientes a las plantas, pero a mediano plazo posiblemente estas prácticas se pueden constituir en formas de manejo que permitan un uso más sostenido de los suelos de sabana, al contribuir a mantener y a veces aumentar el nivel de C y otros elementos esenciales, y lograr un incremento de la estabilidad de los agregados ante los cambios cíclicos de humedad-sequía del clima de sabana.

*Indicadores de sostenibilidad en una sabana bajo plantaciones de P. caribaea.* El último estudio de caso corresponde a un sistema de monocultivo forestal que ocupa 0,8×10<sup>6</sup>ha en los Llanos Orientales venezolanos, destinadas a la producción de pulpa para papel y a la explotación del recurso maderero. Si bien estos sistemas forestales han incrementado el almacenamiento de C, apuntalado principalmente por el aumento de la fracción ligera de la MO en casi 2Mg·ha<sup>-1</sup>, los indicadores biológicos muestran cómo estos sistemas no favorecen la actividad microbiana en el suelo, y la biomasa microbiana tiende a disminuir después que estas plantaciones permanecen por más de 14 años en los suelos de sabanas (Tabla V; Campos, 1999). Es por ello que se evidencia que no se mejoran los niveles de N total en el suelo a pesar del incremento de la MO. Muy posiblemente la vía de entrada orgánica que pudieran constituir el colchón de acículas que se deposita sobre la superficie del suelo, y que incrementa directamente la fracción ligera de la MO, no contrarresta la demanda que tiene la plantación y

Tabla IV  
COMPARACIÓN DE VALORES DE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO OBTENIDOS EN UNA SABANA NATURAL Y DOS AGROSISTEMAS DE CULTIVOS CON MAÍZ

Indicadores	Sabana natural	Convencional*	Siembra directa**
<b>Físicos</b>			
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,46	1,42	1,43
% Capacidad de campo	16,65	19,11	18,01
% Contenido de humedad	9,20	16,4	14,85
<b>Químicos</b>			
pH	5,10	4,92	5,25
Bases cambiables (cmol/kg)	2,80	2,11	3,39
C (Mg/ha)	19,7	15,6	19,9
N (Mg/ha)	1,7	1,3	1,4
<b>Biológicos</b>			
C microbiano (Mg/ha)	0,32	0,20	0,24
N microbiano (Mg/ha)	0,06	0,04	0,06
FL*** (Mg/ha)	3,80	1,56	5,72
Respiración basal (Mg/ha)	0,13	0,28	0,26

\* Bajo labranza convencional durante 13 años continuos

\*\* Bajo siembra directa por cinco años continuos después de ocho años con manejo convencional

\*\*\* Fracción ligera de la MO. Modificado de Hernández (2002b).

Tabla V  
COMPARACIÓN DE VALORES DE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO OBTENIDOS EN UNA SABANA NATURAL Y UN AGROSISTEMA DE PLANTACIÓN DE *Pinus caribaea*

Indicadores	Sabana natural	Bosque de pinos
<b>Físicos</b>		
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,48
<b>Químicos</b>		
pH	4,49	4,28
Bases cambiables (cmol/kg)	0,24	0,20
P disponible (kg/ha)	1,3	1,9
C (Mg/ha)	5,2	7,4
N (Mg/ha)	0,4	0,2
<b>Biológicos</b>		
C microbiano (Mg/ha)	0,09	0,08
N microbiano (Mg/ha)	0,02	0,02
FL* (Mg/ha)	1,89	3,77
Respiración basal (Mg/ha)	0,05	0,04

\* Fracción ligera de la MO. Modificado de Campos (1999)

las pérdidas que ocurren por lixiviación. La calidad del material orgánico del pinar, en particular el contenido de lípidos (Jambu *et al.*, 1978), puede ser responsable de la disminución en  $0,01\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de la actividad microbiana evaluada como producción de  $\text{CO}_2$ .

## Discusión

Aunque la investigación en el ecosistema sabana se ha venido desarrollando durante más de cinco décadas, es solo en las dos últimas décadas cuando se ha empezado a perfilar un proyecto o cuerpo de investigación más específico, en donde los aspectos relacionados con la sostenibilidad de la agricultura en sabanas y la búsqueda de parámetros para poder medir la calidad del suelo están implícitos.

Como se desprende de la información suministrada, existe un cuerpo de investigación muy extenso sobre el manejo agronómico de los suelos del Cerrado brasileño y de los Llanos de Colombia y Venezuela. Más aún, se ha podido constatar en reuniones internacionales (MAS, 1995) que, aparte de la información reseñada en medios arbitrados especializados, existe mucha data contenida en medios de escasa difusión (la llamada publicación gris). Sin duda una de las tareas más importantes a realizar a futuro, aparte de la evaluación de las bondades (o no) de los sistemas integrados y alternativos de manejo en los suelos de sabanas, es la implementación de indicadores y parámetros para medir la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola. Esta sostenibilidad, de acuerdo a Amézquita *et al.* (1999), puede ser desglosada en dos vertientes: i) parámetros edafoclimáticos y ii) el diagnóstico del perfil del suelo (calidad del suelo). Con relación a los primeros, suficiente data existe desde hace años en las zonas de sabanas como para poder hacer predicciones; igualmente se dispone de las herramientas de computación apropiadas como para hacer las predicciones pertinentes. En lo que concierne a los segundos; se ha acumulado información a nivel de Cerrado y sabanas acerca del impacto de los diferentes sistemas de producción agrícola y formas de manejo sobre parámetros físico-químicos y biológicos que bien merecen un análisis más integral. Particular énfasis se debe colocar en nuevas metodologías para medir compartimentos biológicos, a saber: biomasa microbiana (C, N, P), papel de las micorrizas, papel de los organismos del suelo (lombrices, termitas, microartropodos) y su potencial utilización como bioindicadores del impacto de sistemas agronómicos; igualmente es necesario un análisis más profundo sobre los procesos de inmovilización y minerali-

zación de N y P, y en la utilización de las fracciones más activas de la MO y del P y las enzimas del suelo como indicadores de la calidad del ambiente.

La información generada tanto en el Cerrado como en las sabanas de Colombia y Venezuela para superar las deficiencias naturales de esos ecosistemas puede ser, dentro de la limitación propia de toda extrapolación, utilizada como experiencia valiosa en otras áreas del mundo, en particular como lo establecen Lopes *et al.* (1999) en algunas zonas del África, por lo que la extensiva literatura acumulada por los investigadores franceses (véase la síntesis de 30 años reseñada por Pieri, 1989) en esta última región obliga a una adecuada comparación.

## Conclusiones

El modelo de producción que se genere en un determinado ecosistema va a estar implícitamente relacionado con las condiciones de estrés que impone el medio ambiente físico y las demandas socio económicas, particularmente las demográficas, de las comunidades involucradas. Así, cada sociedad en su momento ha generado sistemas de producción acorde con estas realidades.

El modelo de desarrollo o de ocupación (colonización) agrícola intensiva en tierras de sabanas de Sudamérica es una aventura humana reciente ya que data, a lo sumo, de algo más de 50 años; no así la ocupación por comunidades indígenas, de la que hay registros prehistóricos. Tal modelo debe ser articulado tomando en cuenta la variabilidad inherente a los diferentes conocimientos disciplinares (ecológico, agronómico, edafológico, etc.). Al proyectarse en una dinámica transdisciplinaria, el montaje en un modelo generalizado quizás no es lo más apropiado. La diversidad del ambiente sabana (bioma) es muy amplia, más aun se encuentra inmersa dentro de sociedades tan diversas que los proyectos, valores y opciones que se generen para su uso no pueden ser el mismo en todas esas realidades. La visión de una integración a través de procesos biogeoquímicos obliga a razonar cómo conectar entre sí elementos de conocimientos que fueron adquiridos separadamente y en diferentes disciplinas científicas. Los campos del conocimiento que se han abierto con la expansión reciente de la frontera agrícola al incluir los suelos de las sabanas americanas no deben solamente servir para usufructo y expansión de sistemas de producción ya implantados, tal es el caso de los monocultivos como soya, sorgo u otro renglón alimenticio, pero ante todo para interrogarnos ¿cómo serán estos sistemas de producción dentro de los mar-

cos correspondientes a ambientes y a variables sociales y políticas presentes y futuros?

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto "Las sabanas de América del Sur: El impacto del uso reciente de tierras sobre las transformaciones biogeoquímicas de suelos", llevado a cabo entre el Instituto de Zoología Tropical (IZT), Facultad de Ciencias, UCV, y el Institut de Recherche pour Développement (IRD). Los Autores agradecen a Ismael Hernández Valencia, y DL-H agradece la colaboración financiera del IRD.

## REFERENCIAS

- Amézquita E, Friesen, D, Sanz, JI (1999) Indicadores de sostenibilidad: Parámetros edafoclimáticos y diagnóstico del perfil cultural. En Guimarães EP, Sanz JI, Rao IM, Amézquita MC, Amézquita E (Eds.) *Sistemas Agropastoriles en Sabanas Tropicales de América Latina*. Publicación CIAT N°313. pp 49-64.
- Amézquita E, Thomas RJ, Rao IM, Molina DL, Hoyos P (2004) Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agric. Ecosyst. Env.* 103: 269-277.
- Araujo Y, López-Hernández D (1999) Earthworm populations in a savanna agroforestry system of Venezuelan Amazonia. *Biol. Fert. Soils* 29: 413-418.
- Ayarza MA, Vilela L, Barcellos AO, Balbino LC, Brossard M, Pasini A (1998) Intégration culture-élevage dans les Cerrados au Brésil: une solution pour des systèmes durables. *Agriculture et développement* 18: 91-98.
- Balbino LC, Brossard M, Leprun JC, Bruand A (2002) Mise en valeur des Ferralols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques: une étude bibliographique. *Etude et Gestion des Sols* 9: 83-104.
- Barbosa AS, Schmitz PI (1998) Ocupação indígena do cerrado: esboço de uma história. En Sano SM, Almeida SP (Eds.) *Cerrado: ambiente e flora*. EMBRAPA Planaltina. Brasil. pp. 3-43.
- Bernoux M, Volkoff B, Carvalho MCS, Cerri CC (2003) CO<sub>2</sub> emissions from living of agricultural soils in Brazil. *Global Biogeochem. Cycle* 17: 1049-1052.
- Blancaneaux P, Freitas PL, Amabile RF, Carvalho A (1993) Le semis direct comme pratique de conservation des sols des cerrados du Brésil central. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* 28: 253-275.
- Boddey RM, Alves BJR, Urquiaga S (1996) Nitrogen cycling and sustainability of improved pastures in the Brazilian Cerrados. En Pereira RC, Nasser LC (Eds.) *8º Simposio sobre o Cerrado. 1st International Symposium on Tropical Savannas*. EMBRAPA-CPAC. Brasília, Brasil. pp. 33-38.
- Brossard M, Lopes Assad ML, Chapuis L, Barcellos AO (1997) Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de Cerrados. En Leite LL, Saito CH (Eds.) *Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado*. Universidad de Brasília, Brasil. pp. 272-277.

- Bruntland GH (1987) *Our common future*. The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press. Oxford, RU. 400 pp.
- Campos A (1999) *Efecto de la siembra de Pinus caribaea L. en fracciones de materia orgánica de un suelo de sabana*. Uverito-Estado Monagas. Tesis. Universidad Central de Venezuela. 84 pp.
- Carvalho G (1995) *El proceso histórico de la agricultura venezolana*. Fondo Editorial Tropykos. CENDES. Caracas, Venezuela. 178 pp.
- Chacón P, Netuzhilin I, López-Hernández D (1998) Características biológicas y químicas del suelo como indicadores de sostenibilidad agrícola en el ecotono sabana-bosque amazónico. En Carrillo RJ (Comp.) *Memorias del IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente*. Vol II. Editorial Equinoccio, Ediciones de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. pp. 211-261.
- Chapuis-Lardy L, Brossard M, Quiquampoix H (2001) Assessing organic phosphorus status of Cerrado oxisols using <sup>31</sup>P NMR spectroscopy and phosphomonoesterase activity measurement. *Can. J. Soil Sci.* 81: 591-601.
- Corazza E J, Brossard M, Muraoka T, Coelho Filho MA (2003) Spatial variability of soil phosphorus of a low productivity *Brachiaria brizantha* pasture. *Scientia Agricola* 60: 559-564.
- Doran JW, Parkin TB (1996) Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. En Doran JW, Jones AJ (Eds.) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication 49. Madison, WI, EEUU. pp. 25-37.
- Doran J, Elliott ET, Paustian K (1998) Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil Till. Res.* 49: 3-18.
- Dumanski J (1993) *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Land Management for the 21<sup>st</sup> Century*. Workshop Summary. Vol. 1. Agricultural Institute of Canada. Ottawa, Canadá. 50 pp.
- FAO (1992) *Manual de sistemas de labranza para América Latina*. Boletín de suelos de la FAO. Roma, Italia. 193 pp.
- Fariñas M, San José JJ (1985) Cambios en el estrato herbáceo de una parcela protegida del fuego y pastoreo durante 23 años. *Acta Cient. Venez.* 36: 199-200.
- García-Guadilla MP, López-Hernández D (1998) Dilema de la productividad versus la sostenibilidad ecológica en el ecotono sabana-bosque del Amazonas venezolano. En Carrillo RJ (Comp.) *Memorias del IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente*. Vol I. Editorial Equinoccio, Ediciones de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. pp. 282-286.
- Goedert W (1983) Management of Cerrado soils of Brazil: A review. *J. Soil Sci.* 34: 405-423.
- Guerere, I (1992) Comparación de parámetros físicos, químicos y de la biomasa microbiana del suelo entre una sabana protegida del fuego y una sabana quemada anualmente. Tesis. Universidad Central de Venezuela. 45 pp.
- Guimarães EP, Sanz JI, Rao IM, Amézquita MC, Amézquita E, Thomas RJ (1999) *Agropastoral Systems for the Tropical Savannas of Latin America*. Publication 338. CIAT-EMBRAPA. Cali, Colombia. 313 pp.
- Hernández RM, López-Hernández D (2002a) Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in savanna soil aggregates under conventional and no-tillage. *Soil Biol. Biochem.* 34: 1563-1570.
- Hernández-Hernández RM, López-Hernández D (2002b) El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: Un modelo para suelos de sabana de los llanos centrales venezolanos. *Interciencia* 27: 529-536.
- Hernández-Valencia I, López-Hernández D (1999) Allocation of phosphorus in a tropical savanna. *Chemosphere* 39: 199-207.
- Hernández, RM, Florentino, A, López-Hernández, D (2000) Efecto de la siembra directa y la labranza convencional en la estabilidad estructural y otras propiedades físicas de Ultisols en el estado Guárico-Venezuela. *Agronomía Tropical (Venezuela)* 50, 9-29.
- ISSS (1998) *International Society of Soil Science Working Group R.B., World Reference Base for Soil Resources: Introduction*. Deckers JA, Nachtergaele FO, Spaargaren OC (Eds.). FAO. Acco. Leuven, Holanda. 88 pp.
- Jambu P, Fustec E, Jacquesy R (1978) Les lipides des sols: nature, origine, évolution, propriétés. *Science du Sol* 4: 229-240.
- Kornelius E, Saueressing MG, Goedert WJ (1979) Pasture establishment and management in the Cerrado of Brazil. En Sánchez PA, Tergas LE (Eds.) *Pasture production in acid soils of the tropics*. CIAT. Cali, Colombia. pp. 147-166.
- Lobo LS (2001) Savanna-forest hysteresis in the tropics. *Global Ecol. Biogeogr.* 10: 369-378.
- Lopes A, Ayarza M, Thomas R (1999) En Guimarães EP, Sanz JI, Rao IM, Amézquita MC, Amézquita E (Eds.) *Sistemas Agropastoriles en las Sabanas de América Latina Tropical: Lecciones del Desarrollo Agrícola de los Cerrados de Brasil*. Publicación CIAT N° 313. pp 9-30.
- López-Hernández D (1995) Impact of agriculture and livestock production on tropical soils in Latin America. En Turner BL, Gómez-Sal A, González Bernáldez F, di Castri F (Eds.) *Global land use change: A perspective from the Colombian Encounter*. CSIC. Madrid, España. pp. 405-418.
- López-Hernández D (1999) Preface to Biodiversity, agroecosystems and perspectives of sustainable agriculture: Amazonas case. *Ecotropicos* 12: 1.
- López-Hernández D, Ojeda A (1996) Alternativas en el manejo agroecológico de los suelos de las sabanas del norte de suramérica. *Ecotropicos* 9: 99-115.
- López-Hernández D, García M, Niño M (1994) Input and output of nutrients in a diked flooded savanna. *J. Appl. Ecol.* 31: 303-312.
- Martin JY (ed.), Leroy G (collab.) (2002) *Développement durable?: doctrines, pratiques, évaluations*. IRD. Paris, Francia. 344 pp.
- MAS (1995) Reunión del *Steering Committee Management of Acid Soils*. Feldafing, Alemania, Junio 1995.
- Narro L, Pandey S, León A, Pérez JC, Salazar F (2004) Maize varieties for acid soils. En Guimarães EP, Sanz JI, Rao IM, Amézquita MC, Amézquita E, Thomas RJ (Eds.) *Agropastoral Systems for the Tropical Savannas of Latin America*. CIAT-EMBRAPA Publication N°338. Cali, Colombia. pp. 141-155.
- Netuzhilin Y, Chacón P, Cerda H, López-Hernández D, Torres F, Paoletti M (1999) Biodiversity tools to evaluate sustainability in savanna-forest Ecotone in the Amazon (Venezuela). En Reddy MV *Management of Tropical Agroecosystems and Beneficial Soil Biota*. Science Publishers. Enfield, NH. EEUU. pp. 291-352.
- Oliveira IP, Klutchowski J, Yokoyama LP, Dutra LG, Portes TA, Silva AE, Pinheiro BS, Ferreira E, Castro EM, Guimarães CM, Gomide JC, Balbino LC (1996) *Sistema Barreirão: Recuperação/renovação de pastagens degradadas em consórcio com culturas anuais*. Documentos N°64. EMBRAPA-CNPAP-APA. Goiânia, GO, Brasil. 90pp.
- Pieri C (1989) *Fertilité des terres de savanes*. CIRAD, Ministère de la coopération et du développement. Francia. 444 pp.
- Pieri C (1995) Land-use change in the semiarid and arid tropics of Africa. En Turner BL, Gómez-Sal A, González Bernáldez F, di Castri F (Eds.) *Global land use change: A perspective from the Colombian Encounter*. CSIC. Madrid, España. pp. 341-360.
- Pizarro EA, do Valle CB, Keller-Grein G, Schultze-Kraft R, Zimmer AH (1996) Regional experience with *Brachiaria*: Tropical America - Savannas. En Miles JW, Maass BL, do Valle CB, Kumble V (Eds.) *Brachiaria: Biology, agronomy, and improvement*. CIAT/EMBRAPA. Cali, Colombia / Campo Grande, Brasil. pp. 225-246.
- Rippstein G, Amézquita E, Escobar G, Grollier C (2001) Condiciones naturales de la sabana. En Rippstein G, Escobar G, Motta F (Eds.) *Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. CIAT. Cali, Colombia. pp. 1-21.
- Rondón MA (2000) *Land use change and balances of greenhouse gases in Colombian tropical savannas*. Tesis. Cornell University. Ithaca, NY, EEUU. 211 pp.
- Rondón MA, Acevedo D, Hernández RM, Rubiano Y, Rivera M, Amézquita E, Romero M, Sarmiento L, Ayarza M, Barrios E, Rao I (2005) Carbon sequestration of the neotropical savanna (llanos) of Colombia and Venezuela. Lal R, Kimble J (Eds.) *Potential of soil carbon sequestration in Latin America*. Hawort Press. Binghamton, NY, EEUU. (en prensa)
- Sánchez C (1989) *Contribución al conocimiento de la mínima labranza en Venezuela*. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales Rómulo Gallegos. San Juan de Los Morros, Venezuela. 67 pp.
- Sanz JI, Zeigler RS, Sarkarung S, Molina DL, Rivera M (2004) Improved rice/pasture systems for native savannas and degraded pastures in acid soils of Latin America. En Guimarães EP, Sanz JI, Rao IM, Amézquita MC, Amézquita E, Thomas RJ (1999) *Agropastoral Systems for the Tropical Savannas of Latin America*. Publication 338. CIAT-EMBRAPA. Cali, Colombia. pp. 240-247.
- Seguy L, Bouzinac S, Trentini A, Côtes NA (1996) *L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. Agriculture et développement* 12: 2-61.
- Siqueira JO, Moreira FMS (1999) Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição mineral de plantas: base para um novo paradigma na agrotecnologia do século XXI. En Siqueira JO, Moreira FMS, Lopes AS, Guilherme LRG, Faquin V, Furtini AE, Carvalho JG (Eds.) *Inter-relação fertilidades, biologia do solo e nutrição de plantas*. SBSC Vicosa. UFVA/DCS. Lavras, Brasil. pp: 1-10.
- Stocking MA (2003) Tropical soils and food security: the next 50 years. *Science* 302: 1356-1359.
- Swift MJ, Bohren L, Carter SE, Izac AM, Woomer PL (1994) Biological management of tropical soils: Integrating process research and farm practice. En Woomer PL, Swift MJ (Eds.) *The biological management of tropical soil fertility*. Wiley-Sayce, NY. EEUU. pp 209-229.
- Théry H, de Mello NA (2005) Diversités et mobilités de l'agriculture brésilienne. *Cahiers Agricultures* 14: 96-100.
- Waniez P (1992) Les CERRADOS. "un espace frontière" brésilien. G.I.P. RECLUS-ORSTOM. Montpellier, Francia. 344 pp.