



Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci). EISSN: 2215-3896.

Diciembre, 2000. Vol 20(3): 65-77.

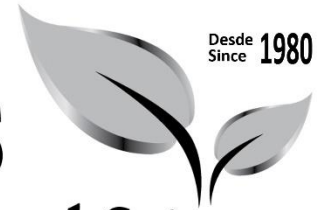
DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.20-1.9>

URL: www.revistas.una.ac.cr/ambientales

EMAIL: revista.ambientales@una.cr

Hans Fassbender

Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Conceptualización y consecuencias edafológicas de los impactos ambientales en ecosistemas naturales y agrarios en América Latina

Conceptualization and edaphological consequences of environmental impacts on natural and agricultural ecosystems in Latin America

Hans Fassbender



Los artículos publicados se distribuyen bajo una Creative Commons Reconocimiento al autor-No comercial-Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0 Internacional) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada (*post print*) del artículo, siempre y cuando se realice sin fines comerciales y se mencione la fuente y autoría de la obra.

Conceptualización y consecuencias edafológicas de los impactos ambientales en ecosistemas naturales y agrarios de América tropical

por Hans Fassbender

Se presentan los conceptos básicos atinentes a impacto ambiental para el análisis de éste en ecosistemas naturales y agroecosistemas. Los impactos ambientales implican cambios edafológicos relacionados con las diversas ecosferas, y por su intensidad pueden ser: de mejoramiento, de mantenimiento, de carga, de daño o de destrucción de una característica específica. Se presentan los aspectos básicos del análisis de impacto ambiental, se propone una matriz para la evaluación de éste en diferentes aspectos edafológicos y se ilustra mostrando su aplicación en bosques primarios y diversos agroecosistemas de América tropical, examinándose el impacto ambiental en ellos. Se puntualiza la necesidad de una protección global de los suelos y la importancia del desarrollo de parámetros cuantitativos para evaluar el impacto ambiental.

The principal concepts for the analysis of environmental impacts in natural and agricultural ecosystems are presented. Environmental impacts imply change in soils and vegetation systems in different eco-spheres, which can cause positive or negative changes, changes in loads, damage or destruction of specific characteristics. A matrix for analyzing these environmental impacts is presented with case studies for primary forests and tropical agricultural ecosystems. The need for more quantitative research on environmental impact and the necessity of a global system for the protection of soils is stressed.

Resultado de un proceso milenario de interacción de factores geológicos, climáticos y bióticos, los suelos participan en la pedosfera y la litosfera; con sus componentes aéreos y acuáticos son parte de la atmósfera e hidrosfera (Fassbender y Bornemisza 1987; German Advisory 1995), y por el uso que el ser humano hace de los suelos, éstos interactúan también con la antroposfera (German Advisory 1995). Los suelos participan en muchos procesos de la naturaleza; son parte integral de los ecosistemas y sistemas de producción agropecuarios jugando una serie de funciones decisivas para plantas, animales, microorganismos y seres humanos, funciones que se pueden agrupar en *naturales* y *culturales*. Las primeras tienen que ver con que los suelos son hábitat de las plantas, animales y microorganismos, contri-

buyen a la biodiversidad y almacenan una información genética muy grande, regulan los procesos de intercambio de energía, de la infiltración de agua y descomposición de residuos, almacenan los elementos nutritivos y el agua esenciales para el desarrollo de las plantas, son fuentes y sumideros de gases termoactivos como el monóxido de carbono, el metano y el dióxido de nitrógeno, son factores de regulación, acumulación y transformación de elementos químicos nocivos, etcétera.

Las funciones culturales de los suelos son: constituyen la base de la producción de alimentos y otros productos esenciales para el desarrollo de los seres humanos; son asiento de las áreas para el desarrollo de las actividades antropogénicas (asentamientos, industria y explotación energética); almacenan la información del desarrollo natural y cultural; determinan a través de su uso las estructuras sociales y religiosas de los seres humanos; etcétera.

El autor, ingeniero forestal, es profesor de la Universidad de Göttingen, Alemania.

Aspectos edafológicos de los impactos ambientales

Clasificación de los impactos ambientales

Los suelos están supeditados a un proceso constante de cambios de energía, materiales e información que son el resultado de impactos ambientales (German Advisory 1995), los cuales, a su vez, son múltiples y muchas veces bastante complicados, y pueden ser clasificados en una o varias de las categorías dicotómicas siguientes: (1) beneficioso o adverso; (2) reversible mediante procesos naturales o irreversible; (3) recuperable mediante técnicas o irrecuperable; (4) a corto, inmediato o largo plazo; (5) temporal o continuo; (6) accidental o previsto; (7) local (finca), subregional (cuenca) regional (provincia, estado); (8) nacional (sector) o global (continental, mundial); (9) simple, primario o aditivo; (10) sumarástico, sinérgico, interactivo o acumulativo; (11) directo, primario o indirecto, secundario.

Los parámetros de la evaluación de los efectos o impactos ambientales son difíciles de precisar. En la intensidad de ellos se puede considerar las siguientes cinco categorías (véase Cuadro 1).

1. Impacto de mejoramiento, corrección o enmienda de una característica específica -estos términos se pueden considerar como comparativos entre ellos. Aquí se tiene siempre una mejora de las condiciones entre los diferentes componentes reactantes.

2. Impacto de mantenimiento, conservación y sostenimiento. En este caso se tiene un status quo, sin alteraciones, de los componentes involucrados en la interacción.

3. Impacto de carga, molestia, acosamiento o gravamen de una situación. En este caso aún no se producen cambios importantes entre los componentes. Aquí es necesario mencionar las

cargas críticas máximas de cambio o capacidad de carga, dentro de las cuales no se perturba la característica. En forma paralela se usan los términos de la cantidad crítica y la operación crítica en las cuales no se producen impactos de menoscabo.

4. Impacto de menoscabo, perjuicio o daño de una característica. La magnitud del daño es aun pequeña, su corrección implica el uso de enmiendas o inversiones económicamente aún aceptables.

5. Impacto de destrucción, demolición, exterminio o destroz irreparable de una propiedad específica. Las posibilidades de una corrección son prácticamente descartadas e implican inversiones muy grandes, económica o prácticamente imposibles.

Dentro de los cambios o impactos edafológicos asociados a los ecosistemas naturales y a los agroecosistemas (sistemas de producción forestales, agrícolas, pecuarios y agroforestales) se puede mencionar los siguientes impactos en la pedosfera y la litosfera (véase Figura 1).

Generales

- Cambios en las campiñas, paisajes y en los uso del suelo
- Pérdidas y transformación en asentamientos (pueblos, ciudades), carreteras, represas, aeropuertos, etcétera

Físicos

- Cambios en la estructura y textura, compactación
- Alteración de la profundidad del suelo
- Cambios en el régimen hídrico
- Erosión eólica o hídrica

Químicos

- Cambios en las propiedades intrínsecas químicas del suelo

Cuadro 1. Terminología y clasificación de los impactos ambientales

Categoría	1	2	3	4	5
Intensidad del efecto / impacto / cambio	Mejoramiento Corrección Enmienda Molestia	Mantenimiento Conservación Sostenimiento	Carga Acosamiento Gravamen	Perjuicio Daño Menoscabo	Destrucción Demolición Exterminio Destroz
Área geográfica	Local Pedrial	Subregional Comunal	Regional Provincial Estatal	Nacional	Continental Global
Nivel ecológico	Individuos	Grupos	Poblaciones	Ecosistemas	Ecosferas
Función del tiempo	Directo Inmediato		A medio plazo		A largo plazo

Fuente: Adaptado de Fassbender 1992; ver también Canter 1997.

- Cambios en los ciclos biogeoquímicos
- Pérdidas de la fertilidad del suelo, cambios en la materia orgánica (humus) y pérdida de elementos nutritivos, sobrefertilización, eutrofización
- Salinización y alcalinización
- Cambios del pH, acidificación
- Contaminación y acumulación de elementos tóxicos y radioactivos
- Acumulación de residuos tóxicos orgánicos, residuos municipales

Biológicos

- Cambios en las condiciones de vida de los componentes bióticos del suelo (microorganismos, flora y fauna edáficas)

(Los impactos en otras ecosferas se han incluido en la Figura 1 y no serán tratados en este documento.)

Los impactos ambientales edafológicos se han interpretado en términos de la degradación de los suelos. Ello implica cambios de origen antrópico en características del suelo, en sus estructuras y funciones, o pérdidas con cambios físicos, químicos o biológicos superiores a la capacidad de recuperación en los sistemas. Uno de los mejores estudios de la degradación mundial de los suelos, realizado en el International Soil Reference and Information Centre (ISRI, Wageningen, Holanda) (Oldemann 1992), ha propuesto cuatro niveles de degradación: (1) ligera: sin cambios notables en la capacidad de uso del suelo, su corrección es posible con cambios en el manejo y uso; (2) moderada: con una reducción importante en la capacidad de uso, sin embargo es posible su recuperación dentro de los sistemas locales, su corrección implica el uso de enmiendas; (3) fuerte: con una pérdida notable de la capacidad y limitación del uso del suelo, su recuperación implica la aplicación de correctivos e insumos grandes, y (4) extrema: con una destrucción del suelo para su uso agronómico, su recuperación no es económicamente factible.

A nivel global se ha estimado un total de 1.995 millones de hectáreas de terrenos degradados, de las que 749 millones lo están a nivel ligero, 911 a nivel moderado y 305 millones a nivel fuerte-extremo (Ibid.). Las formas más importantes de la degradación son la erosión hídrica (1.095 millones ha) y eólica (549 millones de ha); la degradación química alcanza 135 millones de ha y la degradación física 83 millones de ha. Como causas de la degradación se indican la deforestación, la sobreexplotación, el sobrepastoreo y las actividades agrícolas e industriales. Se ha indicado que en América del Sur y Central, respectivamente,



Archivo Cosmovisiones

el 13 y el 38 por ciento de las áreas forestales están degradadas, también lo están el 14 y 11 por ciento de las áreas pecuarias y el 45 y 74 por ciento de las áreas agrícolas (Ibid.).

Análisis del impacto ambiental

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) se creó pioneramente en 1970 como institución reglamentadora del ambiente y, con ella, se dictó la Ley de Política Ambiental Nacional (National Environmental Policy Act -NEPA-), cuyo objetivo, así como los de sucesivas órdenes ejecutivas, directrices y reglamentos del Consejo de la Calidad del Medio Ambiente, es garantizar que el proceso de toma de decisiones sea equilibrado en lo que respecta al ambiente y a su interés público (Canter 1997). El análisis de impacto ambiental (AIA) fue adoptado luego por muchos países.

Los estudios de impacto ambiental implican una evaluación de los efectos o impactos ambientales que resultan de una gestión, un pro-

yecto o un acto puntual propuestos, para, sobre esa base, tomar decisiones acerca de su factibilidad y ejecución considerando alternativas favorables. La situación legal o jurídica está ligada a leyes o decretos de las instituciones involucradas.

En el proceso de elaboración de un análisis de impacto ambiental se consideran las siguientes etapas decisivas (Brodbeck 1987; Bundesministerium 1995; Canter 1997; Fassbender 1992; Gassner y Winkelbrand 1997): 1º: descripción del proyecto, gestión o programa; 2º: identificación y valoración de los impactos ambientales (*screening*, *scoping*); 3º: propuesta de medidas correctivas, y 4º: propuesta de medidas de vigilancia y control.

En el proceso de desarrollo del AIA tienen gran importancia los pasos de *screening* y *scoping*. Con el primero se decide si se necesita o no un estudio de impacto ambiental para la futura actuación; el segundo se centra principalmente en la evaluación de los efectos ambientales. El paso siguiente implica el estudio de alternativas de gestión que sean ambiental y económicamente razonables y que sean aceptadas por la opinión pública. Posteriormente, se somete la propuesta a su aprobación para, finalmente, implementar el inicio de la gestión (Brodbeck 1987; Bundesministerium 1995; Canter 1997; Fassbender 1992).

A partir de los resultados del *screening* y el *scoping* se puede clasificar los proyectos o gestiones propuestas en las siguientes categorías según la necesidad de continuación del estudio de impacto ambiental (Bundesministerium 1995; Canter 1997):

AIA - 0: Sin objeciones: la evaluación no ha identificado ningún impacto ambiental potencial que requiera cambios en la propuesta.

AIA - 1: Preocupación ambiental: la revisión ha identificado impactos ambientales que deberían evitarse.

AIA - 2: Objeciones ambientales: la evaluación ha identificado impactos ambientales significativos que deben evitarse con cambios o alternativas nuevas a estudiar y proponer.

AIA - 3: Ambientalmente insatisfactorio: la evaluación ha identificado impactos ambientales de una magnitud tal que la actuación propuesta no debe darse.

Estas evaluaciones del *screening* y el *scoping* están asociadas a la clasificación de los efectos o impactos ambientales discutidos anteriormente (Cuadro 1). Los impactos de la clase 1 (mejoramiento), 2 (matenimiento) y 3 (carga) corresponden en la categorización de AIA a *sin objeción* y a *preocupación ambiental*; así, prácticamente se puede continuar con la gestión propuesta. Los impactos ambienta-

les de la categoría 4 (perjuicio) obligan al estudio y a propuestas de alternativas con estándares físico-ambientales, sociales y socio-económicos aceptables para implementar la actuación propuesta. Los impactos ambientales de la categoría 5 (destrucción, exterminio irreparable) corresponden a los resultados del AIA 3 (*ambientalmente insatisfactorio*) e implican la cancelación de la propuesta.

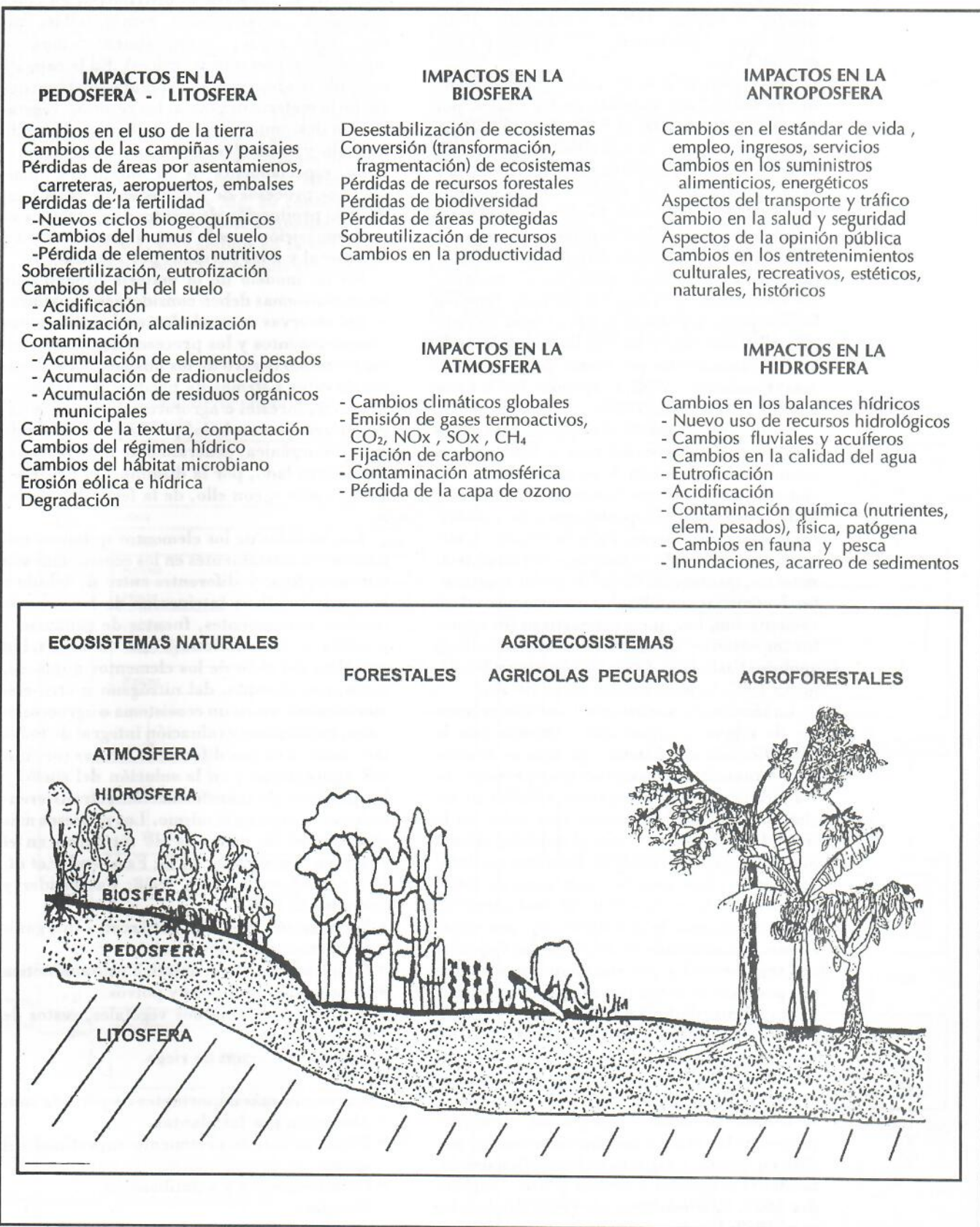
Según Canter (1997), en los Estados Unidos se realizan anualmente entre 30.000 y 50.000 análisis de impacto ambiental, correspondiendo al sector agrícola un tercio de los mismos. Los AIA de las últimas décadas pusieron énfasis en los medios físico-químico y biótico; ahora se da también mucha atención a los medios cultural y socio-económico y sanitario. En Europa, especialmente en la U. E., se han generalizado también los AIA (Brodbeck 1987; Bundesministerium 1995; Canter 1997; Fassbender 1992; Gassner y Winkelbrand 1997). En los proyectos alemanes de ayuda a países en desarrollo es obligatorio el AIA, y, según una evaluación de Horstmann (1997), en el sector agrícola la mayor parte de los proyectos se han clasificado en las categorías AIA 0 y AIA 1.

El análisis de impacto ambiental también se ha introducido paulatinamente en los países de América Latina. Salas-Mandujano (1998) ha descrito la situación en Chile con base en dos casos: el de explotación de bosques de lenga por la Compañía Trillium, en la Isla de la Tierra del Fuego, y el de construcción de una planta de producción de celulosa en la provincia de Valdivia -ambos proyectos han resultado muy polémicos jurídica, política, financiera y ambientalmente y aún están en proceso de revisión y aprobación.

Modelaje edafológico de ecosistemas naturales y agroecosistemas para evaluar impactos ambientales

El ecosistema, que es una parte de la biosfera definida en función de las interrelaciones entre los seres vivos y su ambiente, se caracteriza por tener una serie de elementos definidos y muy bien establecidos, los cuales son: sus límites, los flujos de entrada y salida, sus componentes bióticos y abióticos y las interrelaciones o interacciones que existen entre los diferentes componentes. En un ecosistema forestal natural los componentes bióticos más importantes son los árboles y los animales. El suelo es un componente abiótico importante del ecosistema, especialmente con sus características químicas, físicas y biológicas decisivas en su fertilidad. Los ecosistemas presentan

Figura 1: Impactos del suelo, los ecosistemas y los agroecosistemas sobre las esferas



otros componentes abióticos tales como los climáticos, los fisiológicos y los geológicos (Fassbender y Grimm 1981b; Fassbender 1993; Fassbender y Boremisza 1987; Grimm y Fassbender 1981a).

Los ecosistemas artificiales, como su nombre lo indica, son sistemas en los cuales, por alguna circunstancia, se han alterado las condiciones naturales. Con el término *sistemas de producción agropecuaria* se hace referencia a agroecosistemas y, en función de sus productos, a sistemas agrícolas, pecuarios, forestales o agroforestales. Estos sistemas son, generalmente antropocéntricos: dirigidos y manipulados por el ser humano, quien ha determinado los componentes bióticos o alterado también los componentes abióticos para tratar de optimizar las cosechas y los rendimientos, usando así directamente los productos de los ecosistemas (Fassbender 1992; Fassbender 1993; Fassbender y Boremisza 1987).

El manejo y el eventual mejoramiento de los ecosistemas y agroecosistemas se basa en una comprensión adecuada de su estructura y funcionamiento, tarea que es compleja en extremo dada la cantidad de aspectos que debe considerarse simultáneamente. Para facilitarla, a menudo se recurre a la metodología del análisis de sistemas, que tiene la virtud de poder representar fenómenos complicados en términos relativamente simples, que esquematizan los aspectos importantes y básicos de la situación bajo análisis (Fassbender 1993; Fassbender y Boremisza 1987; Grimm y Fassbender 1981b).

La técnica de modelación tiene una secuencia de etapas precisas que comienza con la *identificación del sistema*. En ésta se establecen claramente los componentes y procesos involucrados, cuya importancia amerita su inclusión en el modelo. Sobre esta base, en la segunda etapa se *formula el modelo*, el cual podrá adoptar la forma de diagrama de flujo. La tercera etapa consiste en la toma de mediciones de cada componente, lo cual permitirá elaborar un modelo cuantitativo y, posteriormente, uno matemático, en el que los flujos están representados por ecuaciones que permiten predecir la magnitud de los componentes en un tiempo dado. La última etapa, de *validación del modelo*, consiste en comparar los valores del sistema real con los predichos por el modelo matemático y realizar, si fuese necesario, los ajustes a las ecuaciones propuestas. Utilizando técnicas de simulación es factible proyectar los resultados obtenidos con un modelo en tiempo y espacio bajo condiciones definidas (Fassbender y Grimm 1981a; Fassbender 1993; Fassbender *et al.* 1991; Fassbender *et al.* 1988; Fassbender y Boremisza 1987).

En un modelo de la materia orgánica las reservas de la fitomasa se distribuyen en compartimentos aéreos (hojas, ramas, tallos, frutos, sotobosque, eventualmente madera muerta) y subterráneos (raíces). En la capa de mantillo se observa una acumulación transitoria de la materia orgánica, los residuos vegetales son descompuestos o humificados pasando al suelo y acumulándose como reserva en el suelo, especialmente en los horizontes húmicos. Los procesos de transferencia están ligados a la producción de residuos vegetales, a su descomposición con la acumulación en el suelo mineral y a las pérdidas por respiración.

En un modelo de la materia orgánica de agroecosistemas deben considerarse igualmente las reservas acumuladas en los diferentes compartimentos y los procesos de transferencia y cambio dentro de los mismos. La eficiencia de estos sistemas de producción agrícola, pecuaria, forestal o agroforestal, se puede caracterizar, por un lado, por la producción de materia orgánica, generalmente muy elevada, y, por otro lado, por la disminución progresiva del suelo y, con ello, de la fertilidad de éste.

Los modelos de los elementos químicos nutritivos o contaminantes en los ecosistemas son muy complejos y diferentes entre sí, debido a las características intrínsecas de los mismos (límites, componentes, fuentes de ganancia y pérdida e interacciones). La investigación completa del ciclo de los elementos químicos, como, por ejemplo, del nitrógeno u otro elemento nutritivo en un ecosistema o agroecosistema, implica una evaluación integral de todas las reservas en sus diferentes formas (orgánicas, inorgánicas y en la solución del suelo) y los procesos de transformación y transferencia que ocurren en el mismo. Los procesos más importantes de ganancia de nitrógeno en el suelo son (Fassbender 1993; Fassbender *et al.* 1991; Fassbender *et al.* 1988; Fassbender y Boremisza 1987):

- Fertilización orgánica (estiércol) e inorgánica (fertilizantes químicos).
- Fijación biológica simbiótica y no simbiótica
- Deposición con lluvias y polvos.
- Deposición de residuos vegetales, restos de cosechas, raíces.
- Adición con aguas de riego.

Los procesos más importantes de pérdida son:

- Absorción por las plantas.
- Pérdidas con escurrimiento superficial del agua.
- Desnitrificación y volatilización.
- Erosión.

En los modelos se puede identificar los procesos de cambio o impacto de cada una de las características de los suelos. Para una evaluación de los impactos, dentro de la clasificación del Cuadro 1 (mejoramiento, sostenimiento, carga, perjuicio, destrucción) se debe desarrollar parámetros especialmente para: el pH, la materia orgánica o el humus, las formas de la capa de mantillo, la concentración y reservas totales en el suelo, las condiciones del hábitat para los microorganismos, los elementos nutritivos, N, P, K, Ca y Mg, su contenido y reservas en el suelo, la posible acumulación de elementos tóxicos, los cambios en la estructura y la textura del suelo y la posible erosión hídrica o eólica.

Modelo edafológico e impactos ambientales en un ecosistema forestal

A manera de ejemplo, se presenta -Figura 2- el ciclo de la materia orgánica para el ecosistema forestal montano de San Eusebio, Venezuela, con base en los datos obtenidos sobre las reservas de materia orgánica en los diferentes compartimentos del ecosistema y las tasas de transferencia entre los mismos, publicados originalmente por Fassbender y Grimm (1981a; 1981b) y Grimm y Fassbender (1981a; 1981b). Entre las especies forestales más importantes del ecosistema cabe mencionar al pino laso (*Podocarpus rospigliosii*), pino aprado (*Podocarpus oleifolius*), mortiño rosado (*Graffenrieda latifolia*), saysay (*Myrcia fallax*), tetajira (*Eschweilera monosperma*) y laurel curo (*Beilschmiedia sulcata*). En

Figura 2. Ciclo de la materia orgánica en el ecosistema de San Eusebio, Venezuela

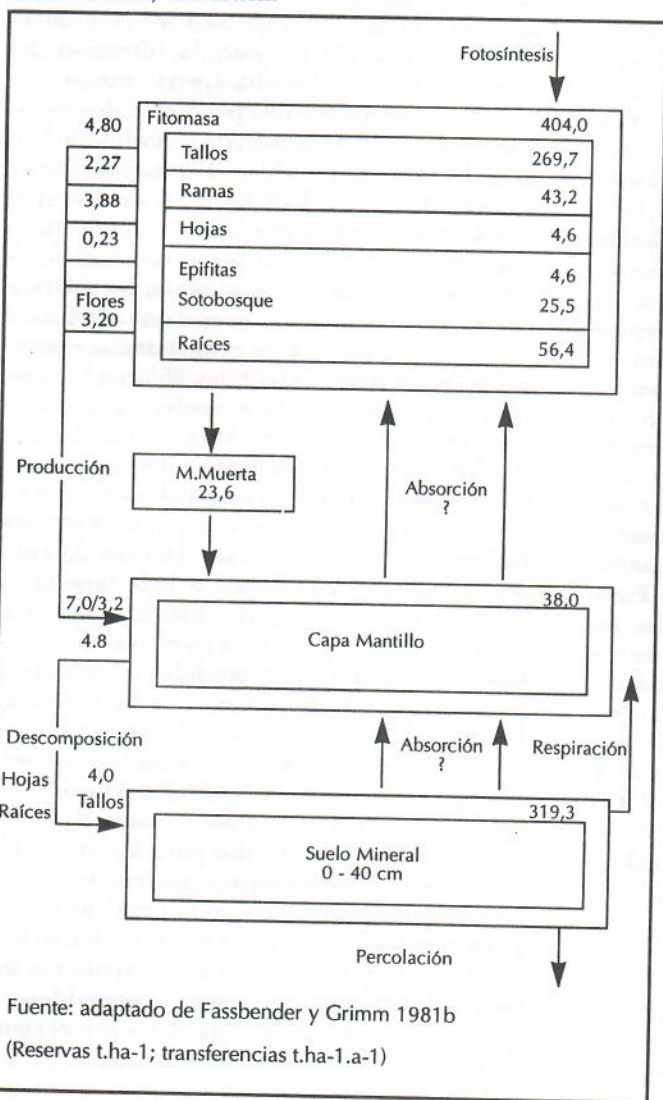
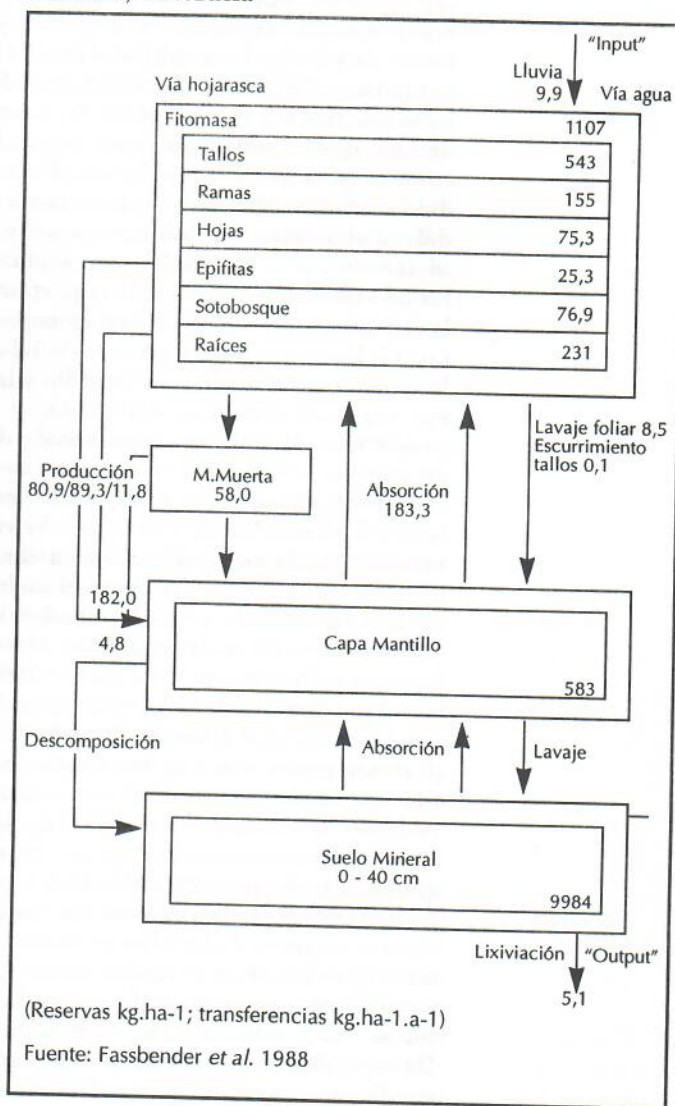


Figura 3. Ciclo del nitrógeno en el ecosistema de San Eusebio, Venezuela



Cuadro 2. Valores básicos del ecosistema forestal de San Eusebio, Venezuela, para interpretar los impactos ambientales (Valores de las reservas kg.ha⁻¹, transferencias kg.ha⁻¹.a⁻¹)

	Materia orgánica	N	P	K	Ca	Mg
Reservas						
Vegetación	465.600	1.748	99	1.557	1.201	323
Suelos mineral	310.000	9.684	3.382	412	768	179
Total	775.600	12.232	3.481	1.968	1.999	502
Ciclo interno						
Residuos vegetales	15.000	182	4,0	66	122	32
Absorción	—	184	4,3	44	124	30
Ingresos						
Lluvias	—	9,9	1,0	2,6	5,6	5,2
Egresos						
Percolación	—	5,1	0,3	2,2	1,6	0,6

Fuente: Fassbender y Grimm 1981a, 1981b, y Grimm y Fassbender 1981a, 1981b.

los casos circunstanciales de doseles abiertos, se observa una gran cantidad de plantas epífitas (especialmente de las familias bromeliáceas, aráceas, araliáceas y orquídeas) y las raíces de plantas hemiepífitas (especialmente tampoco, *Clusia multiflora*). Los suelos han sido clasificados como humic Tropepts. Los detalles de la metodología usada se pueden encontrar en la literatura indicada. Para el modelo se han considerado: (1) la biomasa del rodal, distribuida en tallos, ramas y hojas -determinada en 86 árboles representativos de las 33 especies forestales más importantes; (2) las plantas del sotobosque, así como las epífitas; (3) las raíces finas y gruesas de árboles seleccionados; (4) la capa de mantillo y la materia orgánica (humus) del suelo, y (5) la producción de residuos determinada durante un año.

El total de materia seca en el ecosistema (suelo 0-40 cm) fue de 775 t.ha⁻¹ distribuidas así: 51 % en la vegetación, 8 % en el mantillo (con madera muerta) y 41 % en el suelo (Figura 2). Fuentes de pérdidas maderables no existieron en el ecosistema, por tratarse de bosques primarios sin utilización humana.

La producción de hojarasca y residuos vegetales finos (7,0 t.ha⁻¹.a⁻¹) es bastante importante pues su tasa de descomposición es alta (70 % de la producción anual). Los residuos de tallos y raíces alcanzan 4,8 y 3,2 t.ha⁻¹.a⁻¹ respectivamente y, así, en total ingresan a la capa de mantillo 15,0 t.ha⁻¹.a⁻¹. La velocidad de descomposición de los residuos es en general alta pues se encontraron en total 38,0 t.ha⁻¹.a⁻¹, de las cuales la mayor parte estaba en su fase de humificación. La forma del mantillo corresponde a un *moder*. De estos detalles se puede interpretar que las condiciones para los microorganismos del sue-

lo son aceptables, las especies están adaptadas a las condiciones edáficas y no existe para ellas impactos negativos.

El funcionamiento del ecosistema es sostenido por el proceso de fotosíntesis que permite compensar el incremento, la renovación y la respiración de la vegetación. El valor encontrado de 15 t.ha⁻¹.a⁻¹ es alto dentro del rango encontrado para ecosistemas forestales tropicales y subtropicales. Considerando todos los procesos de ganancia y pérdida del ecosistema se puede indicar tasas equiparables de las cuales resulta un funcionamiento sostenido e integral del sistema en forma permanente. De ello resulta una valorización de los impactos ambientales en la categoría *conservación y mantenimiento*.

Para interpretar los impactos de los elementos nutritivos se presenta -Figura 3- el modelo del nitrógeno y -Cuadro 2- los valores básicos de caracterización del ecosistema. Como fuente de ganancia (*input*) se considera el agua de lluvia (9,9 kgN.ha⁻¹.a⁻¹) y como fuente de pérdida (*output*) la filtración del agua freática (5,1 kgN.ha⁻¹.a⁻¹); aunque los rodales se encuentran en pendiente, los movimientos laterales de ganancia y pérdida se han considerado equiparables. Por tanto, con la acumulación de 4,8 kgN.ha⁻¹.a⁻¹ y con las posibles ganancias por la fijación simbiótica, se han acumulado a largo plazo reservas de N que se encuentran distribuidas en los diferentes compartimentos del ecosistema. Del total de 11.732 kg.ha⁻¹ en el ecosistema se encontraron respectivamente 9, 6 y 85% en la vegetación, mantillo (incluye madera muerta) y suelo mineral (0-40 cm). De esta distribución resulta una estabilidad grande del ecosistema. La acumulación en las capas del mantillo y en la vegetación equivale a la deposición con las lluvias en 176 años. La producción de residuos alcanzó 182 kgN.ha⁻¹.a⁻¹, la tasa de su descomposición no es conocida. La absorción por el bosque (*turnover*) se puede calcular con base en las ganancias y pérdidas de este compartimento, resultando en 183 kg.ha⁻¹.a⁻¹. De estos detalles se puede interpretar que el nitrógeno del ecosistema es estable y los impactos ambientales se pueden considerar igualmente como sostenibles (Cuadro 2).

Los valores presentados para los otros elementos nutritivos implican, igualmente, que el ecosistema presenta las características de un *perpetuo mobile*, las tasas de absorción se cubren con la producción y descomposición de los residuos vegetales y casi no existen diferencias entre las ganancias o pérdidas con el agua de lluvia o percolación; el ecosistema puede ser categorizado por su continuo manteni-

miento con base en todos los procesos que ocurren (Cuadro 2). La cubierta vegetal contribuye en el control de las pérdidas de erosión y un posible impacto de pérdida del suelo no existe, de lo que resulta la valorización en el grupo del *mejoramiento* del sistema (Cuadro 1). Los suelos del ecosistema forestal de San Eusebio son ácidos, su gradiente de pH varía entre 3,6 (profundidad 0-20 cm, superficial) y 4,2 en el subsuelo, característica ésta que puede considerarse crítica (Cuadro 3).

Impactos ambientales de la tala, la quema y la producción agrícola y pecuaria

Todos los intentos de explotación del bosque y su transformación en agroecosistemas empieza con la tala y quema, que en primer instancia producen una interrupción del ciclo natural de la materia orgánica, del agua y de los elementos nutritivos. Además, el suelo queda expuesto a los fenómenos climáticos que causan diversos problemas como la erosión hídrica. Los efectos de la quema son múltiples; las temperaturas desarrolladas son variables y sobrepasan los límites biológicos: valores de 60 grados centígrados ya son críticos porque conducen a la esterilización de los microorganismos; a temperaturas entre 300 y 400° C se acelera la oxidación de la materia orgánica con la producción de CO₂ y N₂O que pasan a la atmósfera -en casos extremos se producen temperaturas hasta de 800° C-; los otros elementos, especialmente el P, K, Ca y Mg se acumulan en las cenizas que reaccionan con el agua pasando a sus formas iónicas, con lo cual aumenta su disponibilidad, pero son a su vez susceptibles a la lixiviación. Con estos procesos generalmente aumenta el pH del suelo (Fassbender y Bornemisza 1987).

Es un hecho comprobado en los trópicos que la fertilidad de los suelos y las cosechas disminuyen rápidamente después de la tumba y quema y de la explotación de los mismos (Fassbender 1993; Fassbender y Bornemisza 1987). El grado de disminución de la fertilidad depende de las características del suelo (contenido de humus, nitrógeno y otros elementos nutritivos, pH, características físicas y actividad de los microorganismos), de la secuencia de los cultivos, de la intensidad de la explotación y de las prácticas de manejo y control de la erosión. La pérdida de la fertilidad supone la existencia de una gran cantidad de condiciones que son la culminación de una serie de procesos simultáneos cuyo resultado colectivo es dicha pérdida. En la agricultura migratoria, después de dos a cinco años de una utilización intensiva del suelo, se alcanza un grado de agotamiento de la fertilidad tal que los cam-

Cuadro 3. Matriz de evaluación de los impactos ambientales edafológicos de los ecosistemas forestales y de los agroecosistemas

	Materia orgánica	N	P	K,Ca, Mg	pH	Micro-organismos	Física estr. erosión	Agua	Valor ponderado
Ecosistema forestal natural	2	2	2	2	3	2	2	2	2
Tala, quema, agric. rotativa	5	5	4	4	4	4	5	4	4-5
Sistema pecuario tradicional	5	5	4	4	4	3	5	3	3-5
Manejo (rota/fertil)	2	3	3	3	3	3	4	3	3
Plantación forestal	2	3	3	4	3	3	2	4	3
Sist. agroforestal sin leguminosas	2	2	3	3	3	2	1	2	2-3
Sist. agroforestal con leguminosas	1	1	3	3	3	2	1	2	1-2

Intensidad del impacto:

1 = mejoramiento; 2 = conservación; 3 = carga; 4 = daño; 5 = destrucción.

Fuente: adaptado de Fassbender 1992.

pesinos optan por abandonar la parcela y tratan de encontrar una nueva para iniciar un nuevo ciclo de explotación (Fassbender 1993; Fassbender y Bornemisza 1987).

El impacto ambiental de pérdida de la fertilidad del suelo se presenta en la Figura 4 con base en los resultados de Toledo y Serrao (1982) en las condiciones de la Amazonia del Brasil. En una pradera tradicional se degrada el suelo en forma irreparable con una intensidad de impacto 5 -*destrucción*. Con prácticas de manejo, especialmente de rotación de cultivos y uso de leguminosas y fertilización, se puede lograr un nivel 2 -*conservación*-, o hasta 3 -*carga*- (Cuadro 3).

Impactos ambientales en plantaciones forestales

En las plantaciones forestales se establece paulatinamente un ciclo completo de la materia orgánica y de los elementos nutritivos (Fassbender 1993). El desarrollo de las diferentes especies depende de sus características intrínsecas, de su adaptación y de las características del sitio (clima y suelos) y, también, del manejo de la plantación (silvicultura, fertilización).

La mayor parte de la información sobre el ciclo de la materia orgánica y del N en plantaciones forestales se limita a ecosistemas de áreas templadas. En las plantaciones forestales resulta un ciclo interno cerrado de N, donde los residuos vegetales constituyen paulatinamente la capa de mantillo y, después de su descomposición, se libera N-inorgánico que es absorbido por los árboles.

En la Figura 5 se presentan, como ejemplo del modelo de N, los resultados obtenidos por Hasse y Fölster (Hasse y Fölster 1983) en una plantación de teca (*Tectona grandis*) de nueve

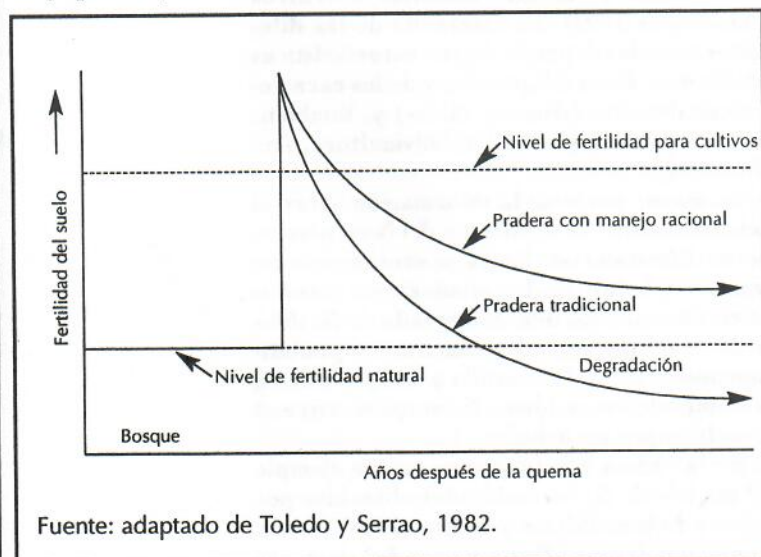
años en Venezuela. El suelo presenta una textura arenolimososa y ha sido clasificado como Eutropept. El rodal (850 árboles por hectárea) presentó al momento del estudio un DAP de 22,3 cm y un área basal de 38m²-ha⁻¹. La acumulación de N en la plantación y en la capa de mantillo alcanzó en los nueve años 656 kgN.ha⁻¹, representando prácticamente un 10 por ciento del suelo original (0 - 100cm, 6.400 kgN.ha⁻¹). La deposición con el agua de lluvia en el período de crecimiento corresponde a 8,6 kgN.ha⁻¹.a⁻¹; así, prácticamente el 8 por ciento del N acumulado en la plantación viene de la atmósfera. En síntesis, el impacto ambiental del nitrógeno se puede considerar como un agotamiento -clase 4- de las reservas en el suelo (Cuadro 3).

Los valores de los otros elementos nutritivos publicados por Hasse y Fölster (1983) implican un agotamiento progresivo de sus reservas en el suelo, lo que lleva a la conclusión de que el impacto ambiental nutricional puede clasificarse como de *menoscabo paulatino* (Cuadro 3). Con la cobertura del suelo se controla la erosión resultando un valor *sostenible* para este posible impacto (Cuadro 3).

Impactos ambientales de sistemas de producción agroforestales

En las figuras 6 y 7 se presentan los modelos quinquenales (1982-1987) de la materia orgánica y del nitrógeno y en el Cuadro 4 los valores claves para los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) asociados con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en las condiciones del Catie

Figura 4. Impacto en la fertilidad del suelo después de la tumba y quema y la transformación del bosque en una pradera



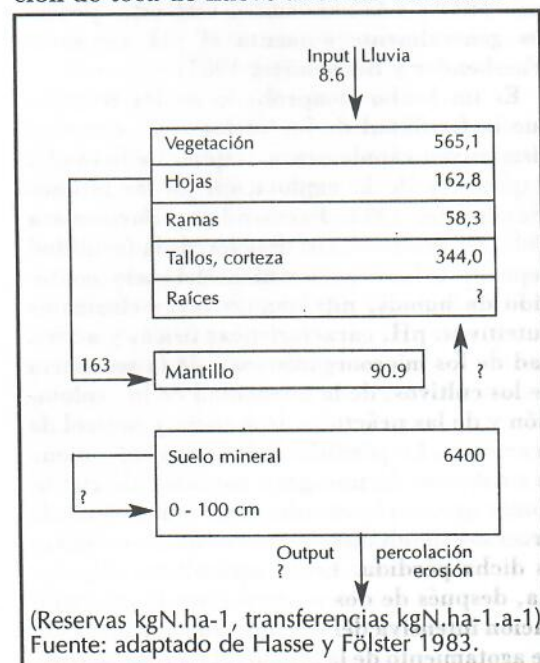
(Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) en Turrialba, Costa Rica, con base en estudios de Beer *et al.* (1990); Fassbender *et al.* (1991; 1988) y Fassbender (1993).

Ecológicamente, el área se encuentra en el bosque húmedo tropical premontano, habiendo sido sus suelos clasificados como Typic humitropepts, fine, halloysitic, isohyperthermic. El experimento fue establecido en 1977 en un diseño de parcelas divididas dentro de bloques al azar. El espaciamiento de los árboles es de 6 m por 6 m (278 árboles.ha⁻¹), mientras que las plantas de cacao se plantaron a 3 m por 3 m (1.111 plantas.ha⁻¹). En las parcelas experimentales se ha aplicado en promedio anual como fertilizante 87 Kg N, 34 Kg P y 32 Kg K.

Para los valores utilizados en las figuras 6 y 7 y en el cuadro 4 se trata en detalle:

- Biomasa como promedio de dos determinaciones (1982 y 1987) para cacao, laurel y poró en el quinto y décimo año experimental. Raíces finas sin diferenciar entre especies a la edad de 5 y 10 años.
- Materia orgánica del mantillo igualmente medida en el quinto y décimo año experimental.
- Materia orgánica del suelo determinada al quinto y noveno años (1982 - 1986) del experimento.
- Producción de residuos vegetales medidos durante cinco años experimentales (nov.

Figura 5. Ciclo del nitrógeno en una plantación de teca de nueve años en Venezuela



1983 - oct. 1987). Residuos de podas de dos años (1985 - 1987). Tasa de descomposición de los residuos asumiendo que es igual a la de deposición de residuos.

- Cosecha de cacao durante cinco años experimentales (1983 - 1987) diferenciando las semillas y las cáscaras.
- Extractos o cosecha en el período quinquenal (1983-1987).
- Depositados con el agua de lluvia.
- Lixiviados con el agua de precolación.
- Aplicados como fertilizante durante el quinquenio en estudio y
- Extraídos del suelo por los componentes vegetales para compensar las tasas de crecimiento (N acumulado en vegetación 10 años menos cinco años) y la extracción con la cosecha de cacao.

Los sistemas en estudio presentan características diferenciadas en su ciclo de materia orgánica. La acumulación total de materia orgánica (biomasa aérea, raíces finas, mantillo) ha alcanzado en promedio en el quinquenio valores experimentales de 60,1 t.ha-1 para cacao con poró. Lamentablemente no se conocen los datos de biomasa de raíces gruesas. Los resultados de las cosechas de almendras del cacao a lo largo de 15 años experimentales (1977 - 1993) alcanzan valores de 745 bajo sombra de *E. poeppigiana*. A la edad de 15,6 años los árboles de sombra de *C. alliodora* alcanzaron valores promedios de 30 cm DAP, 18 m de altura, obteniéndose un volumen de madera de 140 m³ ha-1 (Fassbender *et al.* 1991).

Para caracterizar los sistemas agroforestales en estudio, basándose en los resultados presentados en el modelo de la materia orgánica (Figura 6) se puede calcular la productividad primaria. En el mismo período quinquenal alcanzó un valor de 35,7 t.ha-1.a-1 para el sistema de cacao con poró demostrando la excepcional productividad de estos sistemas agroforestales. El incremento de la materia orgánica en los suelos (0 - 60 cm) en los 10 años experimentales alcanzó 42 t.ha-1 indicando que el impacto ambiental de esta característica puede ser clasificado como *mejoramiento* (Cuadro 3).

Las reservas de nitrógeno en el suelo mineral son elevadas y representan para la asociación con poró el 92 % del total del sistema. El cacao contribuyó con 29,2 %. En el segundo quinquenio aumentó notablemente la reserva de N en las ramas. En la Figura 7 se presenta el valor de la transferencia de nitrógeno con los residuos vegetales, en función de cinco años de mediciones. En los residuos naturales el sistema de cacao con poró alcanzó un valor

Cuadro 4. Valores básicos del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao*) bajo sombra de poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica, para interpretar los impactos ambientales

	Mater. orgánica	N	P	K	Ca	Mg
Reservas						
Vegetación						
5 años	39.100	393	37	201	434	118
10 años	87.300	722	70	520	509	344
Suelo						
Inicial	198.000	9.555	2.997	713	3.082	651
10 años	240.000	10.964	n.deter.	389	2.848	705
Incremento	42.000	1.409	-----	-324	-234	54
Ciclo interno						
Residuos vegetales	22.860	447,1	39,7	177,3	38,1	13,2
Absorción	-----	103,7	13,1	103,3	24,6	21,4
Ingresos						
Lluvia	-----	5,0	0,2	1,8	1,4	1,5
Fertilizante	-----	87,5	34,4	32,4	-----	14,7
Egresos						
Cosecha	1.540	28,4	4,7	29,5	10,0	51,6
Lixiviación	-----	6,0	0,7	1,8	24,6	21,4

(Valores de las reservas kg.ha-1, transferencias kg.ha-1.a-1.)

Fuente: Beer *et al.* 1990, Fassbender 1993, Fassbender *et al.* 1991, 1988.

alto (447,1 kg N.ha-1.a-1), debido a las cantidades elevadas de producción de residuos, especialmente por las podas, y al contenido de N en las hojas del árbol leguminoso. El ingreso de N con las lluvias (5,0 kg N.ha-1.a-1) es equiparable a las pérdidas con el agua de percolación (6,0 KgN.ha-1.a-1).

Para la interpretación del impacto ambiental con los valores obtenidos del nitrógeno en los sistemas agroforestales en estudio, además de los modelos discutidos es posible hacer un balance completo del nitrógeno a partir del suelo a los 10 años experimentales. Para ello es necesario considerar todos los procesos de transferencia en forma acumulativa durante ese período experimental. De ello se desprende que no existen mayores diferencias entre los sistemas, los cuales alcanzaron los siguientes valores (kg N.ha-1.10 a-1):

	Cacao-laurel	Cacao-poró
Ganancias	1.112	1.112
Pérdidas	1.039	1.014

La diferencia en las reservas de nitrógeno del suelo, sin embargo, son las siguientes (kg.ha-1, 0-45 cm suelo):

	Cacao-laurel	Cacao-poró
Inicio	7.991(s) 901	9.555 (s) 895
A 10 años	8.969(s)1384	10.964(s) 902
Diferen./Ganan. + 978		+ 1.409

Las diferencias de reservas de N en el suelo

Figura 6. Modelo de la materia orgánica en el sistema agroforestal Cacao-poró en Costa Rica

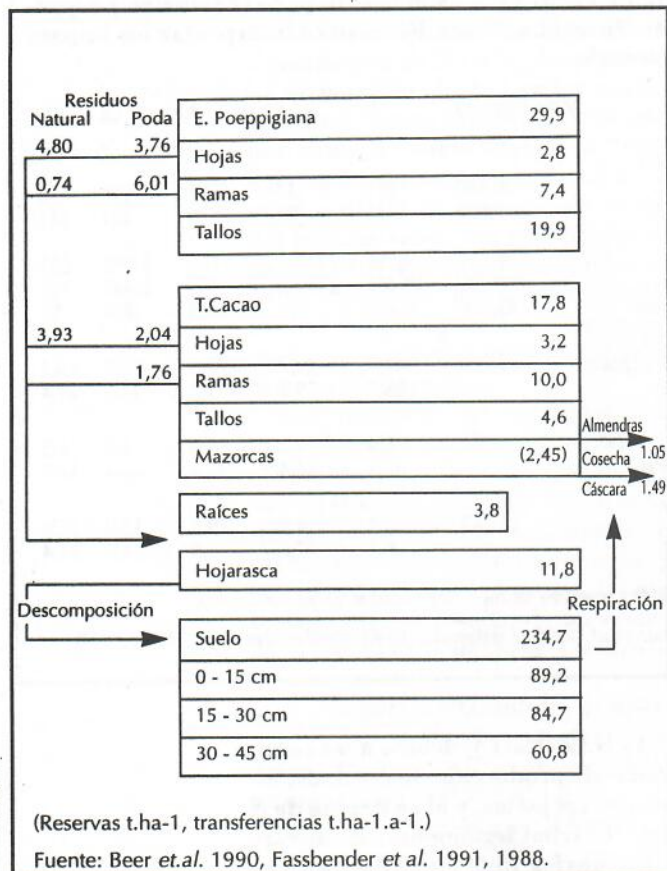
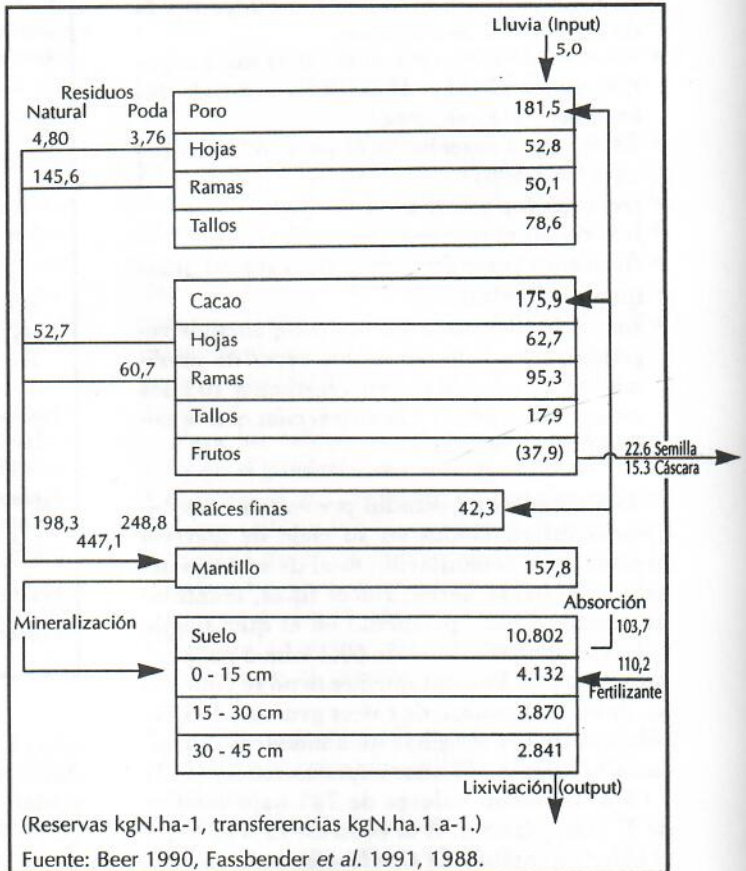


Figura 7. Modelo del nitrógeno en el sistema agroforestal de cacao-poró en Costa Rica



no son estadísticamente significativas. Así, una interpretación de la fijación de nitrógeno para el árbol leguminoso (431kg N.ha-1.10 a-1) con base en la diferencia con el árbol no leguminoso es solamente hipotética. Ello implica, sin embargo, una fijación promedio de N de 40 ha-1.a-1. Los resultados implican que con los sistemas agroforestales descritos se tiene una acumulación importante de N, por ello el impacto ambiental puede considerarse de *mejoramiento* -clase 1- (Cuadro 3). Los resultados de los valores clave para los otros elementos nutritivos (Cuadro 4) implican que el fósforo es un elemento muy estable y prácticamente no tiene influencias en las reservas del suelo; así, puede clasificarse como de *impacto sostenimiento* -valor 2- (Cuadro 3). En el caso de las bases (K, Ca y Mg) se tienen pérdidas importantes de K y Ca por su acumulación en la vegetación y de Ca y Mg con la lixiviación; así, el impacto puede clasificarse como de *carga crítica* -valor 3- (Cuadro 3). El control de la erosión en los sistemas en estudio es absoluto por la cobertura vegetal, el impacto puede clasificarse como *sostenimiento* -valor 1- (Cuadro 3).

Referencias bibliográficas

- Beer, J. W. et al. 1990. "Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina Poeppigiana*) in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years", en: *Agroforestry Systems*, 12 (Holanda).
- Brodbeck, U. et al. 1987. *Die Umsetzung der Umweltverträglichkeitsprüfung in der Praxis: Eine Herausforderung für die Wissenschaft*. Verlag Paul Haupt. Bern / Stuttgart.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. 1995. *Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) bei Vorhaben der Entwicklungszusammenarbeit*. Bonn.
- Canter, L. W. 1997. *Manual de evaluación del impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto*. Mc Graw-Hill. Madrid.
- Doran, J. W. et al. (editors). 1994. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America, Inc. - American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin.
- Fassbender, H. W. y U. Grimm. 1981a. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales", en: *Turrialba* 31 (1).
- Fassbender, H. W. y U. Grimm. 1981b. "Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes

Occidentales de Venezuela. IV. Modelos y conclusiones", en: *Turrialba*, 31.

Fassbender, H. W. 1992. "Umweltverträgliche Landnutzung in den feuchten Tropen", en: von Maydell, H. J. 1992. *Landnutzung in den feuchten Tropen*. DSE / ATSAF. Feldafing, Alemania.

Fassbender, H. W. 1993. *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Serie de Materiales de Enseñanza N° 29*. CATIE. Costa Rica.

Fassbender, H. W. et al. 1988. "Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poró (*Ervithrina Poeppigiana*) in Costa Rica. III. Cycles of organic matter and nutrients", en: *Agroforestry Systems*, 6 (Holanda).

Fassbender, H. W. et al. 1991. "Ten years balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica", en: *Forest Ecology and Management*, 45 (Holanda).

Fassbender, H. W. y E. Bornemisza. 1987. *Química de suelos*. IICA. San José.

Frielinghaus, M. y Und Bork, H-R. (editors). 1999. *Schutz des Bodens*. Economica Verlag. Bonn.

Gassner, E. y A. Winkelbrand. 1997. *UVP, Umweltverträglichkeit in der Praxis*. Rehm-Verlagsgruppe.

German Advisory Council on Global Change. 1995. *World in transition: The thread to soils - 1994 annual report*. Economica Verlag. Bonn.

Grimm, U. y H. W. Fassbender. 1981a. "Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos con el agua", en: *Turrialba*, 31.

Grimm, U. y H. W. Fassbender. 1981b. "Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al y Na)", en: *Turrialba*, 31 (1).

Hasse, H. y H. Fölster. 1983. "Impact of plantation forestry with Teak (*Tectona grandis*) on the nutrient status of young alluvial soils in West Venezuela", en: *Forest Ecology and Management*, 6.

Horstmann, K. 1997. *Querschnittauswertung, Evaluierung, Umweltbelange in ausgewählten Projekten*. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Bonn.

Oldemann, L. R. 1992. *Global extent of soil degradation. ISRIC Biannual repo 1991 - 1992*. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen.

Pizarro, D. y N. Soca. 1998. "Los estudios de impacto ambiental en los proyectos de plantaciones forestales", en: *Revista Forestal Española*, 17.

Salas-Mandujano, E. 1998. *Die Umweltverträglichkeitsprüfung als Entscheidungsfindungsprozess in Chile - fallstudienbezogene Untersuchung zu ihrer Implementation*. Mensch und Buch Verlag. Berlin.

The Tutzing Project Time Ecology. 1998. *Preserving Soils for Life. Proposal for a "Convention on Sustainable Use of Soils (Soil Convention)"*. Zeitschriftenreihe zur politischen Ökologie, 5. Ökom Verlag. München.

Toledo, J y E. A. Serrao. 1982. "Producción de pastos y ganado en la Amazonia", en: Hecht, S. B. *Amazonia, investigación sobre agricultura y uso de la tierra*. CIAT. Cali, Colombia.

Revista FORESTAL

Centroamericana

...ofrece un panorama regional de la conservación y el manejo de bosques naturales y artificiales y los bienes y servicios que brindan; sobre especies, taxonomía y genética forestal; sobre aprovechamiento de recursos, silvicultura y plantaciones; sobre la problemática ambiental y particularmente la forestal; sobre economía, género y otros. Contiene informes de comunicación técnica, experiencias técnico-prácticas, resultados de investigaciones, resúmenes de tesis, ponencias e informes técnicos presentados en reuniones y talleres de trabajo y las principales noticias sobre las actividades que se desarrollan en la América Tropical.

La revista, con ocho años de trayectoria, está al servicio de empresas e instituciones para que sus anuncios lleguen a extensionistas, técnicos, investigadores, educadores y estudiantes suscritos.

<http://www.catie.ac.cr/informacion/revistas.htm>
rforestal@catie.ac.cr. tel. (506) 556 6784. fax. (506) 556 6282

CATIE