

## TRABAJO ESPECIAL

### CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA INTEGRAL DE EVALUACIÓN Y MANEJO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO Y APLICACIÓN DE FERTILIZANTES PARA UNA AGRICULTURA SUSTENTABLE EN VENEZUELA

Rodolfo Delgado\* y Ana Mireya Salas\*\*

#### RESUMEN

El desarrollo de una agricultura sustentable requiere mecanismos integrales para evaluar y manejar la fertilidad del suelo, y recomendar fertilizantes orgánicos o minerales, que cumplan con requerimientos ambientales, económicos, capacidades de los productores, y calidad de las cosechas. En este trabajo se propone una estrategia para desarrollar un sistema integral basado en: 1) el ciclaje de nutrimentos, y otros elementos minerales, de importancia en el sistema suelo-agua-cultivo-atmósfera (ejemplo  $\text{CO}_2\text{-C}$ ), 2) impulsado por características bio-físicas del suelo y clima de la unidad de producción, 3) impacto de prácticas de manejo en características específicas del suelo, 4) expectativas del productor sobre calidad y cantidad de producción, 5) capacidades técnicas, tecnológicas y económicas del productor, 6) requerimientos nutricionales y características de crecimiento de los materiales genéticos, 7) características de las fuentes de nutrimentos, 8) límites aceptables de emisión de gases y nutrimentos a la atmósfera y fuentes de agua, y disposición de subproductos de las actividades agrícolas. En esta propuesta, se sugiere la utilización de mecanismos que integren los principales procesos del sistema suelo-cultivo-clima para simular crecimiento de cultivos, propiedades o características del suelo asociada a la fertilidad y calidad del suelo, y el destino de nutrimentos en el sistema, y que permitan la caracterización cuantitativa de la disponibilidad y accesibilidad de nutrimentos en el perfil del suelo. El mecanismo integral propuesto puede ser útil, para el estudio y enseñanza de sustentabilidad, y fertilidad del suelo, y para detectar necesidades de investigación.

**Palabras Clave:** Fertilidad del suelo; sustentabilidad; fertilización; ciclo de nutrimentos.

---

\* Investigador. INIA. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Apdo. 4653. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

\*\* Profesora. UCV. Facultad de Agronomía. Instituto de Edafología. Av. Universidad. Apdo. 4579. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

RECIBIDO: agosto 30, 2006.

**SPECIAL WORK****CONSIDERATIONS FOR THE DEVELOPMENT  
OF AN INTEGRAL EVALUATION AND MANAGEMENT  
SYSTEM OF SOIL FERTILITY AND FERTILIZER  
APPLICATIONS FOR SUSTAINABLE  
AGRICULTURE IN VENEZUELA****Rodolfo Delgado\* y Ana Salas\*\*****SUMMARY**

The development of a sustainable agriculture would require integral mechanisms to evaluate and to manage soil fertility, and to recommend mineral or organic fertilizer rates in accordance with environmental, economical, and harvest quality requirements as well as with farmer capabilities. In this paper we proposed a strategy to develop an integral system, based on 1) fate of nutrients, and other important elements, in the soil-water-crop-atmosphere system (i.e. C-CO<sub>2</sub>), 2) most important bio-physical characteristics of the soil and climate, at homogeneous units of land, 3) effect of management practices on specific soil properties, 4) farmer expectations in relation to yield quantity and quality, 5) technical and economical capabilities of the farmer, 6) nutritional requirements and crop growth characteristics of specific varieties or hybrids, 7) characteristics of traditional and alternative nutrient sources, 8) acceptable limits of emissions of gasses and nutrients to the atmosphere and water, and disposal of agricultural bio-products. In this proposal we suggest the use of mechanisms able to integrate the main processes of the soil-crop-climate system to simulate crop growth, soil properties related to soil fertility and soil quality, and the fate of nutrients in the system, in addition of allowing the prediction of nutrient availability in the soil profile. Also, the proposed integral mechanism could be useful to teach and to study sustainability issues and soil processes associate with soil fertility, and to detect research needs.

**Key Words:** Soil fertility; sustainability; fertilization; nutrient cycling.

---

\* Investigador. INIA. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Apdo. 4653. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

\*\* Profesora. UCV. Facultad de Agronomía. Instituto de Edafología. Av. Universidad. Apdo. 4579. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

RECIBIDO: agosto 30, 2006.

## JUSTIFICACIÓN

“El enfoque integral del manejo de la fertilidad del suelo, y aplicación de fertilizantes, debe estar asociado al ciclaje de elementos directamente relacionados con la nutrición de los cultivos, y con aquellos elementos que causan impacto directo o indirecto, en el corto, mediano, y largo plazo, en las características y funciones del medioambiente suelo-agua-atmósfera”

El desarrollo de una agricultura sustentable, basado en la preservación y/o mejoramiento de la calidad de suelo, agua, y atmósfera, lo cual contribuye al desarrollo de un medio ambiente saludable y hospitalario para el ser humano (Delgado y Cabrera de Bisbal, 2005), demanda un nuevo enfoque para el diagnóstico del estado actual y futuro, además del manejo de la fertilidad del suelo mediante la dosificación y empleo de enmiendas orgánicas naturales o químicas utilizadas para suplir los requerimientos de los cultivos.

La contaminación de aguas de consumo humano y animal, el desbalance nutricional en los suelos, la emisión de gases asociados al efecto invernadero, entre otros aspectos, están asociados, en parte, a una baja eficiencia de utilización, y dosificación inapropiada de fertilizantes. Como ejemplos, Craswell y Godwin (1984) señalan eficiencias de recuperación aparente entre 14,2 y 62%, y 22,5 y 61% para maíz y sorgo en el trópico húmedo, también para sorgo y trigo en el trópico semiárido, respectivamente. En Venezuela, Delgado *et al.* (2001) en evaluación de eficiencia de utilización de N por maíz, bajo diferentes formas de colocación del fertilizante, consiguieron eficiencias entre 18,8 y 23,7%.

En este sentido, Matson *et al.* (1997), analizando la relación entre algunas propiedades de los ecosistemas y la intensificación de las prácticas en la agricultura, sugirieron la necesidad de incrementar la eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados para evitar la degradación ambiental que acompaña la aplicación de fertilizantes, y la implementación de tecnologías que permitan la aplicación específica para el sitio y cultivo de fertilizantes a través de los campos de producción para cubrir la demanda del cultivo.

Así mismo, Martens (2001) sugirió, debido a la existencia de diferencias entre sistemas agrícolas, la necesidad de establecer sistemas de reco-

mendación de dosis y manejo particularizados o específicos. Este autor, analizando el ciclo de N en diferentes sistemas de manejo, destaca diferencias notables entre labranza conservacionistas (ejemplo mínima labranza), y labranza convencional en la cantidad y distribución de formas orgánicas (ejemplo biomasa microbiana), transformaciones del N en el suelo, y en el destino del N aplicado como fertilizante, además de diferencias en otros parámetros del suelo (ejemplo densidad aparente), que afectan la disponibilidad del elemento en el suelo.

El establecimiento de prácticas de manejo diversas y de manera conjunta ha sido señalado por Mosier *et al.* (2002) como una alternativa necesaria para incrementar la eficiencia de utilización de fuentes N y disminución de emisiones de gases a la atmósfera. Sin embargo, y posiblemente debido a la diversidad de condiciones de suelo, clima, manejo, y sistemas de producción, es necesario integrar funciones que permitan evaluar los diferentes escenarios.

En Venezuela, los sistemas de recomendación de dosis de fertilizantes, están basados en estudios de correlación y calibración, y en estudios de evaluación de dosis de fertilizantes (González *et al.*, 1977; González y Vonasek, 1974). En los estudios de correlación y calibración, se categorizaron los contenidos de nutrimentos del suelo (desde muy bajo hasta alto) extraídos por una solución extractora (ejemplo solución Olsen para P), utilizando la respuesta del cultivo a la aplicación de dosis crecientes del elemento y la capacidad natural del suelo a suplir el elemento.

En este caso se utiliza el rendimiento relativo del cultivo (%RR), el cual es una medida de la capacidad natural del suelo para suplir nutrimentos al cultivo en relación a la dosis de fertilizante que provee todos los requerimientos del cultivo. Aunque algunos adelantos se han realizado en la actualización de las bases de recomendación de fertilizantes en Venezuela, mediante la utilización de variables adicionales del suelo, características específicas de cultivares y manejo, mejoran la recomendaciones de fertilizantes (INIA, 2004), las mismas aún se basan en los procesos de correlación y calibración de métodos, y evaluación de respuesta de los cultivos a la aplicación de dosis de nutrimentos.

Algunas de las limitaciones del sistema de recomendación de fertilizantes basado en el proceso de calibración y correlación, para ser utilizada como base de una agricultura sustentable, donde se requiere recomendar

dosis de fertilizantes más individualizadas que considere las condiciones propias de suelo, clima, manejo de las unidades de producción, y las condiciones socio-económicas de los productores, se pueden resumir en:

1. Cambio de la capacidad de suministro y accesibilidad de nutrimentos iniciales, sobre la cual se realizó la calibración, a causa de la variación en las propiedades físicas, químicas, y biológicas del suelo, debido a condiciones de manejo.
2. Cambio en las características y requerimientos nutricionales de los cultivos actuales, debido a la introducción de nuevos materiales genéticos, posiblemente con diferentes capacidades de absorción de nutrimentos del suelo o eficiencia de utilización (Ma y Dwyer, 1998). La determinación de niveles de suficiencia de elementos en el suelo se basa en la respuesta del cultivo a la aplicación del compuesto, y ello obviamente dependerá de los requerimientos, y eficiencia de utilización por el cultivo o variedad específica.
3. No se cuantifica la cantidad real de nutrimento disponible en el suelo, lo cual no permite relacionar su disponibilidad de un nutrimento, o el nutrimento aplicado como fertilizante, con la producción real o incremento de la producción del cultivo.
4. Debido a que no evalúa la fuente u origen de los nutrimentos en el suelo, no permite la predicción y/o evaluación del impacto de prácticas de manejo y sistemas de producción en la disponibilidad de nutrimentos.
5. Expresa una condición instantánea de la disponibilidad de nutrimentos, y no permite hacer ajustes en la dosis o manejo del fertilizante durante el ciclo del cultivo para manejar variaciones en las condiciones del suelo (ejemplo contenidos de humedad), clima (ejemplo patrón de precipitación), u otros factores que afectan el cultivo (ejemplo incidencia de plagas, enfermedades, malezas, etc.).
6. En el proceso de calibración normalmente se evalúa la disponibilidad de nutrimentos en la capa superior del suelo, y se considera que la disponibilidad de nutrimentos y características físicas que afectan la accesibilidad de nutrimentos en el perfil del suelo permanecen inalterables en el tiempo.

En este estudio se analizarán los aspectos necesarios a considerar para el desarrollo de un Sistema Integral de Evaluación y Manejo de la Fertilidad del Suelo, y de recomendación de Fertilizantes (**SIEMFREF**) como base de una agricultura sustentable, y que permita, además, la predicción de la evolución de la capacidad de suministro de nutrimentos

El sistema propuesto **SIEMFREF** debe estar basado, y considerar: 1) el ciclaje de nutrimentos en el sistema suelo-agua-planta-atmósfera, 2) la variabilidad espacial y temporal de las principales características de suelo y clima a nivel de unidades homogéneas dentro de fincas de producción, 3) interactivamente, el impacto de prácticas de manejo y sistemas de producción en las propiedades del suelo que afectan la suplencia y accesibilidad de los nutrimentos por el cultivo, y el impacto de estos cambios en el desempeño de los sistemas de producción, 4) las necesidades, expectativas, disponibilidad de equipos, accesibilidad a tecnologías, y capacidades económicas de los productores, y 5) la integración de procesos de diferente intensidad o tiempo promedio de residencia entre, y dentro, de los componentes del sistema suelo-agua-planta-clima.

Aspectos a considerar para el desarrollo e implementación de un mecanismo para el diagnóstico y manejo de la fertilidad del suelo, y de la fertilización para una agricultura sustentable: Propuesta de un modelo Integral.

Algunas de las características o bondades deseables que debe presentar el **SIEMFREF**, y que definen el alcance del mismo, y permiten identificar, establecer, o definir los componentes del sistema suelo-agua-cultivo-atmósfera-hombre que lo conforman, se pueden resumir en:

1. Capacidad de predecir la disponibilidad y accesibilidad de nutrimentos en el corto, mediano y largo plazo.
2. Capacidad de predecir el destino de los nutrimentos en el sistema suelo-agua-cultivo-atmósfera, sometido a diferentes condiciones de manejo y/o sistemas de producción.
3. Capacidad y sensibilidad para evaluar el impacto, en el corto, mediano y largo plazo, de prácticas de manejo y de sistemas de producción, en la disponibilidad y accesibilidad de nutrimentos en el sistema.

4. Capacidad de considerar capacidades técnicas y el acceso a tecnológicas, capacidades económicas, y disponibilidad de insumos o capacidades locales de los productores.
5. Capacidad de recomendar sistemas de manejo, y fertilización para las diferentes unidades edafo-climáticas homogéneas dentro de las fincas de los productores.
6. Capacidad de predecir la cantidad y calidad de cosecha.
7. Capacidad de evaluar estrategias de manejo para a) incrementar la eficiencia de uso de nutrimentos, aplicados como fertilizantes, por el cultivo, b) prolongar la permanencia de nutrimentos en el sistema suelo-cultivo, c) disminuir las emisiones de gases invernadero hacia la atmósfera, y d) disminuir el flujo de nutrimentos hacia fuentes de agua en el suelo.
8. Capacidad de evaluar la sustentabilidad de sistemas de producción y/o prácticas de manejo, mediante la utilización de índices integrales que considere los aspectos socio-económicos particulares de los productores, las condiciones biofísicas y climáticas dentro de las unidades de producción y la utilización de recursos o alternativas locales.

Además, los nuevos mecanismos de evaluación y manejo de la fertilidad del suelo, y fertilización, centrados en el ciclaje de nutrimentos en el sistema suelo-agua-cultivo-atmósfera, deben considerar los principales procesos y variables del suelo que son sensibles a condiciones de manejo o sistemas de producción que, a su vez, crean una condición diferente durante el proceso de evaluación de esa práctica o sistema que afecta el desempeño futuro del sistema. Un ejemplo de este caso es la estratificación de procesos, y algunas características físicas del suelo que se crean con la implementación de sistemas de labranza como es la labranza mínima (Doran *et al.*, 1987), y que en el corto, mediano, o largo plazo afectan el desempeño de los cultivos que conforman el sistema de producción evaluado.

La consideración de aspectos de esta naturaleza son necesarios para la evaluación, en diferentes períodos de tiempo, del impacto de prácticas de manejo o sistemas de producción en la evaluación de fertilidad del suelo, ciclaje de nutrimentos, y determinación de requerimientos de

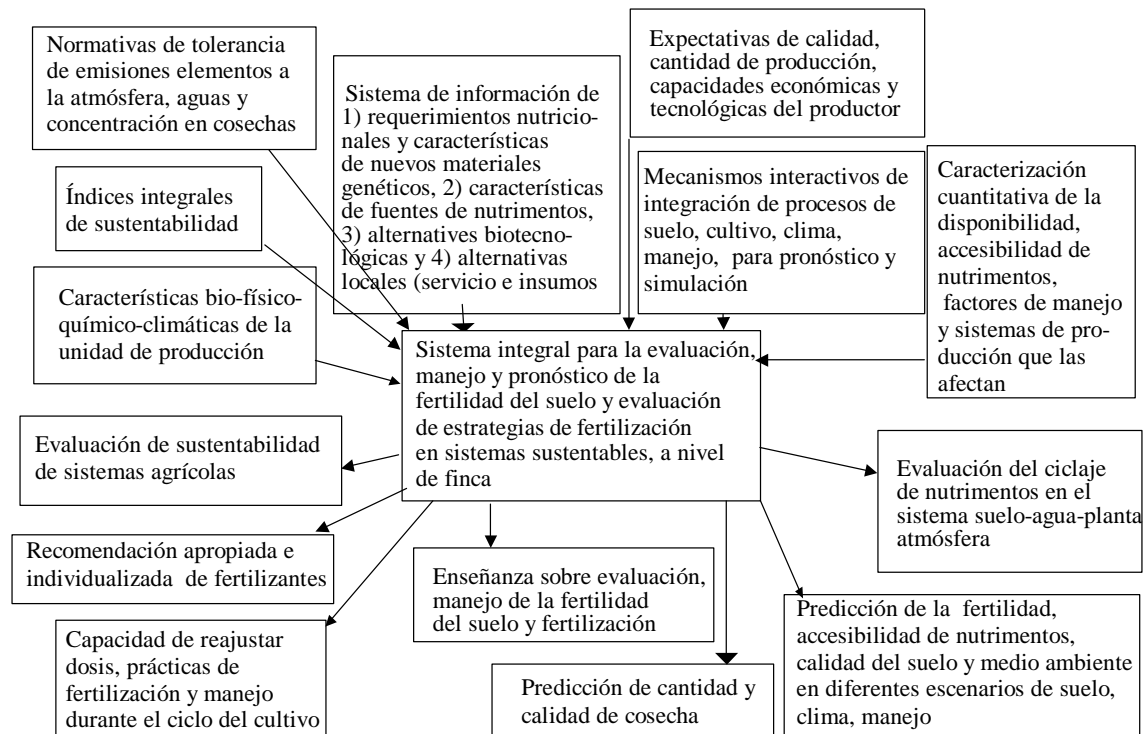
fertilizantes. Mecanismos como los modelos de simulación, como los indicados por Delgado y Núñez (2004) podrían ser de utilidad en la integración de procesos como los indicados anteriormente.

Los principales componentes operativos y de mantenimiento, así como los usos y/o productos que se puede obtener con el uso del **SIEMFREF**, donde se considera algunos de las características deseables o bondades indicados previamente, son indicados en la Figura 1. El sistema propuesto pretende ser suficientemente sensible para que permita la recomendación individualizada de planes de fertilización, según las condiciones bio-físico-climáticas dentro de las unidades de producción, y las características socio-económicas de los productores, además de la calidad y cantidad de productos para la alimentación y sustento del núcleo humano, la preservación del medio ambiente y del suelo.

**Algunas consideraciones sobre expectativas y capacidades de los productores:** En el sistema propuesto **SIEMFREF**, como un componente importante que permitirá evaluar y considerar características propias y la variabilidad y/o diversidad en capacidades y expectativas del productor agropecuario, y hacer recomendaciones individuales, se debe considerar: 1) Expectativas en calidad y cantidad de cosecha, y 2) capacidades económicas y tecnológicas, y 3) capacidad y/o requerimiento de mecanismos para la evaluación ex-ante de prácticas y/o sistemas de producción y de evaluación de escenarios probables. La consideración sobre calidad de la cosecha se podría orientar hacia los aspectos de salud pública (ejemplo niveles de elementos perjudiciales como nitrato), calidad alimentaria (ejemplo niveles deseables de nutrimentos, vitaminas, proteínas), y calidad para procesamiento industrial (ejemplo calidad molinera).

Destacó McMichael (2005), en un análisis de estrategias para asociar el alcance de los estudios de nutrición con los aspectos sociales y ambientales, el reto de las ciencias de la nutrición para lograr, de manera equitativa, la salud humana mientras se mantiene la salud de la biosfera. En otros trabajos Hornick (1992) presentó la importancia de los factores suelo, cultivo, clima, manejo poscosecha, fertilización, y prácticas de manejo en el contenido nutricional de los cultivos. En este caso, será necesaria la determinación de índices de suficiencia, o de tolerancia de elementos nutritivos o tóxicos, y de índices de calidad de la producción para el procesamiento industrial.





**FIGURA 1.** Sistema integral para la evaluación y manejo de la fertilidad, y manejo de la fertilización, en una agricultura sustentable.

El aspecto relacionado con cantidad deseable de cosecha, o producción objetivo, basado en la suficiencia para cubrir los requerimientos del núcleo familiar del productor agropecuario, se podría evaluar de la relación entre ingreso total o beneficio por unidad de producción, el cual se deriva de la producción por unidades de superficie homogéneas, la superficie de la unidad de producción, y el costo por unidad de producto, y el ingreso requerido por el productor para suplir los requerimientos en el corto plazo del núcleo familiar (ejemplo alimentación, vivienda, salud, educación), y los requerimientos para el mediano y largo plazo (ejemplo mantenimiento, educación, jubilación, seguridad de descendencia). Foster (1992) destacó a nivel de unidad de producción, la importancia de considerar, además del beneficio en el corto plazo, el beneficio en el largo plazo para asegurar la sobrevivencia año a año, y la transferencia intergeneracional.

Otras características deseables del sistema, y que cubriría las expectativas de los productores de disminuir los riesgos de adoptar tecnologías y/o establecer sistemas de producción poco apropiados para su condición medio-ambiental específica, relacionada con la capacidad de evaluación ex-ante de prácticas de manejo (ejemplo formas de aplicación y tipo de fertilizantes, aplicación de riego, incorporación o no de residuos de cosecha, tipo de labranza, disponibilidad de abonos orgánicos), se pueden incluir o abordar mediante la consideración del efecto o impacto de estos factores en procesos importantes en el suelo relacionados con la disponibilidad y accesibilidad de nutrientes, y mediante la integración de estos procesos en mecanismos interactivos de simulación que consideran las relaciones suelo-planta-manejo-clima.

Como ejemplo de la consideración de estas prácticas de manejo en procesos importantes del suelo, e integración en mecanismos interactivos e integrales, se puede señalar las consideraciones de aplicación de fertilizantes nitrogenados, y la intensidad de incorporación de residuos orgánicos debido al tipo de labranza realizado por Delgado y Núñez (2004), en un modelo de simulación de procesos en el suelo, integrado al desarrollo del cultivo de maíz. El desarrollo e implementación de estos mecanismos integrales permitirán, además, cubrir otro tipo de expectativas como es la necesidad de disponer mecanismos que podrían incrementar la eficiencia de utilización de los recursos, y preservación de la calidad ambiental, mediante la evaluación conjunta de prácticas de manejo (ejemplo riego, labranza, fechas de siembra), y escenarios

climáticos probables (ejemplo períodos de sequía, inundaciones, etc.,) y/o ocurrencia de plagas y enfermedades, que afectarían el desempeño de los cultivos y eficiencia de utilización de nutrimentos y agua.

**Algunas consideraciones sobre límites o niveles tolerables de emisiones de elementos a la atmósfera y agua, y de contenidos de nutrimentos en las cosechas, y/o disposición de subproductos de la actividad agrícola:** El enfoque integral del manejo de la fertilidad del suelo, y aplicación de fertilizantes debe estar asociado al ciclaje de elementos directamente relacionados con la nutrición de los cultivos, y con aquellos elementos que causan impacto directo o indirecto (en el corto, mediano, y largo plazo), en las características y funciones del sistema suelo-agua-atmósfera.

Aunque ha sido ampliamente reseñado el impacto de la acción de gases invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) en las características, componentes, y funciones de la atmósfera y el riesgo sobre la vida en el planeta (Smith, 2003), y el impacto de algunas prácticas de manejo agrícolas para mitigar las mismas, aún no existen normativas locales, regionales, o globales de niveles de emisión tolerables o aceptables. Sin embargo, es necesario y/o apropiado: 1) establecer prácticas de manejo y sistemas de producción que, de manera relativa, presenten menor riesgo de emisión de gases, a la vez que permitan suplir los requerimientos de los productores, y mantener las propiedades beneficiosas del suelo y agua (ejemplo de estudios de evaluación de prácticas de manejo las señala Matson *et al.*, 1998), y 2) avanzar en la determinación de niveles tolerables o aceptables de emisiones basados en las condiciones de suelo y clima de las unidades de producción, la disponibilidad de equipos y tecnologías, y capacidades económicas de los productores, y 3) avanzar en la determinación y establecimiento de lineamientos locales, nacionales, regionales o internacionales que regulen las emisiones.

Medidas o estrategias similares a las indicadas previamente para la mitigación de emisiones de gases invernadero y el efecto sobre el medio ambiente, deben ser consideradas para la disposición y manejo de residuos o subproductos de las actividades agrícolas (ejemplo estiércoles de animales, o subproductos de proceso de caña de azúcar), que de no ser manejados adecuadamente podrían tener efectos nocivos sobre el agua, atmósfera, suelo, cultivo y aún sobre la salud humana.

**Caracterización cuantitativa y modelización dinámica de mecanismos y/o procesos que intervienen en la disponibilidad y accesibilidad de nutrimentos, y factores de manejo, sistemas de producción y clima que las afectan:** En la propuesta, debido a que se desea un sistema que pueda ser empleado en diferentes condiciones de suelo, clima, y condiciones de manejo, y que permite diagnosticar la fertilidad del suelo (en el corto y mediano plazo), y la evaluación del impacto de la fertilización, prácticas de manejo, y sistemas de producción, desde períodos cortos de tiempo (ejemplo etapas durante el ciclo del cultivo), hasta períodos prolongados (años), se hace necesario la integración cuantitativa de los principales y/o más importantes procesos involucrados que afectan tanto los contenidos de nutrimentos realmente disponibles, así como a las fuentes orgánicas de diferente calidad y accesibilidad a los descomponedores del suelo.

En esta propuesta la caracterización cuantitativa de la disponibilidad y accesibilidad de nutrimentos, a diferencia de la caracterización descriptiva que sólo se basa en la medición de los cambios de algunas propiedades de los suelos (Carter, 2002), considera los diferentes compartimientos orgánicos, minerales de nutrimentos, los principales procesos y características biológicas, químicas, y físicas del suelo, que varían naturalmente en el espacio o perfil del suelo, o que son alterables por prácticas de manejo, sistemas de producción, y parámetros climáticos.

Esta estrategia de investigación, orientada hacia la determinación cuantitativa de los diferentes compartimientos orgánicos y minerales de nutrimentos en el suelo relacionados con su disponibilidad de nutrimentos, y la susceptibilidad de alteración de los mismos debido a condiciones de manejo, sistemas de producción implementados que alteran procesos y/o características del suelo donde estos compartimientos están involucrados, o por condiciones propias o naturales de los suelo, permitirá la determinación de la disponibilidad inmediata o futura de los nutrimentos, y del efecto de sistemas de producción o prácticas de manejo en la misma.

Un ejemplo de la relación entre los contenidos de N en diferentes compartimientos físicos (agregados del suelo de diferente tamaño), fracciones orgánicas específicas (macro materia orgánica, MO), y fracción mineral del suelo (contenido de nitrógeno mineral en las formas de nitrato y amonio), con el N disponible medido mediante el N extraído por un

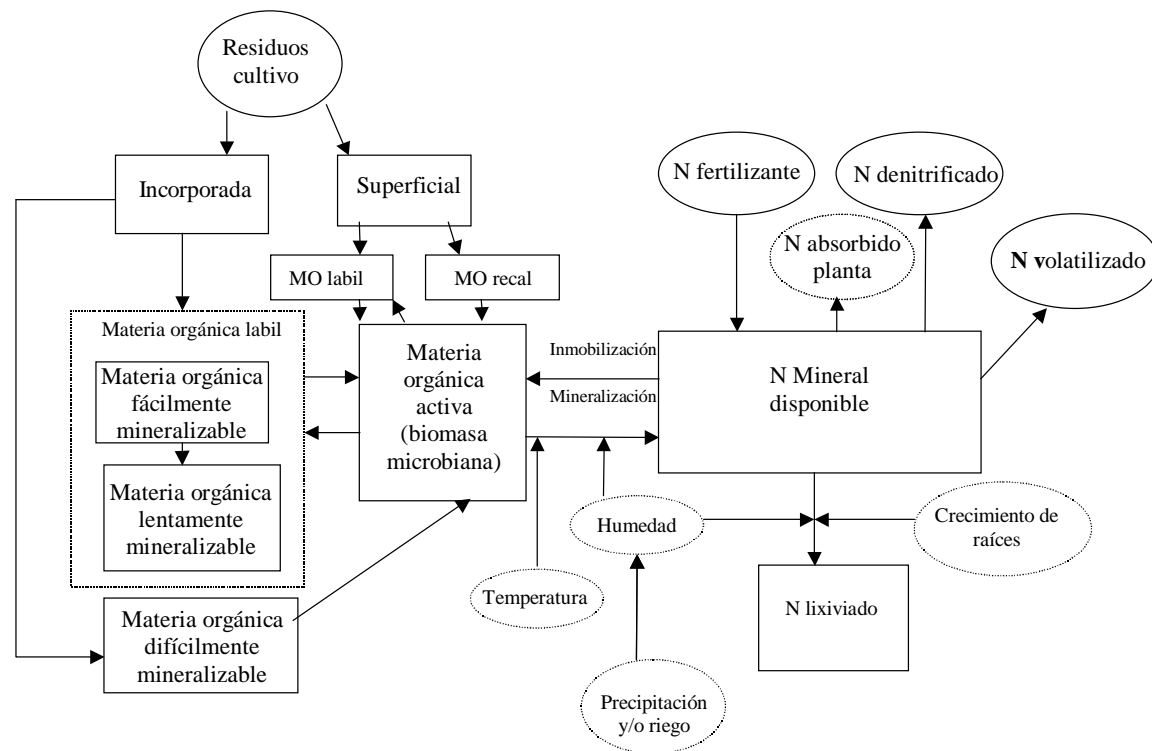
cultivo indicador es presentado por Delgado (2003), quien encontró relación significativa entre estas fracciones y el N disponible para un grupo de suelos con alta capacidad de suplencia del elemento, donde la formación de agregados parece seguir el modelo propuesto por Tisdall y Oades (1982), lo cual sugiere una relación entre la MO del suelo y la agregación (la MO actúa como agente enlazante en la formación de agregados), lo cual afecta su descomposición y la liberación de N para la nutrición de las plantas.

Otros intentos de integración cuantitativa de factores y procesos en el suelo que afectan la disponibilidad de N, mediante el establecimiento de compartimientos de diferente calidad, es presentado por Van Veen *et al.* (1985), y Molina y Smith (1998). Delgado y Núñez (2004), considerando e integrando algunos de los elementos indicados por Van Veen *et al.* (1985), presentan un modelo más general para predecir la disponibilidad de N (Figura 2). Por otro lado, Salas (2001) presenta un modelo para predecir la disponibilidad de P a partir de las fracciones orgánicas y minerales del elemento en el suelo.

Debido a que se desea desarrollar un sistema capaz de evaluar tanto la evolución de la fertilidad del suelo en el corto plazo, para establecer sistemas de manejo y fertilización adecuada durante el ciclo del cultivo, y en un mediano plazo y corto plazo para evaluar la sustentabilidad de los sistemas de producción y prácticas de manejo, es necesario integrar cuantitativamente procesos de diferentes intensidades y duración que afectan tanto los compartimientos minerales realmente disponibles (ejemplo contenidos de nitrato y amonio, y especies de fósforo, los cuales están sujetos a pérdidas por desnitrificación, lixiviación en el primer caso, o precipitación en el segundo), así como los compartimientos orgánicos y minerales que también están involucrados en la disponibilidad de nutrimentos, y que son alterables por condiciones de manejo y/o sistemas de producción.

Como ejemplo de estos procesos de menor velocidad (años) que afectan la disponibilidad de nutrimentos, se puede señalar el proceso de agregación del suelo el cual está asociado al ciclaje de la MO en el suelo y condiciones de manejo.

Aunque en el ciclaje de la MO ocurre un proceso de descomposición a corto plazo, la estabilización de parte de ella en los agregados impactará su descomposición y la disponibilidad de nutrimentos en el largo plazo.



**FIGURA 2.** Factores y procesos considerados en la determinación de N disponible en el suelo (Delgado y Núñez, 2004).

Six *et al.* (1998 y 2000), destacaron el rol de la agregación bajo diferentes sistemas de labranza en el ciclaje de la MO y de las fracciones orgánicas más labiles del suelo. El tiempo de residencia fue normalmente mayor, y la cantidad de carbono orgánico en las diferentes fracciones menor, en sistemas bajo labranza convencional que en sistemas no disturbados.

El tiempo de residencia media del carbono bajo labranza convencional fue de 44 años *versus* 73 años bajo labranza mínima. Según Paúl y Clark (1996), el tiempo de vida media de MO protegida es de aproximadamente 9,1 años ( $0,0003 \text{ d}^{-1}$ ).

Como ejemplo de procesos de mayor intensidad o velocidad que también impactan la disponibilidad de nutrimentos es la descomposición de residuos de orgánicos o residuos de cosecha agregados al suelo, que no son protegidos o estabilizados en estructuras del suelo como se indicó previamente. Las tasas de descomposición y tiempo promedio de residencia para residuos orgánicos de diferente calidad y/o tipo han sido presentados por Paúl y Clark (1996): así para paja de centeno la tasa de descomposición es de  $0,03 \text{ d}^{-1}$  la cual, asumiendo tasa de descomposición de primer orden, tendría un tiempo reposición promedio de 33 días.

Otros procesos de (mayor intensidad) y/o menor duración que afectan la disponibilidad de nutrimentos, en este caso afectando el compartimiento mineral de fácil disponibilidad para el cultivo, por ejemplo, es el proceso de desnitrificación de  $\text{NO}_3\text{-N}$  en el suelo. Así Sexstone *et al.* (1985) relacionaron la tasa de desnitrificación y la ocurrencia de períodos de lluvia y riego, lo que denota que se trata de procesos de corta duración y que dependen de circunstancias de suelo, clima, y manejo (ejemplo disponibilidad de  $\text{NO}_3\text{-N}$  y carbono de fácil descomposición) que pueden variar en cortos períodos de tiempo durante el ciclo del cultivo.

Otro aspecto que es considerado en esta propuesta, y ello permite la aplicación del sistema de evaluación y manejo de la fertilidad en diferentes condiciones de suelo y manejo, es la evaluación de la accesibilidad de los nutrimentos asociada a las características del perfil del suelo, y al desarrollo del sistema radical de los cultivos. Debido a que el sistema radical es afectado por las propiedades del suelo, especial atención debe tomarse en la selección de parámetros de suelo que permitan expresar y hacer efectiva la normal variación espacial de características del suelo, lo que permitirá realizar análisis a nivel de unidades homogéneas dentro

de las fincas de producción, variables que denoten la estratificación de propiedades y procesos dentro del perfil del suelo, y variables que sean alterables por condiciones de manejo y de los sistemas de producción (ejemplo densidad aparente, agregación del suelo, concentración de nutrimentos (Miller, 1986)). Un ejemplo de la alteración en la absorción de N disponible debido al efecto de algunas de las propiedades del suelo es observado en los estudios de García *et al.* (1988), quienes encontraron que la compactación y la colocación del N afecta el desarrollo radical.

Es importante considerar las características morfológicas del sistema radical asociada a la absorción de nutrimentos, y las principales características de suelo que afectan el desarrollo del mismo, y el efecto de prácticas de manejo o sistemas de producción en algunas de estas propiedades y/o características. Un ejemplo de las principales características de suelo (ejemplo contenido de arena, densidad aparente, parámetros de humedad en el suelo, contenido de N), cultivo (ejemplo número de raíces primarias, máximo desarrollo vertical observado, estadio de crecimiento de máximo desarrollo vertical), clima (ejemplo temperatura mínima y máxima del aire) que afectan el desarrollo radical, e integrados en un modelo de simulación es presentado por Delgado (2003).

Los mecanismos de evaluación de disponibilidad de nutrimentos, según se sugiere de los aspectos indicados previamente, deberían considerar:

1. Los compartimientos orgánicos e inorgánicos de nutrimentos en el suelo sensibles a condiciones de manejo.
2. Los procesos que motorizan o retardan el flujo de nutrimentos entre los compartimientos en el corto, mediano, y largo plazo.
3. La caracterización cuantitativa de la acción de prácticas de manejo (ejemplo fertilización, y labranza), y sistemas de producción (ejemplo rotación de cultivos, tipo de cultivo) de manera directa en los compartimientos de elementos en el suelo, o mediante su acción en propiedades del suelo que afectan el flujo de nutrimentos entre compartimientos en el suelo.
4. La estratificación física de los compartimientos de nutrimentos, y procesos en el perfil del suelo motorizadas por la acción de los sistemas de producción y prácticas de manejo.



5. Integración de procesos de diferente intensidad con diferente tiempo de vida media. Los tiempos establecidos para evaluación de sustentabilidad dependerá de la velocidad o rapidez con la cual los procesos o cualidades claves del suelo, clima, agua y ambiente sean afectados.

**Modelos de simulación dinámicos:** El uso de modelos integrales e interactivos permitirán hacer un seguimiento del destino de nutrimentos en el sistema suelo-agua-planta-atmósfera, y la evaluación del impacto de prácticas de manejo y sistemas de producción en ello, y su utilización para la evaluación de sustentabilidad de esas prácticas. Por otra parte, la evaluación cuantitativa de la capacidad de suplir nutrimentos por el suelo permitirá, asociado a un desarrollo cuantitativo similar de desarrollo del cultivo e impulsado por la cantidad de nutrimentos absorbidos desde el suelo y elementos removilizados dentro de la planta, la evaluación de producción y calidad de la cosecha. Ejemplos de la utilidad de modelos de simulación en la evaluación de sustentabilidad de sistemas de producción o prácticas de manejo en diferentes escenarios de clima, suelo, o manejo, y de la evolución de aspectos específicos como la MO del suelo en condiciones de aplicación de enmiendas orgánicas o fertilizantes nitrogenados son presentados por Thornton (1992), y Paustian *et al.* (1992), respectivamente.

Un aspecto o característica fundamental que debe presentar los modelos de simulación, para la evaluación de la evolución de la fertilidad del suelo, y para el manejo de la fertilización, es la capacidad para pronosticar: 1) en el corto plazo (días) los requerimientos de fertilización y evaluación de escenarios de manejo que permitan la optimización de uso de los mismos, mientras se mantiene la calidad del suelo y medioambiente, y la producción y calidad de las cosechas, y 2) en el mediano y largo plazo (meses, años, décadas) los cambios en propiedades y/o cualidades del suelo que son alteradas por las condiciones de manejo, y por los sistemas de producción implementados. Un ejemplo de un modelo integral con estas características es el modelo CENTURY (Metherell *et al.*, 1993), y el modelo DAYCENT el cual es la versión modificada del CENTURY, para simulación en base diaria con énfasis en la evaluación de emisión de gases (Parton *et al.*, 1998).

Debido a la necesidad de dar una recomendación de fertilizantes, y prácticas de manejo de manera individualizada, según las características bio-físicas (suelo, clima) específicas de las unidades de producción, los

modelos deben estar basados en los principales procesos bio-físico-químicos del suelo, y estar impulsado por las principales variables o propiedades de suelo que varían espacialmente o en el perfil del suelo de manera natural, o que son normalmente alterables por condiciones de manejo de los sistemas agrícolas.

En la Figura 2 se presenta, a manera de ejemplo, los principales componentes y procesos considerados para predecir la disponibilidad de N en el suelo (Delgado y Núñez, 2004), donde se considera procesos como la mineralización e inmovilización microbiana, lixiviación, absorción de N por el cultivo, que afectan directamente la disponibilidad de N, así como la incorporación de MO que afectan indirectamente la disponibilidad de N mediante la alteración de los compartimientos orgánicos del elemento en el suelo que están o son sujetos al proceso de mineralización. A su vez, los procesos de mineralización son afectados por la temperatura y humedad del suelo, las cuales a su vez son variables que cambian según las características ambientales o climáticas del sitio.

Mediante el uso de los modelos de simulación integrales e interactivos, se podría evaluar tanto el impacto de prácticas de manejo o sistemas de producción (ejemplo fertilización, labranza, sistemas de producción) en características individuales o específicas de suelo (ejemplo capacidad de campo, disponibilidad de N), y en cualidades del suelo (ejemplo volumen de suelo explorable, accesibilidad de nutrientes en el perfil del suelo, y capacidad de suministro de nutrientes), así como el efecto de estos cambios en el desempeño actual y futuro de los cultivos que conforman los sistemas de producción.

Un buen ejemplo del uso de los modelos de simulación para la evaluación de la producción de caña de azúcar sometida por períodos prolongados a diferentes sistemas de manejo de residuos y fertilización nitrogenada, y su efecto en los contenidos de MO del suelo y en la lixiviación de N, es presentado por Vallis *et al.* (1996) en un suelo de Australia. Este aspecto es de gran relevancia dado que la evaluación de sustentabilidad es un proceso integral que requiere la consideración de los diferentes componentes (suelo-agua-cultivo-clima-productor). Otro aspecto relevante de la utilización de modelos de simulación basados en procesos, y de carácter integral e interactivo, lo constituye la capacidad de realizar evaluaciones ex-ante de la sustentabilidad de prácticas de manejo y sistemas de producción, debido a la lentitud con la cual se podrían manifestar cambios en las propiedades importantes e impactantes del

suelo, por la acción de las prácticas de manejo y/o sistemas de producción, y el efecto de estos cambios en la cantidad y calidad de las cosechas.

**Sistema de información de requerimientos nutricionales y características de crecimiento de nuevos materiales genéticos, y de las principales características de las fuentes nutricionales orgánicas y minerales alternativas:** El desarrollo de nuevos materiales genéticos, normalmente conlleva requerimientos nutricionales, o características morfo-fisiológicas adaptativas diferentes. Eghball y Maranville (1993), evaluando desarrollo de raíces de diferentes genotipos de maíz bajo estrés de nitrógeno y agua, observaron diferencias en peso y longitud radical entre genotipos, y de manera similar destacan que todos los parámetros evaluados, con excepción del radio radical y el flujo de N, era superior en los híbridos que en los genotipos consanguíneos, y Costa *et al.* (2002), comparando materiales genéticos con rasgos frondosos y materiales normales, encontró que los primeros presentaban mayor longitud radical total y superficie radical. Otras diferencias entre híbridos, como la distribución de fotosintetizados entre la parte aérea y la parte subterránea, han sido observados por Xu y Juma (1993), quienes encontraron en evaluaciones de cebada, que la distribución de C es controlada por el cultivar.

Otros estudios señalaron diferencias entre genotipos en la eficiencia de utilización del N aplicado como fertilizante, y en la eficiencia de reutilización (removilización) de N entre tejidos de la planta. Así, Halitligil *et al.* (2000) y Ma y Dwyer (1998) presentaron diferencias de variedades de trigo en la eficiencia de utilización de N y de agua del suelo, y en la eficiencia de utilización del N aplicado como fertilizante por maíz, respectivamente, y Tsai *et al.* (1991) observaron diferencias en la eficiencia de redistribución de N desde tejidos vegetales hacia el grano.

En relación a nuevos materiales fertilizantes minerales u orgánicos, y/o alternativas biotecnológicas, es importante caracterizar sus propiedades o características, para ser considerados en los planes de fertilización. Así, Espinoza y Gutiérrez (2003) destacan el potencial de algunos ecotipos de *Azolla filiculoides*, debido a su alta tasa de fijación de N, y otros a causa de su más elevada tasa de crecimiento, para ser empleados en el suministro de N o como cobertura en cultivos de arroz. Otros ejemplos de alternativas biotecnológicas, y que presentan potencialidades para ser empleados en el manejo de la nutrición de los cultivos son el

empleo de microorganismos solubilizadores de P de la roca fosfórica (Reyes, 1991), y el empleo de hongos micorríticos.

Los aspectos señalados destacan la importancia de asociar e integrar los programas de desarrollo de nuevos materiales genéticos (ejemplo variedades e híbridos) con los programas de evaluación y manejo de la fertilidad de suelo para el desarrollo de materiales acorde con la filosofía de desarrollo de agricultura sustentable, para garantizar el desarrollo de materiales productivos y con bajos requerimientos de insumos, más eficientes en la utilización de los nutrimentos asimilados, y capaces de utilizar más eficientemente las fuentes naturales de nutrimentos del suelo.

Además, los programas de mejoramiento, y de desarrollo biotecnológico podrían utilizar algunas propiedades reconocidas de algunos materiales genéticos, como ejemplo la más elevada capacidad de las leguminosas para solubilizar P del suelo (Li y Barber, 1991; Pérez y Smyth, 2005), y desarrollar materiales más productivos, pero con menor requerimientos de insumos. Estratégicamente, los programas de mejoramiento genético, una vez identificado materiales promisorios para una agricultura sustentable, deberían incluir en la evaluación final de estos materiales, además de aspectos relacionados con productividad, parámetros de cultivo asociada a la eficiencia de utilización y uso de nutrimentos (ejemplo patrón de crecimiento del sistema radical, eficiencia de utilización de nutrimentos), que complementen la selección final de los mismos.

Otros aspectos que deben ser caracterizados y cuantificados, es el aporte de nutrimentos por la incorporación de abonos orgánicos, o cultivos de cobertura como leguminosas, los fertilizantes minerales tradicionales o modificados, y de nuevos materiales fertilizantes minerales. Estos aspectos, aunque en algunos casos han sido ampliamente estudiados en el aporte de nutrimentos a los cultivos, en el país poco se ha incorporado en los sistemas de recomendación de fertilizantes.

Lo antes analizado (desarrollo y caracterización de nuevos materiales genéticos, caracterización cuantitativa de la capacidad y patrón de suministro de nutrimentos por nuevos fertilizantes orgánicos o minerales, etc.), sugiere la necesidad de establecer un conjunto mínimo de datos o información que debe ser recopilada por los evaluadores, para ser empleada en los mecanismos integrales de evaluación (Modelos de simulación), que permitirá la evaluación integral de prácticas de manejo y sistemas de producción.

Como ejemplo, del cultivo sería necesario caracterizar el patrón de acumulación de materia seca, y nutrimentos, distribución de fotosintetizados entre diferentes partes de la planta, patrón de crecimiento y distribución del sistema radical, y en todos los casos relacionar estos patrones con otras variables del cultivo y ambiente durante el ciclo del cultivo. En el caso de los fertilizantes minerales, y nuevas fuentes orgánicas de nutrimentos, se requeriría la determinación de características intrínsecos de los materiales (ejemplo relación C:N, contenido de lignina, proporción de fracción labil y recalcitrante, contenido de polifenoles) que de manera conjunta con características propias del suelo (ejemplo textura, contenido de humedad, grado de contacto suelo / residuo), permitirá la determinación de las tasas de mineralización.

Para los fertilizantes minerales sería necesario determinar propiedades o características intrínsecos de estos (ejemplo pH de la solución producto de la hidrólisis del fertilizante, concentración del elemento, especie química dominante del nutrimento y iones acompañantes, potencial de acidificación, solubilidad), que asociada a otras características del suelo (ejemplo pH, contenido de humedad, temperatura, capacidad buffer del suelo), y a condiciones de manejo que afectaran la disponibilidad del nutrimento, permitiría determinar los más apropiados para una condición específica.

**Índices integrales de sustentabilidad:** La evaluación de la sustentabilidad de sistemas agrícolas y/o prácticas de manejo, como se ha considerado en esta propuesta, requiere el desarrollo de índices integrales que consideren: 1) los aspectos más importantes dentro de cada uno de los componentes del sistema, 2) el establecimiento de límites aceptables de referencia para comparar y evaluar esos factores (Carter, 2002), y 3) la ponderación de la contribución de cada uno de esos componentes en la conformación del índice integral (Morse *et al.*, 2001).

Lo antes indicado destaca la naturaleza compleja de estos índices y la subjetividad en el peso o importancia que se le confiere a cada componente o factor en la conformación del índice integral, tal como lo destaca Morse *et al.* (2001).

Algunos elementos relacionados a: 1) expectativas del productor, 2) utilización de insumos y servicios del área agrícola o localidad donde se ubica la unidad de producción, y cumplimiento de expectativas de demanda local por productos específicos, 3) calidad del medio ambiente

y 4) evolución de cualidades del suelo como la fertilidad y/o otras funciones del suelo, que pueden emplearse para el diseño de un índice integral de evaluación de la sustentabilidad de la fertilidad del suelo, a manera de ejemplo, se indican el Cuadro.

Algunos de los elementos que conforman el índice integral, como ejemplo, se colocaron en el Cuadro. Como se observa, existen elementos que permiten evaluar el impacto de los sistemas de producción y/o prácticas de manejo a diferentes niveles o escalas. A nivel de unidades homogéneas de suelo dentro de la finca de producción, se evalúa el impacto en características, propiedades y/o cualidades importantes del suelo, como es la capacidad del suelo para suplir nutrientes y agua, en unidades homogéneas de suelo. Las evaluaciones a este nivel de unidades homogéneas dentro de las fincas de producción, constituyen el nivel de mayor detalle.

A nivel de finca de producción, se considera elementos que permiten evaluar el logro de las expectativas del productor en cubrir la demanda inmediata y futura del núcleo familiar (ejemplo ingreso neto), a nivel local o regional se utiliza elementos que permite evaluar la utilización de insumos y servicios ofrecidos a nivel local, y la producción de productos para cubrir la demanda local, y para evaluar el impacto a nivel global, se emplea elementos que permiten evaluar la preservación al mejoramiento o preservación de propiedades beneficiosas del planeta (ejemplo la evaluación de la emisión de gases invernadero a la atmósfera).

Asociado a los elementos que se considera para la conformación del índice integral (ver Cuadro), se sugiere, a manera de ejemplo, algunos parámetros que pueden ser utilizados para el establecimiento de límites de referencia y/o para la categorización del grado de sustentabilidad de un sistema de producción o práctica de manejo determinado. Así, para la evaluación del cumplimiento de las expectativas del productor, en cuanto a ingreso requerido para suplir las necesidades del núcleo familiar y en cuanto a calidad y cantidad del producto o cosecha, el ingreso neto del productor y calidad de cosecha obtenidos, se podrían confrontar contra el ingreso neto esperado para cubrir las expectativas y contra los niveles de proteínas, vitaminas (relacionados a la calidad nutricional) o contenidos de almidón (relacionados a la calidad molinera) deseados. En cada caso sería necesario evaluar el grado de desviación entre los valores obtenidos debido a un manejo determinado, y los límites de referencia y categorizar esas desviaciones.

**CUADRO.** Elementos a considerar, en algunos de los componentes del sistema suelo-agua-planta-hombre-medioambiente, para la evaluación de sustentabilidad.

Componente del sistema	Elemento para evaluación de Sustentabilidad	Nivel de dominio o impacto	Límites de referencia para la evaluación
Cumplimiento de expectativas del productor	Ingreso neto en la Finca	Finca	- Ingreso esperado o aceptable para cubrir requerimientos productor.
	Calidad de cosecha	Unidad homogénea específica de suelo	- Nivel de Proteínas, vitaminas, concentración de nutrimento. - Contenido de compuestos que afectan la calidad para procesamiento industrial (ejemplo contenido de almidón).
	Utilización de Insumos y/o alternativas, y servicios locales.	Local	- Proporción de insumos no locales aceptables en la explotación. - Proporción aceptable de costos en insumos no locales, <i>versus</i> costos en insumos locales.
Empleo de alternativas y servicios locales y satisfacción de demandas locales.	Producción de cosecha y/o subproductos para satisfacer demanda local.	Local / Regional	- Proporción de mercado local satisfecha.
	Emisión de gases a la atmósfera	Global	- Límites aceptables a nivel regional o global.
	Lixiviación y escorrentía de N hacia aguas profundas y reservorios.	Local / Regional	- Límites aceptables a nivel local o regional.
Calidad del medio ambiente.			

... continúa

.../... continuación CUADRO.

Componente del sistema	Elemento para evaluación de Sustentabilidad	Nivel de dominio o impacto	Límites de referencia para la evaluación
Calidad del medio ambiente	Disposición de sub-productos de la actividad Agroindustrial.	Local / Regional	- Normativas locales y regionales.
Fertilidad del suelo (suplencia y accesibilidad) y otras funciones del suelo	Capacidad de suplencia de nutrientes.	Unidad homogénea específica de suelo	- Capacidad inicial o natural de suplencia de nutrimento de los suelos. - Variación relativa de la capacidad de suplencia entre sistemas de producción o prácticas de manejo. - Cantidad de nutrimentos en comportamientos del suelo asociados a la capacidad de suplencia. - Volumen de suelo explorable por el sistema radical.
	Conservación de materia orgánica y ciclaje de nutrientes.	Unidad homogénea específica de suelo	- Variación relativa de la diversidad biótica entre sistemas de producción y/o en relación a la condición inicial o natural del sistema. - Variación relativa del contenido de materia orgánica del suelo. - Variación en la cantidad de materia orgánica en agregados del suelo.
	Capacidad de almacenaje y suplencia de agua, y propiedades hidráulicas del suelo.	Unidad homogénea específica de suelo	- Variación de la capacidad de suplencia de agua en relación a la condición natural o inicial de los suelos, y/o entre sistemas de producción o prácticas de manejo.



Para el caso de la fertilidad del suelo, se podría considerar aspectos como capacidad de suplencia y accesibilidad de nutrimentos, y otras funciones del suelo como conservación y ciclaje de la MO, y la capacidad de almacenaje y suplencia de agua, y para la evaluación de la calidad del medio ambiente, la emisión de gases a la atmósfera y la lixiviación de nutrimentos a las fuentes de agua, y la disposición de subproductos de la actividad agrícola. En cada caso los parámetros utilizados para evaluar cada aspecto se comparan contra el valor límite o de referencia, y se determinara y categorizara el grado de desviación relativo a la condición sustentable.

Para la determinación del índice integral se considerara todos los aspectos evaluados, previa ponderación del peso que cada uno de ellos tendrá en la conformación del mismo, similar a lo sugerido por Comerma *et al.* (1992), quienes utilizaron un procedimiento similar para la valoración de la aptitud física de la tierra para diferentes sistemas de producción. El índice integral a su vez tendrá una categorización, la cual evaluara el grado de sustentabilidad final.

**Características bio-físico-climáticas de áreas homogéneas dentro de la unidad de producción y desarrollo de sistemas de información geográfica:** La selección de planes de fertilización, prácticas de manejo y sistemas de producción para una agricultura sustentables debe estar basado, entre otros aspectos como se ha indicado previamente, en su impacto en el mantenimiento, mejoramiento o deterioro de los atributos del suelo relacionados con la suplencia y accesibilidad de nutrimentos y agua para las plantas y/o otras funciones del suelo (ejemplo conservación de MO y ciclaje de nutrimentos, y propiedades hidráulicas del suelo), en la cantidad y calidad de la cosecha, calidad del medio ambiente (ejemplo emisión de gases a la atmósfera, lixiviación, escorrentía), y capacidades técnico-económicas y expectativas de los productores, como se indicó en el Cuadro.

La evaluación de los aspectos indicados previamente, y que debido a su importancia son considerados en los mecanismos integrales e interactivos discutidos previamente (Modelos de simulación dinámicos), son impulsados por propiedades del suelo que varían naturalmente espacialmente y en el perfil del suelo, aún dentro de áreas que conforman unidades de producción o fincas, o que son alterables (en el corto, mediano o largo plazo) por condiciones de manejo y/o de los sistemas de producción establecidos.

La importancia de considerar las especificidades (mediante el establecimiento de unidades o áreas de suelo homogéneas), y con ello reducir las desventajas de las generalizaciones, es analizada por Buol y Smith (1988), quienes, como ejemplo, destacaron las ventajas y desventajas económicas en la aplicación de una práctica de labranza profunda dependiendo de la textura y espesor de la capa superficial del suelo, y textura del horizonte subsuperficial, y la utilización de otras variables (ejemplo capacidad de fijación o de liberación de nutrimentos, la CIC, textura y profundidad de ocurrencia de horizontes con ciertas propiedades), adicionales a las cantidades de nutrimentos obtenida por soluciones extractoras, para mejorar la interpretación de los análisis de suelos.

Otras variables del suelo (ejemplo rugosidad superficial, micro relieve, forma del terreno, pendiente, espesor de un horizonte, profundidad de ocurrencia de un horizonte determinado), que afectan directa o indirectamente procesos importantes del suelo (ejemplo infiltración, drenaje) deben ser consideradas. Ejemplos de diferencias en propiedades del suelo, mediante la utilización de técnicas geo estadísticas, que podrían afectar la capacidad de suplencia, o destino de nutrimento aplicado como fertilizante, y con ello la eficiencia de utilización de los mismos, aún en pequeñas áreas o superficies, se sugiere de Ovalles y Rey (1995), quienes en mapas de fertilidad de suelos a escala 1:25.000 detectaron diferencias en características como contenidos de arena, arcilla, limo y MO entre unidades de suelo, y dentro de esas unidades de suelo.

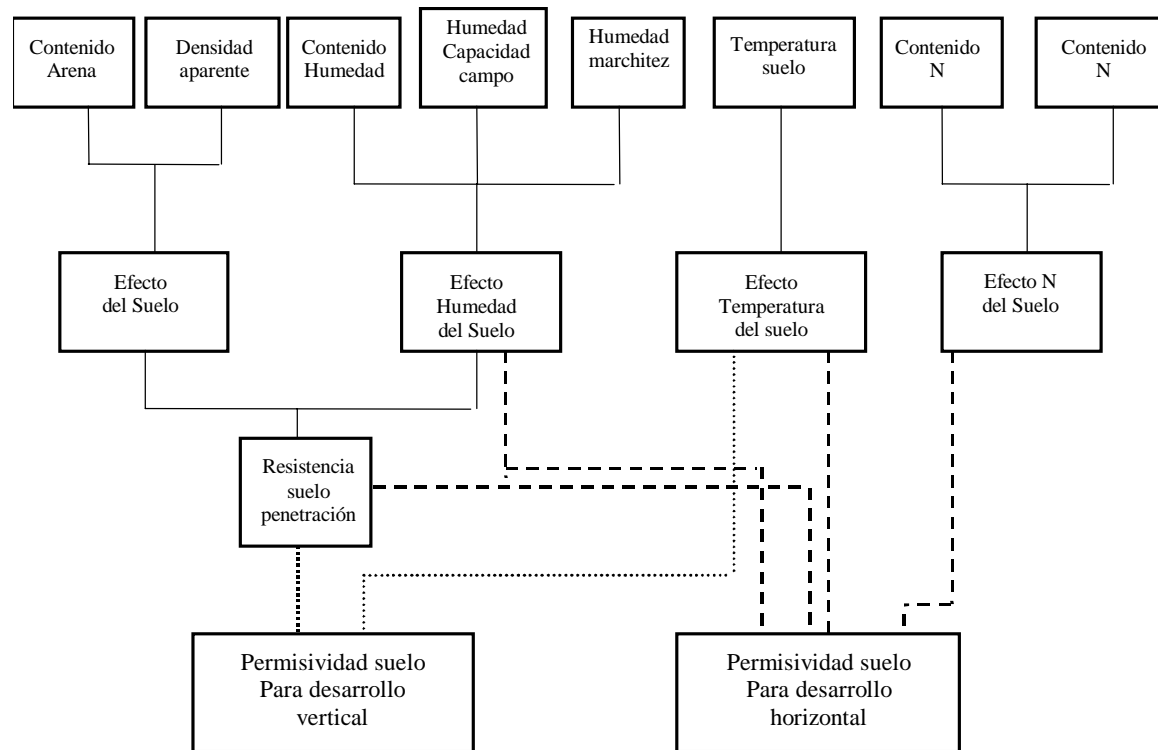
En esas unidades evaluadas, el área dentro de la cual se podría conseguir la máxima homogeneidad en algunas de las variables estudiadas es entre 3,1 y 1,2 has, lo cual es, normalmente, inferior a las superficies de las fincas de producción en el área de estudio: esto destaca la necesidad de establecer áreas homogéneas dentro de las fincas de los productores y para el establecimiento de prácticas de manejo apropiadas en cada una de ellas. La determinación de áreas homogéneas debe considerar parámetros o propiedades del suelo que estén asociadas con el desempeño de los cultivos de manera de hacer consideraciones prácticas de las mismas.

De lo discutido se destacan dos aspectos: la necesidad de establecer áreas mínimas homogéneas de manejo, y la determinación de variables y parámetros de suelo que intervienen en procesos relevantes. En relación al establecimiento de superficies mínimas homogéneas de manejo, se

creo necesario integrar y ponderar aspectos como 1) la homogeneidad de características relevantes del suelo, 2) prácticos como disponibilidad tecnologías (ejemplo equipos de labranza), 3) técnico-científicos como los límites o rangos aceptables de desuniformidad de características espaciales y del perfil del suelo que estén involucradas o impulsen de manera impactante procesos importantes del suelo, y/o que afecten significativamente el desempeño de los cultivos, y 4) significancia del beneficio ecológico-económico-ambiental percibido debido al establecimiento de superficies mínimas de manejo.

En esta propuesta, debido a que se considera los principales procesos involucrados en la evaluación dinámica de la disponibilidad y accesibilidad de nutrientes (procesos impulsados por características climáticas, y por variables de suelo naturalmente variables o alteradas por prácticas de manejo y sistemas agrícolas), calidad del suelo y medio ambiente, etc., es necesario evaluar tanto las variables de suelo que ejercen una acción directa o son incluidas en los procesos evaluados (ejemplo cantidad de nutrientes en compartimientos orgánicos y minerales del suelo), así como aquellos parámetros o variables de suelo que de manera integrada con otras impulsan o intervienen en los procesos (ejemplo parámetros de retención de humedad del suelo, las cuales definen el agua disponible en el suelo que es empleada, de manera directa o relativa, en las funciones donde el efecto de humedad del suelo es considerada).

Un ejemplo de la integración de parámetros de suelo en factores que afectan el crecimiento vertical, y proliferación de raíces en el suelo, lo cual está asociado a la accesibilidad de nutrientes en el perfil del suelo es tomado de Delgado (2003), como se observa en la Figura 3, quien estima los efectos de humedad, resistencia a la penetración, temperatura, y disponibilidad de N en el suelo, en función de los contenidos de arena, densidad aparente, humedad, capacidad de campo y punto de marchites permanente, temperatura, y concentración mínima de N en la solución del suelo bajo la cual no se absorbe N por el cultivo en una base de horizonte por horizonte. Los efectos así calculados, son integrados multiplicativamente para estimar su efecto en el desarrollo vertical (efectos resistencia a la penetración, y temperatura) y proliferación de raíces en los horizontes del suelo (efectos resistencia a la penetración, temperatura, humedad, y disponibilidad de N).



**FIGURA 3.** Factores o parámetros de suelo que afectan el desarrollo vertical y proliferación de raíces en las diferentes capas del suelo.

Finalmente, debido a 1) la necesidad de caracterización a nivel de finca o unidad homogénea dentro de la finca, 2) el suministro de información para los mecanismos integrales de simulación y evaluación (Modelos de simulación), 3) el almacenaje de información generada por los modelos de simulación, y 4) integración de información real y simulada, es necesario desarrollar Sistemas de información Geográfica (SIG) que permita esas funciones. Ejemplos de la utilidad del uso de SIG y mecanismos de predicción para el manejo y entendimiento de sistemas dinámicos como sistemas pastoriles es presentado por Coughenour (1991).

#### **Usos potenciales del desarrollo e implementación de la propuesta de evaluación, manejo de la fertilidad del suelo, y fertilización para una agricultura sustentable**

El desarrollo de un sistema integral para la evaluación y manejo de la fertilidad del suelo, y aplicación de fertilizantes bajo un enfoque de manejo integral del ciclaje de nutrimentos, podría permitir entre otros aspectos, como se indica en la Figura 1: 1) la recomendación de dosis y época de aplicación de fertilizantes, y fuentes alternativas de nutrimentos como residuos orgánicos, apropiadas para las condiciones específicas de suelo, clima, cultivo, manejo, condiciones económicas, y disponibilidad de recursos técnicos del productor, 2) reajustar las dosis y prácticas de fertilización y manejo durante el ciclo del cultivo, basado en las características reales del suelo, planta, y clima, 3) predicción de cantidad y calidad de cosecha, 4) predicción de la fertilidad del suelo, y características del suelo asociadas a la capacidad de suministro y accesibilidad de nutrimentos al cultivo, en diferentes escenarios de suelo, y clima, y condiciones de manejo y sistemas de producción, 5) predicción y evaluación del ciclaje de nutrimentos en los diferentes componentes del sistema suelo-agua-planta-atmósfera.

Además, el **SIEMFRF** podría ser útil para la enseñanza, a diferentes niveles desde agricultores hasta investigadores, de los aspectos relacionados con la evaluación y manejo de la fertilidad del suelo, y el manejo de la fertilización para una agricultura sustentable. Más aun, el proceso de desarrollo de un sistema como el **SIEMFRF**, permitirá 1) la determinación de vacíos de información necesaria que pueden constituirse en líneas de investigación, y 2) garantizaría la integración del conocimiento generado en las investigaciones, debido a que aún desde el inicio de esas investigaciones se visualizaría los puntos de enlace y procesos que

permiten la interacción entre los factores dentro de cada componente (ejemplo la relación entre dinámica del N y agua en el suelo) y entre los componentes (ejemplo relación entre crecimiento potencial diario de raíces de un cultivo, y características del suelo que afectan el mismo).

La implementación de un sistema integral como el sugerido requiere, además del desarrollo de cada uno de los componentes individuales (ejemplo modelos de simulación, índices integrales de sustentabilidad, información específica de las características bio-físicas de las unidades homogéneas, entre otros), el desarrollo de un módulo que permita la integración interactiva de los diferentes componentes. Mediante este modulo se podrá, entre otros aspectos, originar y ajustar recomendaciones de fertilizantes, predecir calidad y cantidad de cosechas, para las condiciones específicas de suelo, clima y manejo, así como evaluar interactivamente el efecto de diferentes escenarios de clima y manejo en el desempeño de los sistemas de producción, y la sustentabilidad de los sistemas de producción en las diferentes condiciones de suelo, clima, y condiciones de manejo. La plataforma o programa de programación debe permitir la evaluación interactiva entre componentes, y el almacenaje y procesamiento de información en base diaria.

## BIBLIOGRAFÍA

BUOL, S. W. and C. W. SMITH. 1988. Data collection and presentation for improving interpretations for agriculture. **In:** Proceedings of the International interactive workshop on soil resources: Their Inventory, analysis and interpretation for use in the 1990's. March 22-24, 1988. Sheraton Airport Inn. Minneapolis, Minnesota. Educational development System, Minnesota Extension Service, University of Minnesota. St. Paul, Minnesota.

CARTER, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94:38-47.

COMERMA, J., S. TORRES, D. LOBO, N. FERNÁNDEZ, R. DELGADO y L. MADERO. 1992. Aplicación del sistema de evaluación de tierras de la F.A.O. 1985 en la zona de Turén, Venezuela. Cuadernos de Agronomía Nº 1. Instituto de Edafología. FAGRO, UCV.

COSTA, C., L. M. DWYER, X. ZHOU, P. DUTILLEUL, C. HAMEL, L. M. REID and D. L. SMITH. 2002. Root morphology of contrasting maize genotypes. *Agron. J.* 94:96-101.

COUGHENOUR, M. 1991. A GIS/RS based modeling approach for a pastoral ecosystem in Kenya. **In:** Second international symposium on Advanced technology in natural resources management. Proc. American Society for Photogrammetry and remote sensing. Bethesda, MD., WI. USA.

CRASWELL, E. T. and D. C. GODWIN. 1984. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals in different climates. *Adv. Plant Nutrition.* 1:1-55.

DELGADO, R. 2003. Soil-plant dynamics related to N uptake and soil N availability. Ph.D. diss. Fort Collins, Colorado. Colorado State University.

DELGADO, R. y E. CABRERA de BISBAL. 2005. Un sistema integral de enseñanza, evaluación, y transferencia de tecnologías para una agricultura sustentable en Venezuela. *Agronomía Trop. (Trabajo especial).* 55(2):163-181.

DELGADO, R., R. RAMÍREZ y S. URQUIAGA. 2001. Colocación del nitrógeno en el suelo y la eficiencia de uso por el maíz. *Agronomía Trop.* 51 (3):337-350.

DELGADO, R. y M. C. NÚÑEZ U. 2004. La modelización interactiva en la evaluación de sustentabilidad de sistemas de producción y prácticas de manejo, y en la transferencia de tecnología. *CENIAP Hoy. Revista Digital CENIAPHOY # 6*, septiembre-diciembre 2004. Maracay, Aragua, Venezuela. URL: [www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n6/art/delgado\\_r/arti/delgado\\_r.htm](http://www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n6/art/delgado_r/arti/delgado_r.htm).

DORAN, J. W., D. G. FRASER, M. N. CULIK and W. C. LIEBHARDT. 1987. Influence of alternative and conventional agricultural management on soil microbial processes and nitrogen availability. *American Journal of alternative agriculture.* 2:99-106.

EGHBALL, B. and J. W. MARANVILLE. 1993. Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and nitrogen stresses. *Agron. J.* 85:147-152.

ESPINOZA, Y. y R. GUTIÉRREZ. 2003. Caracterización agronómica de accesiones de Azolla de Venezuela. Rev. Fac. Agron. (LUZ). 23(3): En prensa.

FOSTER, T. H. 1992. Fostering awareness and facilitating change: Toward increased sustainability. Resource Material for the Training program on Plant Nutrient Management for Sustainable Agriculture. Sep. 14-25, 1992. IFDC, Muscle Shoals, Alabama. USA.

GARCÍA, F., R. M. Cruse and A. M. Blackmer. 1988. Compaction and nitrogen placement effects on root growth, water depletion, and nitrogen uptake. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:792-798.

GONZÁLEZ, R., F. BLANCO y S. CABRERA. 1977. Efectos de N P y K en maizales del Edo. Portuguesa. II. Sur de Ospino. Agronomía Trop. 27:25-34.

GONZÁLEZ, R. y VONASEK. 1974. Fertilización con N, P, K en campos de maíz del valle medio del Río Yaracuy. 24:365-390.

HALITLIGIL, M. B., A. AKIN and N. BILGIN. 2000. Effect of nitrogen fertilization on yield and nitrogen and water use efficiencies of winter wheat (durum and bread) varieties grown under conditions found in Central Anatolia. Biol. Fertil. Soils. 31:175-182.

HORNICK, S. B. 1992. Factors affecting the nutritional quality of crops. Am. J. Alternative Agric. 7:63-68.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGRÍCOLAS (INIA). 2004. Manual de alternativas de recomendación de fertilizantes para cultivos prioritarios en Venezuela. INIA. p. 248.

LI, Y. and S. A. BARBER. 1991. Calculating changes of legume rhizosphere soil pH and soil solution phosphorus from uptake. Commun. Soil. Sci. Plant anal. 22(9-10):955-973.

MA, B. L. and L. M. DWYER. 1998. Nitrogen uptake and use of two contrasting maize hybrids differing in leaf senescence. Plant and soil. 199:283-291.

MARTENS, D. A. 2001. Nitrogen cycling under different soil management systems. Adv. in Agron. 70:143-192.



- MATSON, P. A., R. NAYLOR and I. ORTIZ-MONASTERIO. 1998. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. *Science*. 280:112-115.
- MATSON, P. A., W. J. PARTON, A. G. POWER and M. J. SWIFT. 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*. 277:504-509.
- McMICHAEL, A. J. 2005. Integrating nutrition with ecology: balancing the health of humans and biosphere. *Public Health Nutrition*. 8(6A):706-715.
- METHERELL, A. K., L. A. HARDING, C. V. COLE and W. J. PARTON. 1993. CENTURY soil organic matter model environment. Technical documentation agroecosystem Version 4.0. Great Plains. System Research Unit Technical report # 4. USDA-ARS, Fort Collins, CO.
- MILLER, D. E. 1986. Root systems in relation to stress tolerance. *HortScience*. 21:963-970.
- MOLINA, J. A. and P. SMITH. 1998. Modeling carbon and nitrogen processes in soils. *Adv. Agron.* 62:253-298.
- MORSE, S., N. MCNAMARA, M. ACHOLO and B. OKWOLI. 2001. Sustainability indicators: The problem of integration. *Sustainable Development*. 9:1-15.
- MOSIER, A. R., J. W. DORAN and J. R. FRENEY. 2002. Managing soil denitrification. *Journal of soil and water conservation*. 57:505-513.
- OVALLES, F. y J. C. REY. 1995. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del lago de Valencia. *Agronomía Trop.* 44(1):41-65.
- PARTON, W. J., M. HARTMAN, D. OJIMA and D. SCHIMEL. 1998. DAYCENT and its land surface sub model: description and testing. *Global and planetary Change*. 19:35-48.
- PAUL, E. A. and F. E. CLARK. 1996. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press. Inc. San Diego, Ca. USA. 340 p.

PAUSTIAN, K., W. J. PARTON and J. PERSSON. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long term plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:476-488.

PÉREZ, M. J. y T. J. SMYTH. 2005. Comparación del efecto de dos especies forrajeras sobre el pH de la rizosfera y la disolución de rocas fosfóricas de diferente reactividad. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 22:143-156.

REYES, I. 1991. Cuantificación de microorganismos solubilizadores de fosfatos en suelos del yacimiento de roca fosfórica de Monte Fresco. *Rev. Fac. Agron.* 17:373-379.

SALAS, A. 2001. Phosphorus cycling during decomposition of plant residues in weathered soils from the tropics: Influence of plant factors. Ph.D. Diss. Colorado State University, Fort Collins, CO. USA.

SEXSTONE, A. J., T. B. PARKIN and J. M. TIEDJE. 1985. Temporal response of soil denitrification rates to rainfall and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:99-103.

SIX J., E. T. ELLIOTT and K. PAUSTIAN. 2000. Soil microaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil. Sci. Biol. Biochem.* 32:2 099-2 103.

SIX J., E. T. ELLIOTT, K. PAUSTIAN and J. W. DORAN. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1367-1377.

SMITH, K. A. 2003. Soil-Atmosphere Interactions. **In:** D.K. Benbi, and R. Nieder (de.) *Handbook of processes and modeling in the Soil-Plant System*. Food Products Press. N.Y. USA. p. 311-341.

TISDALL, J. M. and J. M. OADES. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. of Soil Science*. 33:141-163.

THORNTON, 1992. Application of computer modeling to evaluate sustainability. Resource Material for the Training program on Plant Nutrient Management for Sustainable Agriculture. Sep. 14-25, 1992. IFDC, Muscle Shoals, Alabama. USA.

TSAI, C. Y., D. M. HUBER, H. L. WARREN and A. LYZNIK. 1991. Nitrogen uptake and redistribution during maturation of maize hybrids. J. Sci. Food Agric. 57:175-187.

VALLIS, I., W. J. PARTON, B. A. KEATING and A. W. WOOD. 1996. Simulation of the effects of trash and N fertilizer management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. Soil and Tillage Research. 38:115-132.

VAN VEEN, J. A., J. N. LADD and M. AMATO. 1985. Turnover of carbon and nitrogen through the microbial biomass in a sandy loam and clay soil incubated with  $[^{15}\text{N}](\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  under different moisture regimes. Soil Biol. Biochem. 17:747-756.

XU, J. G. and N. G. JUMA. 1993. Above- and below-ground transformation of photosynthetically fixed carbon by two barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in a typical Cryoboroll. Soil Biol. Biochem. 25:1 263-1 272.