

RESUMEN

La degradación de los recursos suelo y agua y la contaminación ambiental se perciben como problemas graves en los trópicos. Se dice que vastas áreas de tierra se encuentran degradadas, algunas de ellas irreversiblemente, por un amplio rango de procesos tales como: desertificación y erosión acelerada, compactación y acidificación acentuada, disminución del contenido de materia orgánica y de la biodiversidad y reducción, por abuso, de la fertilidad del suelo. Se estima que el suelo degradado en los trópicos, por diferentes factores, es de 915 millones de hectáreas por erosión hídrica, 417 millones de hectáreas por erosión eólica, 50 millones de hectáreas por degradación física y 213 millones de hectáreas por degradación química.

La degradación ambiental y del suelo, la baja productividad y la agricultura de bajos insumos basada en los recursos del suelo, van de la mano. Tanto la degradación ambiental como la de suelos se perpetúan por el mal uso de la tierra y la explotación hecha por sistemas de agricultura de subsistencia (sistemas extractores de la fertilidad).

Los agricultores de escasos recursos del trópico se encuentran atrapados por el ciclo degradación-baja productividad-pobreza-bajos o ningún insumo-más degradación.

El concepto de sostenibilidad es de gran relevancia y utilidad pero necesita volverse cuantitativo, objetivo y confiable. Es necesario desarrollar criterios y métodos que permitan medir cuantitativamente el uso sostenible de los recursos suelo y agua. Para hacer esto es preciso: i) Identificar indicadores de sostenibilidad del suelo y agua; ii) Establecer relaciones cuantitativas entre indicadores de suelo y agua y procesos de degradación modificadora del suelo por una parte y por la otra entre los indicadores y productividad; iii) Definir los límites críticos de los indicadores de suelo y agua en relación con el valor del umbral después del cual la productividad declina de una manera rápida y severa y los recursos suelo y agua están tan degradados que es imposible recuperarlos; iv) Establecer índices de sostenibilidad y calidad del suelo y v) Desarrollar métodos estandarizados para determinar indicadores de suelo y agua.

La degradación de la calidad del suelo y agua y el uso sostenible de estos recursos debe expresarse en términos de un impacto sobre la productividad y la calidad del medio ambiente. La productividad está relacionada con el uso de la tierra y la gerencia del sistema. La productividad agrícola debe medirse en relación con factores claves, tales como: profundidad del suelo superficial, textura, estructura, disponibilidad de agua y contenido de nutrientes, pH,

contenido de carbón orgánico del suelo, CEC y niveles tóxicos de algunos elementos. La pérdida de productividad es permanente e irreversible solamente cuando no puede ser recuperada por usos alternativos de la tierra y/o insumos basados en desarrollos científicos.

Para la medición del uso sostenible de los recursos suelo y agua, existe una secuencia de pasos y lista de chequeo que debe seguirse. El primer paso es la definición de los objetivos de la medición de la sostenibilidad. El paso siguiente es conducir un detallado diagnóstico del recurso, para evaluar potencialidades y restricciones del recurso disponible, e identificar los procesos predominantes de degradación del suelo. La evaluación de cambios en los indicadores del suelo y en productividad debido a procesos modificantes del suelo es el paso siguiente. Si la productividad declina o cambia el indicador del suelo de una manera drástica y severa, el paso a seguir es el cambio en el uso de la tierra y en el manejo o gerencia del sistema y seguir de nuevo el proceso anterior.

La ciencia de la cuantificación de la sostenibilidad y el desarrollo de índices de calidad del suelo y productividad son recientes y se encuentran en estados de desarrollo informativo. En consecuencia existen numerosos tópicos de investigación altamente prioritarios, que deben establecerse, en suelos de fácil extrapolación ubicados en las principales regiones del trópico, de experimentos ecológicos con características de interdisciplinariedad, multi-institucionales y de largo plazo. Se requiere investigar en varios aspectos importantes como:

- Desarrollo y estandarización de procedimientos analíticos que permitan, *in situ*, la determinación de los indicadores físicos e hidrológicos del suelo.
- Identificación de técnicas que permitan establecer la relación causa-efecto, entre indicadores del suelo y procesos de degradación por una parte y por la otra la relación entre los indicadores del suelo y la productividad.
- El desarrollo de índices de sostenibilidad, resistencia del suelo al deterioro y calidad del suelo en relación con su impacto sobre la producción y el medio ambiente.
- El desarrollo de modelos apropiados de predicción.

Es igualmente importante involucrar a los productores, profesionales, técnicos y tecnólogos, en el proceso de investigación y desarrollo de aspectos relacionados con el uso sostenible de los recursos suelo y agua. Los productores innovativos pueden ser una fuente valiosa de información y socios excepcionales por su interés tanto empresarial como personal. La participación del productor es posible y muy útil en la selección de: i) Indicadores prácticos de los procesos prevalentes de degradación que están afectando los recursos suelo y agua y la productividad y ii) uso de sistemas de producción alternativos que permitan la recuperación de los recursos agua y suelo y la aplicación de insumos que detengan y revertan el proceso de degradación.

La aplicación de la metodología y guías sugeridas en el presente documento pueden ayudar a mejorar la base de datos y a contar con una medición confiable y objetiva de la extensión y la severidad de la degradación del suelo en relación con su efecto sobre la productividad, la sostenibilidad y la calidad del medio ambiente.

I. INTRODUCCIÓN

Los recursos suelo y agua del trópico se encuentran presionados y propensos a la degradación debido a un medio ambiente agresivo, suelos frágiles ubicados en ecorregiones ecológicamente sensibles, alta presión demográfica, diferentes demandas sobre sus recursos limitantes, productores de escasos recursos y un soporte institucional limitado o ausente. Por ello existe una creciente preocupación por la sostenibilidad de los recursos suelo y agua en términos de satisfacer las necesidades presentes e incrementar la productividad y en términos de la capacidad de resistencia y existencia de estos recursos para demandas futuras.

Debe evaluarse cuidadosamente la importancia relativa de las demandas actuales versus los requerimientos futuros, ya que las demandas sobre estos limitados y no renovables recursos, están creciendo muy rápidamente. La tierra arable per cápita en algunas regiones tropicales (Asia) es baja y desciende rápidamente. La tierra arable per cápita, es 0.29 ha en Latinoamérica, 0.27 ha en el cercano oriente, 0.25 ha en Africa, 0.13 ha en el lejano oriente y sólo 0.06 ha en varios países desarrollados. En estas regiones, la mayoría de la tierra potencialmente disponible es marginal, inaccesible, o se encuentra en ecorregiones ecológicamente muy sensibles, tales como el bosque húmedo tropical, laderas con pendientes del 100% o más, o en regiones muy susceptibles a la desertificación.

A pesar del interés y el entusiasmo de investigadores y definidores de políticas, la degradación del suelo y la sostenibilidad son conceptos que permanecen vagos, cualitativos y llenos de una retórica emocional. La estandarización de estos conceptos y el desarrollo de formas cuantitativas para su valoración son esenciales para transformar emociones y mitos en hechos científicos.

La degradación del suelo, la disminución de la productividad del suelo y su capacidad regulatoria del medio ambiente, debido al mal uso y a un errado manejo, deben ser cuantificadas midiendo los cambios en las propiedades o procesos del suelo inducidos por el manejo que se le ha dado y midiendo el impacto causado en su productividad actual y potencial y en su capacidad regulatoria del medio ambiente. El establecimiento, por una parte, de la relación causa-efecto entre las propiedades y los procesos del suelo y por la otra entre la productividad de cultivos y las funciones reguladoras del medio ambiente, son cruciales para la recuperación de tierras degradadas y el mejoramiento de la calidad del medio ambiente. El hacer esto significa desarrollar guías y métodos para la medición de la sostenibilidad.

II. METAS Y PRINCIPIOS DE LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD

Algunas causas del no progreso en el logro de metas de sostenibilidad en la producción agropecuaria y en la calidad del medio ambiente, son la ausencia de focalización, el establecimiento de múltiples y mutuamente excluyentes objetivos, un rango espacial muy amplio, escalas temporales de medición y un criterio de medición de la sostenibilidad ausente de estandarización. Los objetivos agronómicos tendientes a lograr altas producciones deben estar en concordancia con estándares elevados de la calidad del medio ambiente. El lograr alta productividad y mantener o mejorar el medio ambiente no son necesariamente excluyentes ni tampoco difíciles de lograr. La meta de una agricultura sostenible es el mantener una productividad no negativa per cápita, preferiblemente en crecimiento, manteniendo y mejorando, al mismo tiempo, la capacidad de los suelos para producir bienes económicos y servicios y regular el medio ambiente.

La meta de la medición de la sostenibilidad es concomitante con la cuantificación del impacto del manejo del suelo sobre las propiedades y procesos del suelo relevantes para la productividad agropecuaria y la calidad del medio ambiente. Esto significa que el uso de la tierra y el sistema de manejo del suelo son una medida de la capacidad de la tierra y se basan en el conocimiento previo de un detallado inventario de los recursos naturales, tales como clima, vegetación, hidrología, relieve y suelo.

Las principales metas de la medición del uso sostenible de los recursos suelo y agua son:

- Conservar y mejorar los recursos naturales para que sean utilizados por un tiempo muy largo.
- Caracterizar y cuantificar los principales procesos de degradación.
- Identificar la durabilidad y las características restaurativas de los recursos suelo y agua.
- Identificar las alternativas de manejo compatibles con las limitaciones y el potencial de los recursos.
- Evaluar la magnitud y las tendencias en los cambios en las propiedades y procesos de los recursos suelo y agua, bajo diferentes sistemas de manejo.

- Describir alternativas de política que estimulen el uso sostenible de los recursos.

La cuantificación de la sostenibilidad implica medición precisa de la productividad, la cual comprende la totalidad de los costos y beneficios, incluyendo los costos indirectos como: el costo del nitrógeno de crecimiento, obtenido a través de la fijación biológica versus el nitrógeno conseguido en la forma de fertilizantes inorgánicos o correctivos orgánicos; pérdida en productividad debida a la erosión producida por el arado versus el costo de los herbicidas para controlar malezas; el costo de un administrador capacitado versus la compra de insumos externamente, etc. Estos costos y beneficios pueden ser cuantificados por medio de índices basados en parámetros que involucran la planta, el suelo, el clima y la hidrología.

Índices de sostenibilidad

La cuantificación de la sostenibilidad es esencial para valorar objetivamente el impacto de los sistemas de manejo sobre la productividad actual y potencial y sobre el medio ambiente. La sostenibilidad puede ser valorada por uno o varios índices. Los índices pueden ser simples o complejos si involucran uno o varios parámetros. Aunque los principios generales pueden ser los mismos, estos índices deben ser adaptados y sincronizados bajo las condiciones ambientales locales. Algunos índices de sostenibilidad incluyen lo siguiente:

1. **Productividad (P):** La producción por unidad de recurso utilizado puede ser valorada por

$$P = p/R \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde **P** es productividad, **p** es producción total y **R** es el recurso usado.

2. **Factor de Productividad Total (TPF):** Se define como la productividad por unidad del costo de todos los factores involucrados (Herd, 1993) según la Ecuación 2:

$$TPF = \frac{p}{\sum_{i=1}^n (R_i \times C_i)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde **p** es la producción total, **R** es el recurso utilizado, **C** es el costo del recurso y **n** es el número de recursos utilizados para obtener la producción total.

3. **Coeficiente de sostenibilidad (Cs):** Es la medida del cambio en las propiedades del suelo en relación con la producción lograda bajo un sistema específico de manejo (Lal, 1991) como se define en la Ecuación 3:

$$Cs = f(O_i, O_d, O_m)^t \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde **Cs** es el coeficiente de sostenibilidad, **Oi** es lo producido por unidad de insumo que maximiza la productividad per cápita o ingreso neto, **Od** es el producto por cada unidad que se reduce del más limitante de los recursos no renovables, **Om** es el mínimo producto a lograr y **t** es el tiempo. La escala de tiempo es importante y debe ser cuidadosamente seleccionada.

4. Índice de Sostenibilidad (Is): Es una medida de sostenibilidad que relaciona la productividad con el cambio en las características del suelo y del medio ambiente (Lal, 1993; Lal y Miller, 1993) como se muestra en la Ecuación 4:

$$Is = f(Pi*Si*Wi*Ci)t \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde **Is** es el índice de sostenibilidad, **Si** es la alteración en las propiedades del suelo, **Wi** es el cambio en el recurso agua y en su calidad, **Ci** es la modificación en el factor climático y **t** es el tiempo.

5. Sostenibilidad Agrícola (As): Este es un índice basado en un amplio número de parámetros asociados con la producción agropecuaria y se define en la Ecuación 5 (Lal, 1993):

$$As = d(Pt*Sp*Wt*Ct)dt \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde **As** es la sostenibilidad agropecuaria, **Pt** es la productividad por unidad del recurso no renovable o más limitado, **Sp** es la propiedad más crítica del suelo, como profundidad radical, contenido de materia orgánica en el suelo, **Wt** es la capacidad disponible de agua incluyendo la calidad de ésta, y **Ct** es el factor climático, como el flujo gaseoso producto de la actividad agropecuaria y **t** es el tiempo.

6. Coeficiente de sustentabilidad (Sc): Este es un índice complejo y multipropósito basado en un amplio rango de parámetros y es similar a As. Se define según las Ecuaciones 6 y 7.

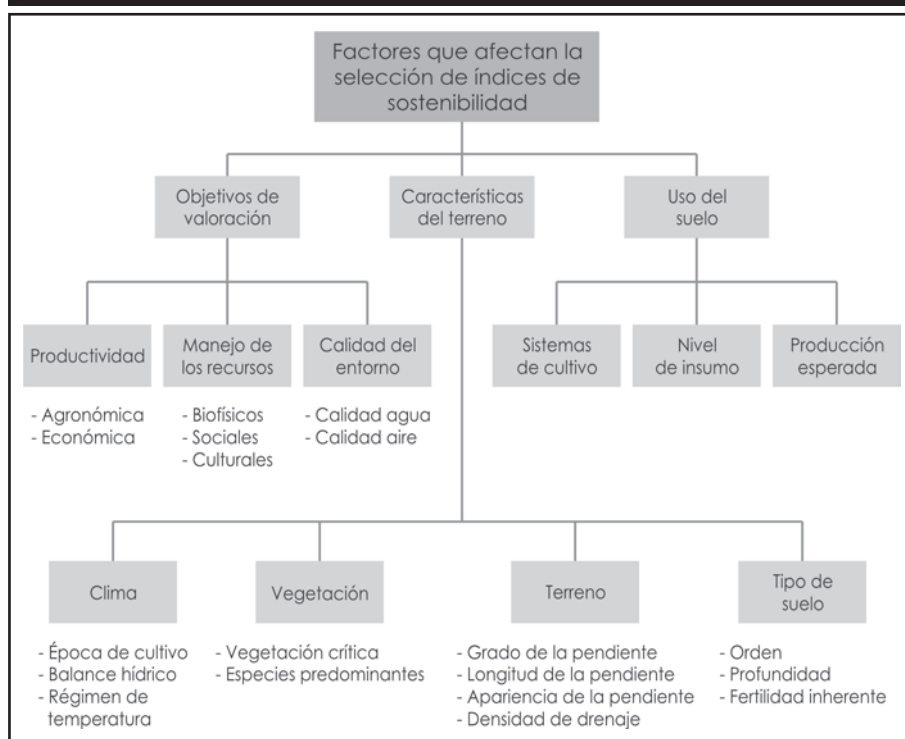
$$Sc = f(Pt*Pd*Pm)t \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$Sc = d(Pi*Wt*Ct)dt \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde **Pt** es la productividad por unidad del recurso limitante, **Pd** es la productividad por unidad disminuida de la propiedad del suelo y **Pm** es la productividad mínima asegurada, **Wt** es el régimen y calidad del agua del suelo, **Ct** es el factor climático y **t** es tiempo.

La elección de un índice apropiado depende de varios factores entre los cuales los más importantes son los objetivos y las metas a saber, producción, manejo del recurso o calidad del medio ambiente, (Figura 1). Adicionalmente las características y el uso de la tierra son importantes de tener en cuenta. En general un índice basado en uno o dos parámetros es mucho más relevante que uno basado en varios o que en un índice complejo.

Figura 1. Factores que afectan la selección del índice de sostenibilidad



La selección de los parámetros a ser usados en estos índices es también específica de la localidad y depende de las características inherentes al suelo. El parámetro deseable es aquel cuyo uso va a ser optimizado o aquel que represente mejor al recurso crítico o limitante. Los parámetros del suelo que merecen ser considerados son: profundidad, estructura, contenido de materia orgánica, capacidad de agua disponible para la planta, pH, concentración de sales, etc. En el índice de sostenibilidad debe incluirse el parámetro más limitante o el más crítico.

Producción y productividad per cápita son opciones importantes en relación con la creciente demanda por alimentos para humanos y animales, combustible y otras necesidades básicas en los trópicos.

III. ESCALAS DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD

Los problemas conceptuales en la valoración de la sostenibilidad pueden solucionarse, relacionando la información con una escala apropiada. La información no tiene ninguna trascendencia si no está relacionada con una escala de valoración. La valoración de la sostenibilidad puede hacerse utilizando escalas diferentes relacionadas con el sistema, espacio o tiempo.

A. Escala temporal

Hay diversas escalas temporales de valoración de la sostenibilidad. La selección de una escala apropiada de tiempo depende de los objetivos. El valor económico de la sostenibilidad es calculado generalmente en un corto plazo a partir de la base de una a varias épocas de cultivo. En contraste, la valoración de los aspectos sociales y biofísicos de la sostenibilidad es mejor hacerlos sobre la base de un largo plazo que comprenda varias generaciones que abarcan de varias décadas a siglos. En general la valoración de la sostenibilidad de los recursos biofísicos se hace al final de varias décadas. De manera similar, en los aspectos ambientales la sostenibilidad se evalúa con base en el largo plazo porque es difícil evaluar consecuencias para el medio ambiente en el corto plazo. Los estudios ecológicos se deben conducir siempre de acuerdo con el largo plazo (varias décadas) para producir resultados tangibles que proporcionen las guías de consulta para el manejo de los recursos.

Tales estudios requieren planeación cuidadosa y diseño flexible para acomodarse a los cambios futuros en tratamiento o sistemas de manejo. Escalas de tiempo para diversos aspectos del costo de la sostenibilidad se enumeran en la Tabla 1 y se deben elegir cuidadosamente las metas y los objetivos específicos.

Tabla 1. Escala de tiempo para la evaluación de diferentes aspectos de solubilidad

Aspecto	Escala de tiempo
1. Evaluación económica y de beneficios	Uno a varios años
2. Tendencias de producción	Cinco a veinte años
3. Propiedades del suelo	Una a varias décadas
4. Características hidrológicas	Una a varias décadas
5. Parámetros ecológicos	Varias décadas a siglos
6. Aspectos sociales y culturales	Pocas a varias generaciones

B. Sistemas de escalas

Los sistemas de escalas para evaluar la sostenibilidad se listan en la Tabla 2. La biodiversidad genética es evaluada a nivel de gene, la producción a nivel de sistema de cosecha, los beneficios a nivel de sistema de cultivo, la calidad del agua y recursos de agua subterránea a nivel de vertiente o acuífero, cambios en el balance hídrico o en el meso y macro clima al nivel de ecorregión o bioma, el producto nacional bruto y la productividad por cápita a nivel nacional y el cambio climático a nivel global. La opción de la escala apropiada depende, de nuevo, de los objetivos.

Tabla 2. Sistemas de escalas para la evaluación de la sostenibilidad

Aspecto	Sistema de Escala
Biodiversidad	Gen
Fotosíntesis	Planta
Rendimiento	Cultivo
Producción	Sistema de cosecha
Beneficios	Sistema de cultivo
Calidad de agua y recursos de agua subterránea	Unidad de paisaje o cuenca
Balance hídrico y microclima	Ecoregión o bioma
Producto nacional bruto, productividad per cápita	Unidad política o nacional
Cambios climáticos a grande y mediana escala	Regional
Concentración de gases atmosféricos, temperatura oceánica, etc.	Global

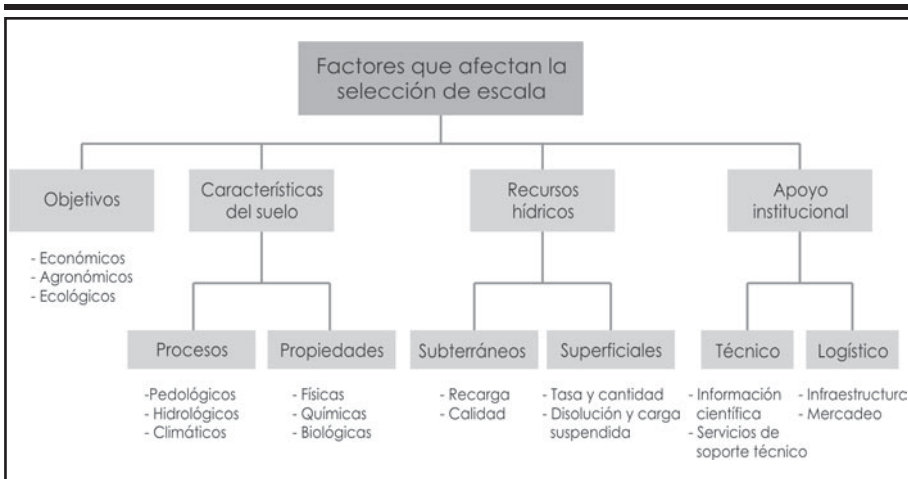
La valoración de los cambios inducidos por el manejo en la sostenibilidad de los recursos agua - suelo requiere cuidadosa consideración para elegir el sistema de escala y temporal apropiado (Tabla 3). Estas escalas varían dependiendo del parámetro a ser caracterizado y el objetivo de la valoración de sostenibilidad. Resultados significativos solo pueden ser obtenidos si la medida de los parámetros elegidos se hace en las escalas apropiadas. La frecuencia de la medida de estos parámetros es también importante, y será discutido en la sección posterior.

La evaluación del uso sostenible de los recursos suelo y agua es un propósito altamente intensivo en capital. Esto se logra en un largo período a menudo involucrando un buen proyecto establecido en campo, con laboratorios de respaldo y soporte de servicios de análisis. La selección de una escala apropiada es fundamental para lograr resultados y depende de muchos factores. La estimación cuidadosa de esos factores es importante cuando se decide la selección de los sistemas de escala y temporal (Figura 2).

Tabla 3. Sistema de escala para valorar los manejos que causan cambios en las propiedades del suelo y características hidrológicas

Propiedad / Proceso	Escala Temporal (años)	Sistema de Escala
Procesos del suelo		
Erosión	5 - 20 años	Cuenca, ladera
Compactación	Uno a varios años	Parcela, finca
Acidificación	Uno a varios años	Asociación de suelos
Pérdida de fertilidad	5 - 20 años	Asociación de suelos, finca
Propiedades del suelo		
Propiedades físicas	Uno a varios años	Asociación de suelos, finca
Propiedades químicas	Uno a varios años	Asociación de suelos, finca
Propiedades nutricionales	Uno a varios años	Asociación de suelos, finca
Régimen de agua		
Balance hídrico	Al menos varios años	Unidad de paisaje, cuenca
Capacidad de retención	Al menos varios años	Asociación de suelos, finca
Calidad de agua	5 - 20 años	Cuenca, acuífero, finca
Microclima		
Energía supuesta	10 - 50 años	Parcela de campo
Temperatura de suelo y aire	Al menos varios años	Parcela de campo
Precipitación efectiva y probable	Al menos varias décadas	Paisaje

Figura 2. Factores que afectan la selección de las escalas espaciales y temporales de valoración de sostenibilidad



C. Escala espacial

Los indicadores de sostenibilidad pueden también ser evaluados en diferentes escalas espaciales (Tabla 4). Sin embargo no todos los indicadores de sostenibilidad pueden ser evaluados en todas las escalas. Walker y Jones (1991) propusieron una estructura jerárquica reconociendo cuatro filas e identificando metas e indicadores específicos para cada una. La estructura de cuatro filas propuesta por Walker y Jones incluye: (i) Caracterización del paisaje en la fila 1, (ii) tendencia nacional y regional en la fila 2, (iii) resolución espacial o temporal mas alta en la fila 3, y (iv) procesos de investigación en la fila 4. En consecuencia, los procesos de investigación son hechos generalmente en pequeñas parcelas con respaldo de laboratorios y facilidades analíticas. Alteraciones en las propiedades del suelo debido a sistemas de manejo de cultivo y suelo son hechas apropiadamente a escala de parcela de campo. Los objetivos y metodologías se muestran claramente definidas para cada fila y escala.

Tabla 4. Escalas espaciales de valoración de la sostenibilidad

Escala	Medida	Indicador de sostenibilidad
1. Microparcela	<10 m ²	Propiedades del suelo, evaluación orientada al proceso.
2. Parcela de campo	10 - 100 m ²	Erosión en arroyuelos, erodabilidad, respuesta del cultivo al manejo.
3. Paisaje / ladera	0.1 - 1 ha	Cambios del suelo debidos al uso o sistema de cultivo, procesos hidrológicos y fluviales, caracterización del paisaje.
4. Cuenca	1 - 100 ha	Producción de sedimento , balance de agua y energía, calidad de agua, microclima.
5. Hoya de río	Varios miles de km ²	Tasa de denudación, calidad de agua, mesoclima.

La selección de un sistema jerárquico que parte de una escala muy baja a la más alta es una opción lógica para evaluar diferentes indicadores en una escala apropiada. Los objetivos de sostenibilidad evaluados son diferentes en diversas escalas. De ahí la necesidad de sincronizar la escala y el objetivo de sostenibilidad a evaluar. Es prudente coleccionar datos en varias escalas interrelacionadas pero debe prestarse mas atención a la escala regional o local, o a indicadores de valoración orientados a procesos. Los procesos de valoración acerca de biomas o ecorregiones son fáciles de generalizar en relación con comunidades dentro de cada ecorregión.

Muchos procesos del suelo (escorrentía, erosión, compactación, lixiviación, etc.) son dependientes y por consiguiente se evalúan en diferentes sistemas de escala temporal y espacial. El impacto del manejo en la calidad

del suelo y sus procesos depende igualmente de la escala y es valorado en escalas heterogéneas. La evaluación comparativa de propiedades y procesos medidos en escalas heterogéneas requiere del desarrollo de escalas regulares y de la identificación de los límites de interpolación y extrapolación entre escalas. En algunos casos sencillamente se puede comprometer una simple integración a través de una heterogeneidad espacial. Esta situación es materia de un cuidadoso muestreo estadístico basado en métodos tradicionales (análisis multivariado, técnicas de regresión lineal, modelos jerárquicos bayesianos (King *et al.*, 1987). En otros casos complejos la extrapolación entre escalas no es simplemente materia estadística porque la magnitud y la naturaleza de los procesos comprometidos puede también cambiar de pequeña a grande escala. En estos casos, aún pequeños cambios de escala pueden cambiar drásticamente los procesos y su impacto. En consecuencia estos resultados de escalamiento envuelven complejos procedimientos (Allen and Starr, 1982; O. Neil *et al.*, 1986). El desarrollo de métodos apropiados de predicción entre escalas es una prioridad a investigar. Sin embargo independientemente del problema de escala, es esencial el uso de técnicas estadísticas apropiadas en el análisis, síntesis e interpretación de datos. Métodos estadísticos apropiados se pueden consultar en diversas obras ej: Montgomery (1985), Ryan (1989), Gilliland (1990).

IV. CRITERIOS O INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DEL SUELO

La selección de criterios o indicadores para valorar sostenibilidad debe tener un trabajo de ajuste conceptual. Hay un amplio rango de indicadores que pueden usarse para valorar sostenibilidad, en el uso de los recursos agua y suelo. Walker y Jones agrupan varios criterios e indicadores en tres amplias categorías:

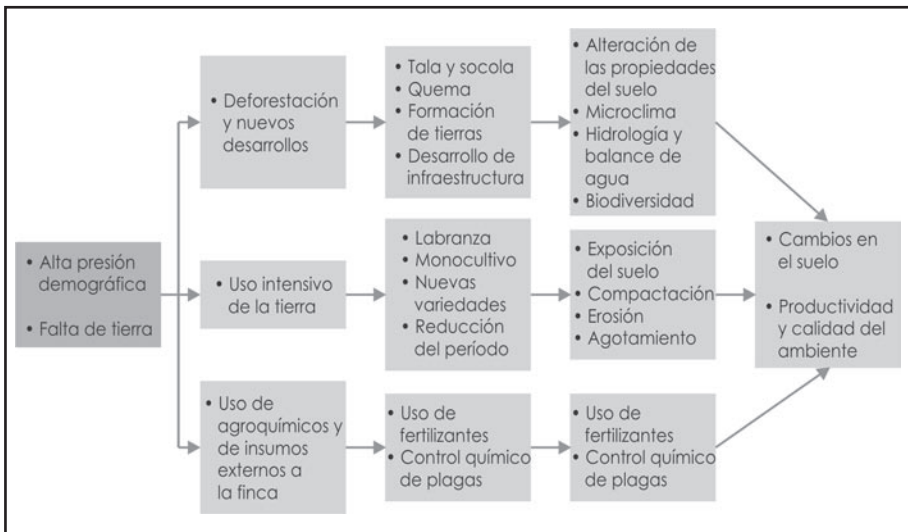
1. **Indicadores de respuesta.** Son características ambientales que indican de la condición biológica del recurso suelo y su productividad.
2. **Indicadores sensores.** Son una medida de los procesos naturales, riesgos ambientales o efectos de manejo.
3. **Indicadores de exposición o hábitat.** Son indicadores de diagnóstico que miden la respuesta de indicadores en contacto con el estrés ambiental.

La sostenibilidad del suelo puede ser valorada por medio de evaluaciones periódicas de indicadores relacionados con las propiedades y procesos del suelo. Un indicador apropiado es el que provee una medida cuantitativa de la magnitud e intensidad de la presión ambiental experimentada por plantas y animales. Estos indicadores basados en propiedades y procesos pueden ser valorados por medio de análisis de campo y laboratorio o por modelos de predicción.

La sostenibilidad del suelo puede valorarse por el monitoreo de indicadores de la calidad del suelo. Los atributos de calidad del suelo que tienen que ver con valoración son esbozados y descritos en varios reportes (Anónimo 1992; USDA, 1992; Acton, 1993). Los análisis del suelo también pueden ser usados para la valoración de calidad de la tierra y el uso sustentable (FAO 1976; Bouman, 1989; Van Diepen *et al.*, 1991).

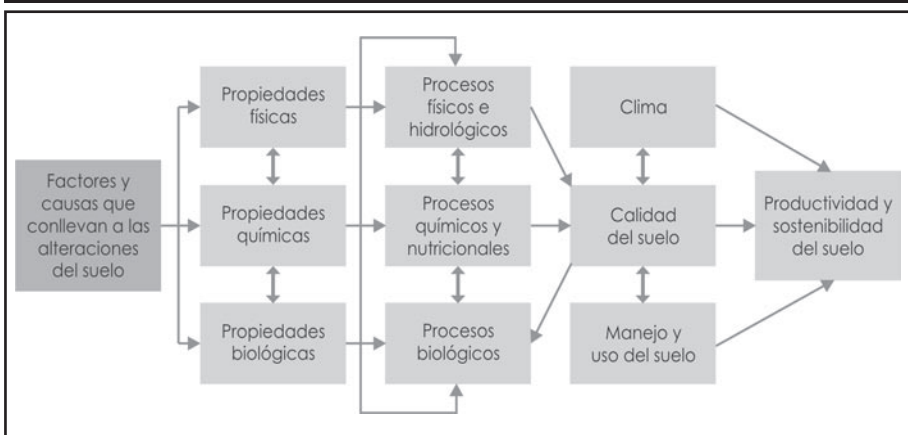
Sin embargo se debe diferenciar claramente entre las causas y factores, propiedades y procesos que afectan las cualidades del suelo y su sustentabilidad. Las causas y factores que afectan la tierra y la calidad medioambiental son influenciados por factores sociales que incluyen alta presión demográfica, falta de terrenos, las aspiraciones y necesidades sociales y culturales (Figura 3).

Figura 3. Factores y causas que determinan la calidad y sostenibilidad del suelo



Estas fuerzas sociales comprenden varias actividades causantes de alteraciones mayores en la tierra y en el desarrollo de sus características. Entre las principales actividades medioambientales están la deforestación y los nuevos desarrollos, uso intensivo de la tierra especialmente labranza y monocultivo, uso de químicos agrícolas para regular la fertilidad de la tierra y minimizar la competencia con insectos plagas y patógenos. La Figura 4 presenta una amplia gama de propiedades y procesos que direccionan la calidad de la tierra.

Figura 4. Propiedades y procesos relacionados con la calidad y sostenibilidad del suelo

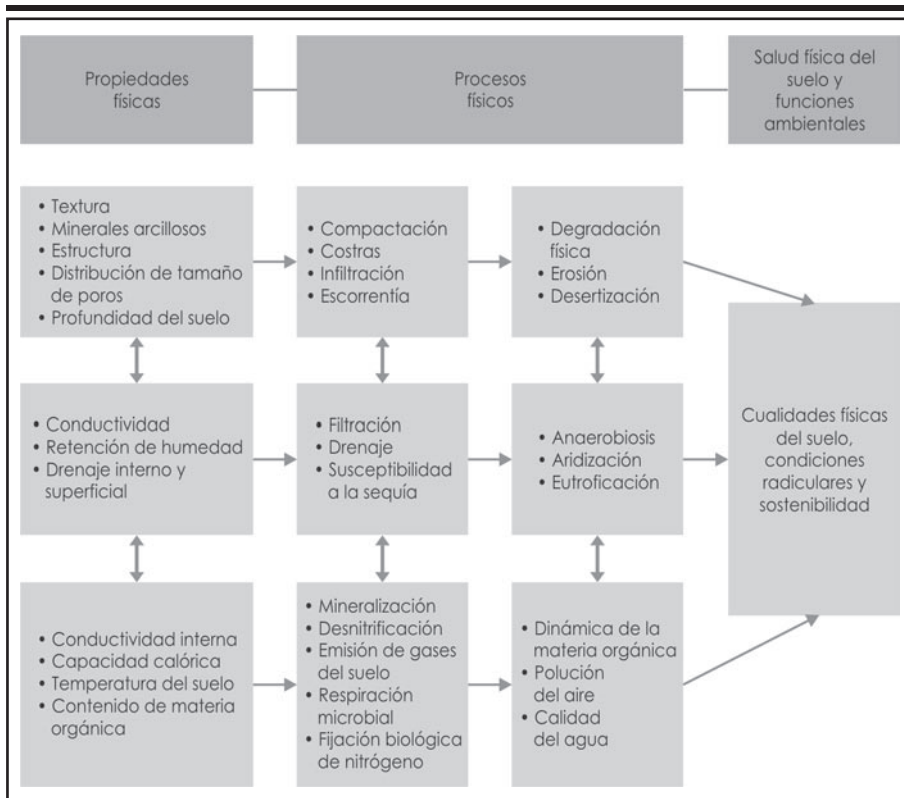


Tres de las categorías principales de propiedades y procesos son descritos a continuación:

A. Atributos y procesos físicos del suelo

Hay una gama amplia de propiedades y procesos físicos que afectan la calidad y salud de la tierra. En la Figura 5 se presentan las propiedades físicas, importantes, del suelo, agrupadas bajo 3 atributos.

Figura 5. Propiedades físicas e hidrológicas y procesos relacionados con la calidad y la sostenibilidad del suelo



1. **Características mecánicas:** Incluyen la textura, la estructura y el tamaño del poro de distribución. Estos atributos influyen varios procesos modificadores del suelo como la compactación y adensamiento, formación de costras y sellos en la superficie, infiltración del agua y escorrentía superficial. Al interactuar con las características climáticas, estos procesos pueden acentuar la degradación física que incluye erosión acelerada, desertificación y denudación.

2. **Características hidrológicas:** Comprenden retención de humedad, propiedades de transmisión y drenaje interno y superficial del suelo. Estos atributos de drenaje también influyen en varios procesos de modificación del suelo e.j., filtración, drenaje profundo, escorrentía y susceptibilidad a la desecación. Al interactuar con las características de clima y uso de la tierra estos procesos conducen a la anaerobiosis, la aridización y la eutroficación de aguas naturales.
3. **Características térmicas:** Incluyen la capacidad de calor y la conductividad térmica que interactúan con el clima y el régimen de humedad de la tierra e influyen en la temperatura del suelo y el flujo de calor. Estos atributos influyen en una amplia gama de procesos modificadores del suelo, incluidos la mineralización o descomposición de la materia orgánica, la respiración microbiana, la desnitrificación y la biodiversidad del suelo. Cuando interactúan con el uso de la tierra, el manejo y con otros factores ecológicos, estos procesos influyen en las dinámicas del contenido de materia orgánica del suelo y de los flujos de gases radiactivos procedentes de la tierra a la atmósfera.

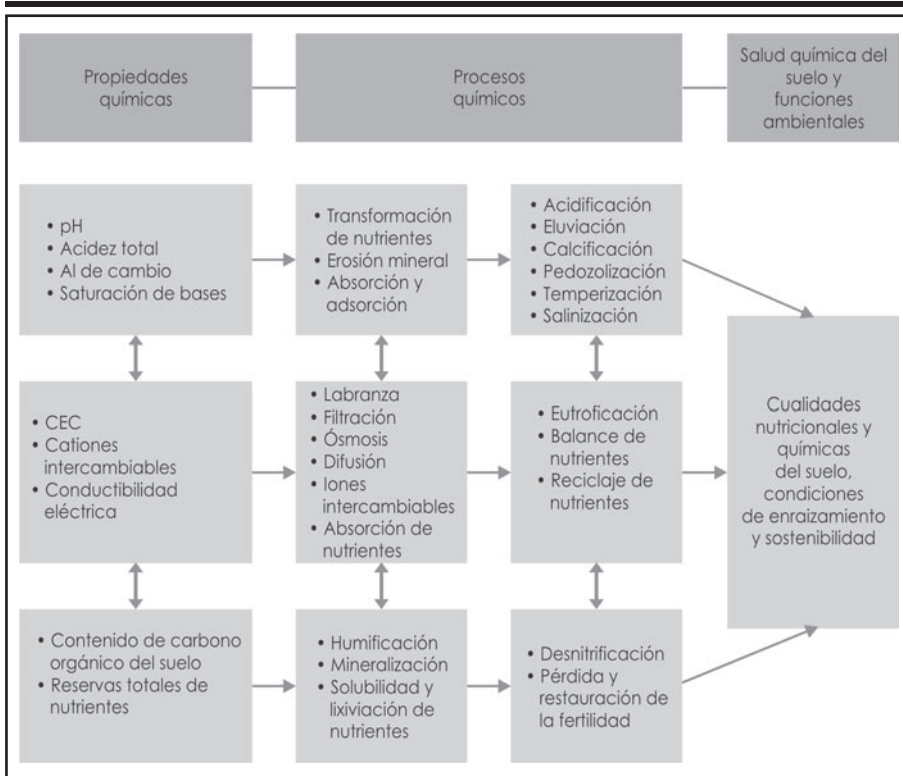
Estas tres características: mecánicas, hidrológicas y térmicas tienen un efecto fuerte, modificador de la calidad física de la tierra, las condiciones radiculares y la sostenibilidad.

B. Atributos y procesos químicos del suelo

De manera similar a las propiedades físicas e hidrológicas, existe también una amplia gama de atributos químicos y nutricionales con fuerte influencia en varios procesos modificadores del suelo. Las más importantes características químicas y nutricionales se presentan en la Figura 6, agrupadas bajo tres categorías:

1. **Acidez del suelo:** El pH del suelo, la acidez total, el aluminio intercambiable y la saturación de bases son determinantes en la reacción del suelo. Estos atributos interactúan con el clima, el material parental, el uso y manejo de la tierra e influyen en varias reacciones del suelo, entre ellas, la transformación mineral de nutrientes, desgaste atmosférico de minerales y procesos de absorción y adsorción. Las alteraciones y acentuación de estas propiedades o procesos, principalmente debidas a actividades humanas que involucran el cultivo intensivo y uso de agroquímicos, conllevan a importantes procesos modificadores del suelo como acidificación, calcificación, eluviación, podzolización, pérdida de minerales y salinización. La salinización es un proceso inverso de acidificación y filtración, importante en la modificación de los procesos del suelo en regiones áridas y semiáridas, bajo condiciones de riego.
2. **Atributos de intensidad y capacidad nutricional del suelo:** Los atributos nutritivos del suelo en términos de ambos factores, capacidad e intensidad, son afectados por propiedades como capacidad de

Figura 6. Propiedades químicas, nutricionales y procesos relacionados con la calidad y la sostenibilidad del suelo



intercambio catiónico, naturaleza y concentración de cationes extraíbles, total de sales solubles y conductividad eléctrica. Estos atributos gobiernan la dirección y magnitud de varios procesos incluyendo la infiltración, ósmosis y difusión, iones intercambiables y la absorción y adsorción de nutrientes. Al interactuar con el clima, uso y manejo de la tierra, estos atributos influyen en varios procesos que modifican la dinámica de los nutrientes incluyendo las transformaciones y ciclos de nutrientes y la eutroficación de aguas naturales.

- 3. Propiedades húmicas:** El contenido de materia orgánica del suelo y las reservas de nutrientes totales son la base inherente de la fertilidad del suelo. Las propiedades húmicas comprenden el contenido del carbono orgánico, la biomasa microbiana y la fracción activa de la materia orgánica. Estos atributos influyen en varios procesos incluyendo mineralización, la respiración microbiana, la producción del complejo organo-mineral y la difusión o flujo de gases procedentes del suelo. Cuando interactúan con el clima, el uso y manejo del suelo, influyen en procesos de dinámica de la materia orgánica, transporte de carbono en agua natural como

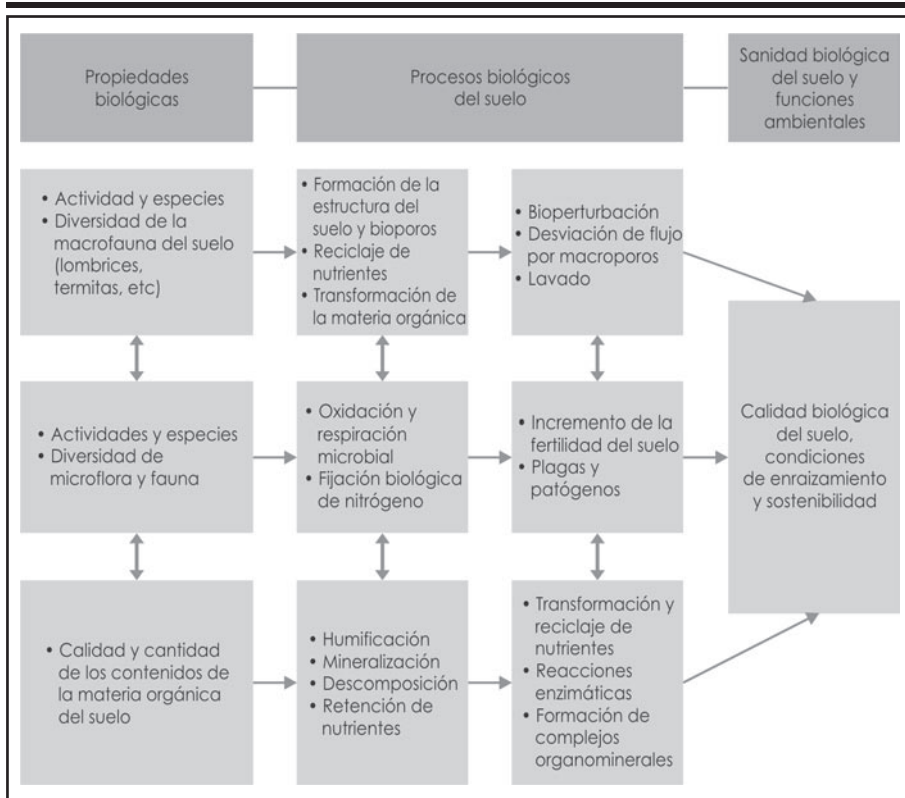
carbono orgánico disuelto (DOC) o partículas de carbono orgánico (POC), la emisión de gases activos en la atmósfera especialmente: CO₂, CH₄ y N₂O. La materia orgánica del suelo juega un papel importante en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Swift y Wooster, 1993).

Estos atributos y reacciones químicas del suelo, tienen un impacto fuerte en varios procesos modificadores del suelo con una marcada influencia en las cualidades químicas y nutricionales del suelo y su sostenibilidad bajo diferentes usos y sistemas de cultivo.

C. Biodiversidad y procesos biológicos del suelo

La diversidad de especies y la actividad de la fauna y la flora del suelo tienen una influencia importante sobre las propiedades físicas, químicas, nutricionales y biológicas del suelo modificando en forma drástica los procesos del mismo. En la Figura 7, aparece una lista de las más importantes propiedades biológicas del suelo y están agrupadas en 3 categorías.

Figura 7. Propiedades biológicas y procesos relacionados con la calidad y la sostenibilidad del suelo



1. **Macro fauna del suelo:** La macrofauna del suelo comprende lombrices, termitas, cienpiés, milpiés y otros animales. La población de lombrices y su actividad es un buen indicador de la salubridad del suelo y tiene efecto sobre la estructura, la fertilidad, el reciclaje de nutrientes y la penetración de raíces. Estos animales juegan un papel importante en la formación y evolución de la estructura del suelo y en el tamaño y distribución de poros. Los biocanales o macroporos creados por la actividad de la fauna del suelo influyen en la penetración de las raíces, la difusión gaseosa, el transporte de agua y las reacciones químicas, tanto en la superficie como dentro de los horizontes del suelo y el flujo de las aguas subterráneas. La actividad de la fauna del suelo también tiene una gran influencia en el reciclaje de nutrientes, descomposición de la materia orgánica y la biomasa y la transformación húmica. Interactuando con el clima, el uso y manejo del suelo; estas propiedades influyen en la magnitud y dirección de la bioperturbación, el lavado y flujo del agua a través de los macroporos. La desviación del flujo que ejercen los macroporos es un proceso importante que influye en la calidad del agua y en los demás procesos hidrológicos (McCoy *et al.*, 1994).
2. **Microflora:** La microflora del suelo afecta fuertemente las reacciones microbianas en el suelo, incluyendo la oxidación y la respiración microbial, la fijación biológica del nitrógeno y diferentes reacciones asimbióticas con efecto tanto positivo como negativo en las propiedades, la productividad y la sostenibilidad del suelo. La humificación y la dinámica de los contenidos de materia orgánica están directamente influenciados por la actividad y la diversidad de las especies de la microflora. Interactuando con las características físicas y químicas del suelo y su manejo, estas propiedades tienen un fuerte impacto sobre diferentes procesos modificadores del suelo, tales como el incremento y reducción de la fertilidad, la presencia de plagas y patógenos del suelo, incluidos los nemátodos.
3. **Sustancias húmicas:** La materia orgánica del suelo comprende un complejo de sustancias bioquímicas, con influencia importante sobre un amplio rango de propiedades y procesos del suelo. Los contenidos de materia orgánica incluyen diversos componentes tales como residuos de plantas y componentes identificables (basura) y humus. Las tres fracciones de las sustancias húmicas según (Swift y Wooster 1993) son: 1. Fracción activa o biomasa del suelo. 2. Fracción lenta. 3. Humus, fracción estable o pasiva. Estas fracciones tienen un papel importante en la dinámica de la materia orgánica con un impacto significativo en diferentes procesos de modificación del suelo: la transformación y el reciclaje de nutrientes, las reacciones enzimáticas, la formación de complejos organominerales, etc.

Este grupo de atributos y reacciones tienen un impacto fuerte sobre varios procesos modificadores, lo cual modifica y determina la calidad biológica, la sanidad y la sostenibilidad de los recursos suelo y agua.

V. PROPIEDADES Y PROCESOS CLAVES DEL SUELO

No es posible ni se requiere efectuar una valoración profunda de todos los indicadores mencionados en la sección anterior; sólo deben seleccionarse unos pocos, de acuerdo con los objetivos deseados, analizarlos e interpretarlos adecuadamente. (Oakley 1991) afirma que además debe decidirse sobre las características de los indicadores que tengan mayor relevancia social teniendo en cuenta los aspectos políticos y haciendo énfasis en su posibilidad de aceptación, simplicidad para su comunicación, importancia para la vida de la gente y flexibilidad.

Entre las características más relevantes a tener en cuenta para seleccionar los indicadores relacionados con el suelo se incluyen los siguientes:

1. **Que sea simple y fácil de medir:** Un indicador o atributo debe ser fácil de medir especialmente en condiciones de campo, en donde la logística para utilizar equipos y técnicas sofisticadas puede no ser viable.
2. **Aplicables a través de escalas:** Las propiedades y procesos para ser medidos deben ser preferiblemente aplicables a través de diferentes escalas como: temporal, sistémica y espacial. Por ejemplo, los procesos de erosión del suelo pueden ser medidos a través de todas las tres escalas.
3. **Extrapolables y predecibles:** Los indicadores elegidos deben ser fáciles de extrapolar para predecir en suelos y ecorregiones similares. La predicción puede ser hecha sobre la base de otras propiedades y procesos interrelacionados. Es importante que los datos requeridos para la predicción y extrapolación sean de fácil obtención.
4. **Versátil:** Un indicador seleccionado debe ser preferiblemente el que dé una medida de varios atributos y procesos interrelacionados. El indicador deseable debe ser importante para un rango amplio de propiedades y procesos, incluyendo propiedades físicas, químicas y atributos biológicos. El contenido de materia orgánica del suelo es un ejemplo de la gran versatilidad de un indicador. La tasa de infiltración es otro proceso que integra diferentes propiedades y está relacionado con muchos procesos.
5. **Fácil de analizar e interpretar:** Los datos generados por las técnicas analíticas seleccionadas, deben ser fáciles de analizar e interpretar en términos de diagnosticar los procesos degradativos predominantes.

- 6. Relevante para las condiciones ecológicas:** No todos los atributos son igualmente relevantes para todas las biomas, ecorregiones y órdenes de suelos. Por ejemplo la evaluación de la acidificación no es tan importante en los suelos calcáreos como en las zonas áridas o semiáridas.
- 7. Orientado a procesos:** Los atributos e indicadores elegidos deben ser relevantes para los principales procesos degradativos observados en la microcuenca o ecorregión.

Considerando todos los factores y criterios anteriormente mencionados, se sugieren algunos indicadores. En el caso de los indicadores utilizados para los procesos y propiedades físicas de los suelos, se hizo un listado que aparece en la Tabla 5. Para los procesos y propiedades químicas del suelo se realizó la Tabla 6 y para los procesos y propiedades biológicas se realizó la Tabla 7. Estos indicadores proveen una medida de los antecedentes y de las características del suelo, al igual que la magnitud y dirección de los procesos predominantes.

Los indicadores listados en las Tablas 5, 6 y 7 pueden ser reagrupados de acuerdo con los criterios delineados anteriormente; éste tipo de categorización de indicadores relevantes se encuentra en la Tabla 8. Los principales indicadores de respuesta son: la disponibilidad de nutrientes para la planta, las reservas de agua, la profundidad radicular, la estructura del suelo y la duración de la época de cultivo. Algunos ejemplos de indicadores de sensibilidad incluyen procesos tales como la erosión del suelo, el ciclo de nutrientes

Tabla 5. Atributos físicos claves del suelo y procesos relacionados

ATRIBUTOS	PROCESOS
Mecánicos	
Textura	Encostramiento, difusión gaseosa, infiltración
Densidad aparente	Compactación, crecimiento de raíces, infiltración
Agregación	Erosión, encostramiento, infiltración, difusión de gases
Distribución de tamaño y continuidad de poros	Transmisión y retención de agua, crecimiento de raíces, intercambio gaseoso
Hidrológicos	
Capacidad de retención de agua	Estrés por sequía, producción de biomasa, contenido de materia orgánica del suelo
Sin limitación de agua	Sequía, desbalance hídrico, estructura del suelo
Tasa de infiltración	Escurrentia, erosión, lavado
Zona de raíces	
Profundidad efectiva de raíces	Crecimiento de raíces, uso eficiente de agua y nutrientes
Temperatura del suelo	Flujo de calor, calentamiento del suelo, actividad y diversidad de especies de la fauna del suelo

y el lavado. Ejemplos de indicadores de exposición son las propiedades más simples del suelo: densidad pH, contenido de materia orgánica, erodabilidad, C.I.C., etc. Estos indicadores de exposición son indicadores de diagnóstico mientras que los de respuesta y de sensibilidad, están referidos a procesos basados en esas propiedades.

Tabla 6. Propiedades claves químicas y nutricionales del suelo y procesos relacionados

ATRIBUTOS	PROCESOS
pH	Acidificación y reacción del suelo, disponibilidad de nutrientes
Saturación de bases	Absorción y adsorción, solubilización
Capacidad de intercambio catiónico	Intercambio iónico, lavado
Contenido total y disponible de nutrientes	Fertilidad del suelo, reserva de nutrientes
Contenido de materia orgánica	Formación estructural, mineralización, retención del nutriente carbono por la biomasa

Tabla 7. Propiedades biológicas claves y proceso del suelo relacionados

ATRIBUTOS	PROCESOS
Población de lombrices y otra macrofauna del suelo y su actividad	Ciclaje de nutrientes, descomposición de materia orgánica, formación de la estructura del suelo
Carbono en la biomasa del suelo	Transformaciones y respiración microbial, formación de la estructura del suelo y complejos organo-minerales
Carbono orgánico total del suelo	Incorporación y fuente de nutrientes del suelo, carbón de la biomasa, respiración del suelo y flujo gaseoso

Tabla 8. Categorías funcionales de los indicadores de sostenibilidad del suelo

CATEGORÍA FUNCIONAL	INDICADORES
1. Indicadores de respuesta	Reservas de nutrientes, capacidad de agua disponible, profundidad de raíces, balance de agua, época de cultivo, grados día, estructura del suelo
2. Indicadores de sensibilidad	Ciclaje de nutrientes, erosión del suelo, movimientos de masa, lavado
3. Indicadores de exposición	Densidad aparente, pH, textura, contenido de materia orgánica, tasa de infiltración, erodabilidad, CIC

VI. INDICADORES PARA EL USO SOSTENIBLE DEL RECURSO AGUA

Similar a las propiedades del suelo, el uso sostenible del recurso agua puede ser valorado por un rango de indicadores. Los indicadores que aparecen listados en la Tabla 9 están agrupados en cuatro categorías. Indicadores de la cantidad total del recurso agua incluyen la precipitación, aguas superficiales y subterráneas, tamaño y recarga de acuíferos. La suma total de la cantidad de agua es algo muy importante para caracterizar la disponibilidad del recurso agua ya que estos son los encargados de mantener el recurso para que no se agote. Los indicadores hacen referencia a procesos relevantes para el uso sostenible del recurso incluyendo las cantidades y tasa de escurrimiento, drenaje profundo, evaporación y evapotranspiración y procesos que gobiernan el reciclaje del agua y la recarga de las aguas subterráneas. La eficiencia en el uso del agua para diferentes usos y sistemas de manejo de tierras puede ser evaluada a través de las pérdidas debidas a filtraciones, la evapotranspiración, el área bajo irrigación y uso del agua, manejo del agua a nivel predial y almacenamiento, etc.

Tabla 9. Algunos indicadores del uso sostenible del recurso agua

OBJETIVO	INDICADORES
1. Cantidad	Total del recurso agua (ciclo hidrológico) y sus diferentes componentes, nivel freático y su fluctuación, recarga de aguas subterráneas, cosecha de agua, características del flujo del agua superficial
2. Procesos	Inundación , escurrimiento , evaporación y evapotranspiración, reciclaje del agua
3. Eficiencia de uso	Área irrigada, eficiencia en el uso del agua, pérdidas por filtración, pérdidas por evaporación, volumen de almacenamiento de agua en la finca y tipo de uso del agua para diferentes propósitos
4. Calidad	Carga de materiales disueltos y en suspensión, concentraciones de P y NO ₃ , pH, conductividad eléctrica, concentración de pesticidas en el agua (2,4-D, Atrazina, Lindano), cultivo de algas, microorganismos, patógenos, DOB y COD

Un amplio rango de indicadores puede ser usado para evaluar la calidad del agua; los más importantes son: las cantidades disueltas de elementos en suspensión tales como concentraciones de P, NO₃, N y otros nutrientes de las plantas, pH, conductividad eléctrica y el total de sales solubles, cultivo de algas, concentración de pesticidas y otros productos químicos agrícolas. La demanda biológica de oxígeno (DOB) y química de oxígeno (COD) son también buenos indicadores de la calidad del agua.

La clasificación de estos indicadores de la calidad del agua se puede hacer en tres categorías como se muestra en la Tabla 10. Los indicadores de respuesta de la calidad del agua incluyen la captación de agua total y la precipitación y distribución estacional, recarga de agua en el suelo, cosecha de aguas, y recarga de acuíferos.

Tabla 10. Categorías de los indicadores de sostenibilidad del agua

CATEGORÍA FUNCIONAL	INDICADORES
1. Indicadores de respuesta	Agua calculada, distribución total y estacional de las lluvias, recarga del agua subterránea, cosecha de agua, recarga de acuíferos
2. Indicadores de sensibilidad	Ciclo del agua, tasa de escurrimiento, evaporación y evapotranspiración, déficit hídrico
3. Indicadores de exposición	Sedimentos y carga disuelta, conductividad eléctrica, partículas de carbono orgánico disueltos, demanda química y biológica de oxígeno

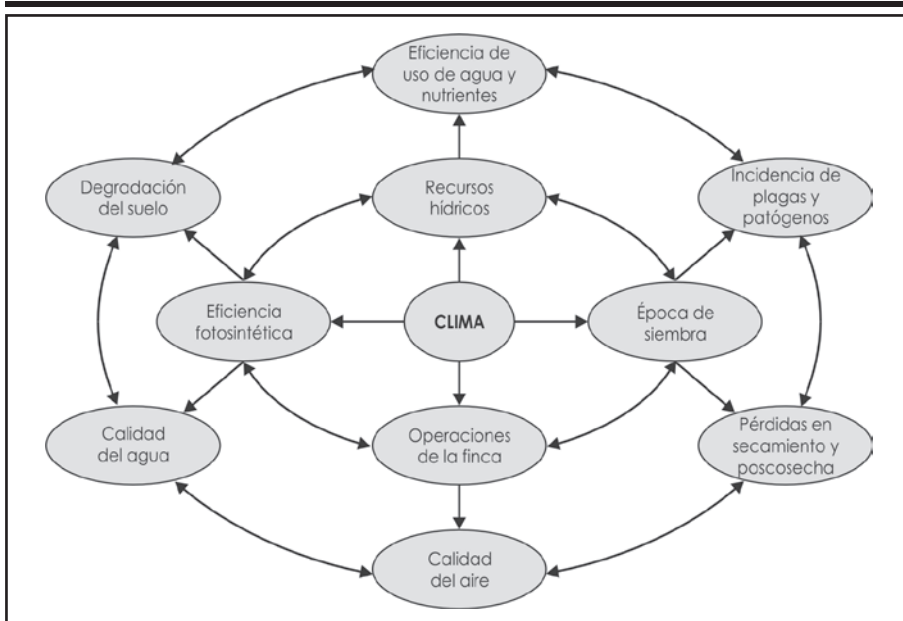
Los indicadores de sensibilidad de la calidad del agua son: ciclaje del agua, tasas de escurrimiento, evaporación y evatranspiración, déficit hídrico, etc. Los indicadores de la calidad del agua están bajo las categoría de indicadores de exposición. Algunos indicadores importantes en esta categoría son: concentración de sedimentos y turbidez, conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos, carbono orgánico y concentración de patógenos, etc.

Similar a los indicadores de la calidad del suelo, la selección del indicador apropiado para la calidad del agua depende del objetivo de la valoración de la sostenibilidad, los recursos y facilidades disponibles y del soporte logístico requerido para realizar estos análisis. La selección de los indicadores también depende del uso del suelo, los sistemas agrícolas y de la ecorregión. En términos de calidad de agua, la carga de materiales disueltos y en suspensión y la concentración de productos químicos agrícolas son indicadores importantes.

VII. INDICADORES DE CAMBIOS EN EL MICRO Y MESO CLIMA

Los factores climáticos son indicadores importantes del uso sostenible de los recursos suelo y agua, pues el clima afecta la sostenibilidad de ambos directa e indirectamente. Los efectos directos del clima sobre el uso sostenible de los recursos físicos indicados por el primer círculo concéntrico en la Figura 8, incluyen la cantidad y disponibilidad de los recursos de agua, la duración de la etapa de crecimiento basada en los regímenes de agua y temperatura, la productividad potencial gobernada por la calidad y cantidad de radiación solar y su efecto en la fotosíntesis, y la eficiencia y programación de las operaciones de la finca. Los efectos indirectos del clima en la sostenibilidad están indicados por el círculo concéntrico exterior en la Figura 8, e incluyen factores tales como, la degradación del suelo y el ambiente debido a clima adverso, la eficiencia en el uso del recurso (ej. Nutrientes y agua) afectado por pérdidas, la incidencia de insectos plagas y patógenos, las pérdidas de cultivos durante la cosecha y los procesos de poscosecha, etc.

Figura 8. Efectos directos e indirectos del clima sobre el uso sostenible de los recursos de suelos y agua



La selección de indicadores apropiados de cambio de factores micro y meso climáticos debido al manejo, debe realizarse para reflejar los efectos directos e indirectos sobre la productividad y sostenibilidad. Un amplio rango de indicadores listados en la Tabla 11, se agrupan en 5 categorías, con base en los procesos dominantes y valores concernientes con sostenibilidad. La cantidad de agua, necesaria para evaluar los recursos hídricos disponibles y la productividad actual y potencial, puede ser alcanzada conociendo la cantidad y distribución estacional de la lluvia, la evapotranspiración actual y potencial, la escorrentía y el drenaje profundo y los cambios en el almacenamiento de agua en el suelo.

Tabla 11. Indicadores de cambio inducidos por manejo en el micro y meso clima

PROCESO / FACTOR	INDICADORES
1. Inventario del agua	Cantidad y distribución estacional de la lluvia, evapotranspiración actual y potencial, escorrentía y drenaje profundo, almacenamiento de agua en el suelo
2. Época de siembra	Inventario del agua, inicio de lluvias, grados día, reutilización de agua para riego suplementario, radiación estacional neta, temperatura del aire y el suelo
3. Estrés de sequía	Probabilidad de lluvias con intervalos de 5-7 días, confiabilidad de las lluvias, frecuencia de contabilización de las lluvias en la época de sequía, evapotranspiración actual y potencial, capacidad de agua disponible en el suelo, temperatura del aire y el suelo
4. Productividad potencial	Radiación solar neta, nubosidad, humedad relativa, fluctuaciones diurnas de la temperatura del suelo y el aire, contabilidad del agua, grados día, duración de la época de siembras
5. Calidad del aire	Emisiones de gas de invernadero (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CFC's), SOx y concentraciones de polvo

También es importante definir el inicio y duración de la época de siembra, radiación estacional neta, excesos de agua para reciclaje y riego suplementario y las temperaturas del aire y el suelo. El estrés de sequía puede ser un factor importante aún en los trópicos húmedo y subhúmedo. Esto es especialmente un factor limitante del rendimiento en trópicos áridos y semiáridos. Hay varios factores que pueden ser utilizados como indicadores del estrés de sequía. Entre ellos son importantes la probabilidad de lluvias con intervalos de 5-7 días, confiabilidad de la lluvia y lluvia segura y esperada, frecuencia de la sequía de diferente duración, evapotranspiración actual y potencial, capacidad de agua disponible en el suelo y la temperatura del aire y el suelo. Hay diferentes indicadores climáticos de la productividad potencial. Entre ellos los más importantes son la radiación solar neta, la nubosidad o brillo solar, la humedad relativa mínima y máxima, la capacidad de almacenamiento

de agua en el suelo y la temperatura del aire y el suelo. La diferencia en las temperaturas del aire en el día y la noche es un factor importante que afecta la tasa de asimilación neta en biomas tropicales.

Los procesos del suelo tienen también un efecto importante sobre el clima global. Las emisiones de gases activos del suelo pueden ser sustanciales y afectar la concentración de gases de invernadero en la atmósfera. La medición de las emisiones gaseosas de CO₂, CH₄ y N₂O pueden proveer una información útil para ese efecto. En general los suelos bien drenados son un sumidero para CH₄. Sin embargo, una cantidad sustancial de CH₄ puede ser emitida de suelos húmedos, suelos pobremente drenados o suelos propensos a anaerobiosis.

Las siembras de arroz, un cultivo importante en el sur y sureste de Asia y también en el trópico, es también una fuente mayor de emisión de CH₄ a la atmósfera. La polución del aire está también relacionada con las emisiones industriales de SO_x y concentraciones de partículas de polvo. Ambos factores tienen efectos indirectos sobre la productividad y el uso sostenible de los recursos de suelos y agua.

No todos los indicadores climáticos listados en la Tabla 11 pueden ser rutinariamente medidos, especialmente a través de diferentes escalas. Es importante identificar pocos parámetros claves y una escala apropiada para su medida. Algunos parámetros claves listados en la Tabla 12 están agrupados en relación con una escala recomendada de medidas.

Tabla 12. Indicadores climáticos claves y su escala de medición

ESCALA	INDICADORES
Escala Espacial	
Cuenca	Balance hídrico incluyendo todos los componentes del ciclo hidrológico, cantidad y distribución de lluvias
Paisaje	Almacenamiento de agua en el suelo, escorrentía, microclima en relación con el aspecto de pendiente
Parcela de campo	Temperatura del aire y el suelo, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, radiación neta
Escala Sistemática	
Sistema de cultivo	Eficiencia de uso del agua, uso del agua por el cultivo, evapotranspiración, temperatura del canopio
Planta	Fotosíntesis neta, relación planta-agua
Escala Temporal	
Diurna	Temperaturas mínima y máxima del aire y del suelo, humedad relativa, evaporación, cantidad e intensidad de la lluvia
Estacional	Balance de agua, grados día, inicio y finalización de las lluvias
Anual	Período de retorno de la precipitación y eventos de escorrentía, probabilidad de ocurrencia de sequía, eventos cíclicos

Algunos indicadores pueden ser medidos a través de varias escalas. Por ejemplo, diferentes componentes del ciclo hidrológico pueden ser evaluados en diferente jerarquía de escalas espacial y temporal. Sin embargo, la eficiencia de uso del agua solamente puede ser evaluada a nivel del sistema de cultivo o del sistema de finca. La fotosíntesis neta y la tasa de asimilación neta puede ser medida a nivel de la planta. Las temperaturas del aire y del suelo y la humedad relativa también pueden ser calculadas en diferentes escalas temporales como: diaria, mensual o anualmente.

Los indicadores climáticos también pueden ser agrupados en diferentes categorías funcionales (Tabla 13). Indicadores de respuesta del microclima incluyen contabilidad estacional y anual del agua, duración de las épocas de siembra y grados día.

Tabla 13. Categorización funcional de indicadores climáticos

CATEGORÍA FUNCIONAL	INDICADORES
1. Indicadores de respuesta	Cantidad de agua estacional o anual, duración de la estación de cultivo, grados día
2. Indicadores de sensibilidad	Probabilidad de ocurrencia de sequía, inicio y final de las lluvias, riesgos de fracaso de la cosecha
3. Indicadores de exposición	Temperaturas media, mínima y máximas de suelo y aire, humedad relativa, radiación neta, cantidad e intensidad de lluvia. Estas variables pueden ser medidas a través de escalas temporales

Indicadores sensoriales relacionados con los riesgos climáticos incluyen la probabilidad de ocurrencia de la sequía o inicio y finalización de las lluvias, o probabilidad de falla del cultivo como consecuencia de un pobre establecimiento, etc. Los indicadores de exposición incluyen factores tales como medidas de los simples parámetros climáticos (ej., temperatura del aire y el suelo, humedad relativa y cantidad e intensidad de las lluvias) por medio de diferentes escalas temporales a nivel diario, mensual, estacional o anual.

La selección de indicadores climáticos también depende de la disponibilidad de equipos y soporte logístico. Debido a la naturaleza de las medidas involucradas, el acceso a sitios remotos y la disponibilidad de energía y otras facilidades son una importante consideración en la selección de indicadores climáticos apropiados. Algunos equipos climáticos son caros y requieren mantenimiento periódico. Una consideración cuidadosa debe darse a esos factores en el establecimiento de estaciones climáticas para medir dichos indicadores. Para que sean efectivos y no costosos, se deben preferir aquellos parámetros que puedan ser medidos rutinariamente por medio de varias escalas.

VIII. PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO COMO INDICADOR DE SOSTENIBILIDAD

La medida de la productividad del cultivo es un buen integrador de todos los factores de suelo, agua, climáticos y bióticos. La productividad puede ser evaluada por varios métodos, algunos de los cuales se listan en la Tabla 14. Es importante evaluar la productividad potencial con la productividad actual.

Tabla 14. Indicadores de productividad agronómica

INDICADORES	ESCALA Y OBJETIVOS DE MEDICIÓN
1. Biomasa total	Expresado por unidad de área, por unidad de tiempo o ambos
2. Rendimiento agronómico	Calculado por unidad de área, por unidad de tiempo o ambos
3. Rendimiento económico	Determinado en términos de netos retornos
4. Uso eficiente de recursos	Analizado en términos de uso eficiente de agua, nutrientes o energía
5. Productividad potencial vs. actual	Productividad en razón de las características, entradas y manejo
6. Relación de utilización de la tierra (LER)	Expresada como una medida de la intensidad del uso de la tierra
7. Intensidad de cultivo	Analizado como el número de cultivos establecidos por año en el mismo lote
8. Relación del tiempo por área	Considera la duración del ciclo de cada cultivo en un sistema rotacional
9. Flujo de energía	Energía total producida (valores en calorías)
10. Termodinámica	Energía producida por unidad de energía suministrada

En un sistema de manejo basado en el conocimiento científico, la producción actual puede exceder la producción potencial en suelos de baja fertili-

dad inherente a ambientes difíciles. La productividad potencial y el potencial productivo del suelo dentro de un bioma, pueden ser estimados por varios modelos, ej., CERES (Richie *et al.*, 1989); EPIC (Williams *et al.*, 1984); PI (Kiniry *et al.*, 1983; Pierce *et al.*, 1983); y Tropical Soil Productivity Calculator (Aune and Lal, 1994). Si la disponibilidad de tierra es un factor limitante, los índices apropiados de productividad son el factor uso de la tierra (L), la relación de tierra equivalente (LER), la relación equivalente área tiempo (ATER), etc. El factor de uso de la tierra (L) se define como la relación entre el período de cultivo C más el período de descanso F y el período de cultivo C (Okigbo, 1978).

$$L = (C + F) / C \quad \text{(Ecuación 8)}$$

El factor **L** es generalmente alto para sistemas de baja intensidad, ej. cultivos alternos. El LER se calcula como sigue (Willey and Osiru, 1972):

$$LER = \sum_{i=1}^n (Y_i/Y_m) \quad \text{(Ecuación 9)}$$

donde **Y_i** y **Y_m** son rendimientos de los cultivos componentes en los sistemas rotacional y monocultivo, respectivamente, y **n** es el número de cultivos involucrados.

Debido a que los cultivos varían ampliamente en su período de maduración, el índice ATER considera la duración del cultivo (Hiebsch and McCollum, 1987):

$$ATER = (1/t) \left(\sum_{i=1}^n (dY_i/Y_m) \right) \quad \text{(Ecuación 10)}$$

donde **d** es el período de crecimiento del cultivo en días y **t** es el tiempo en días durante el cual el campo permanece ocupado, es decir el período de crecimiento del cultivo de mayor duración. Los valores numéricos de ATER se aproximan a los de LER para una mezcla de cultivos de aproximadamente idénticos períodos de duración, es decir donde **t** = **d** en la Ecuación 10. En comparación, la productividad también puede ser expresada en términos de la eficiencia de uso del recurso más limitante, ej., agua, nutrientes, energía o mano de obra.

Adicional a los indicadores de productividad agronómica de la Tabla 14, hay varios indicadores de productividad económica. Los indicadores económicos más comúnmente utilizados son: la relación beneficio – costo, las tendencias de los rendimientos o de los beneficios a través del tiempo, oferta versus demanda, beneficio total o de cada componente, presupuesto de la

finca y sus tendencias a través del tiempo, etc. La calidad del producto es otro indicador de productividad. La calidad puede ser expresada de diferentes formas incluyendo calidad culinaria, calidad al gusto, calidad nutricional, o calidad visual basada en el color o tamaño del grano.

La selección de los indicadores de la productividad debe estar basada en los objetivos. Para evaluar el uso sostenible de los recursos del suelo y del agua, los indicadores de la productividad agronómica deben ser relevantes y fáciles de computar. La producción total de la biomasa, la producción agronómica, el índice de cosecha, y la producción agronómica expresados en términos de la eficiencia del uso de nutrientes o del agua, son indicadores útiles y relevantes de la productividad.

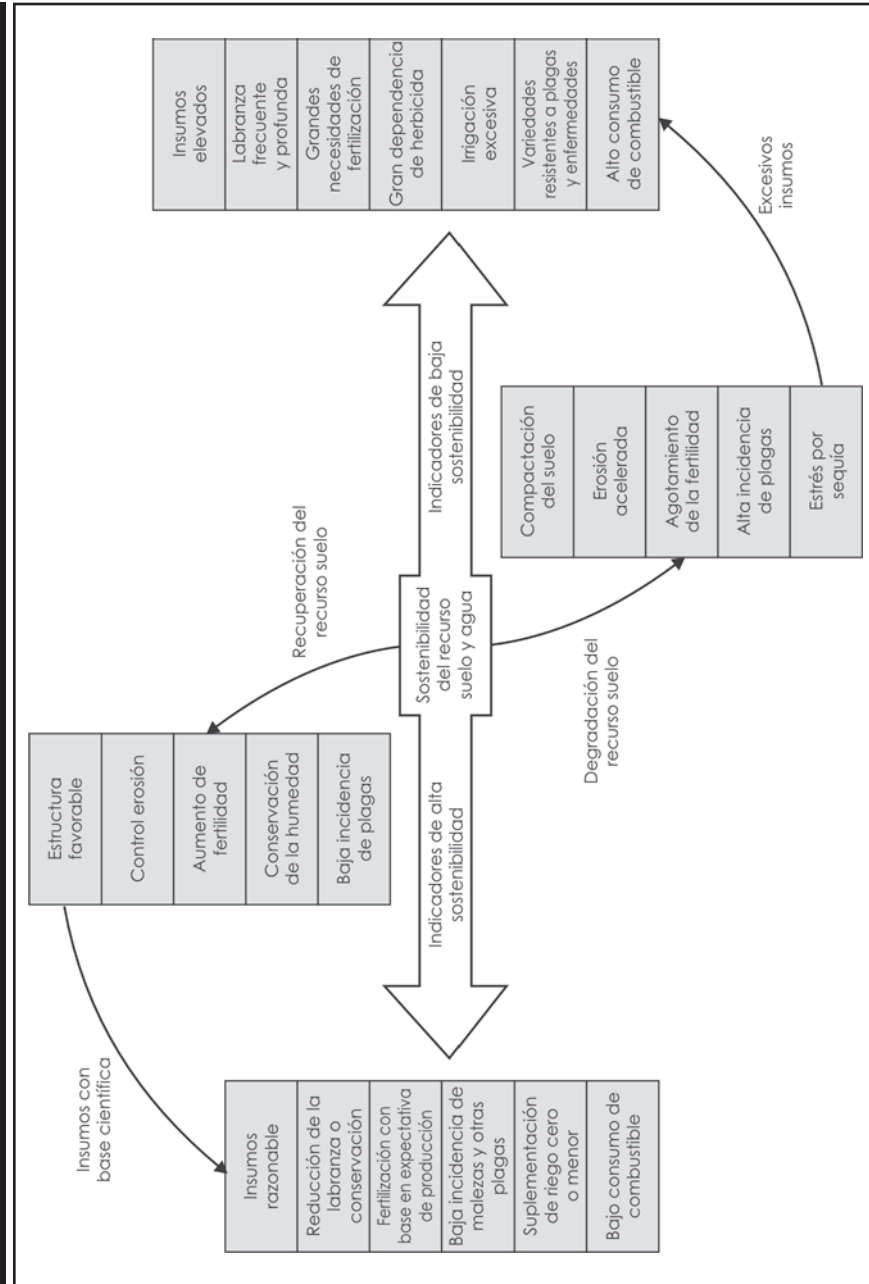
Además de la productividad, hay varios indicadores de la planta que expresan la sostenibilidad. Los indicadores de la planta, incluyen el rendimiento de la cosecha o de la planta, expresados por el índice de área foliar o cobertura por área, el vigor de la cosecha, determinado por la altura o por la materia seca producida en etapas específicas del crecimiento, el estado nutricional de la cosecha que se puede evidenciar por síntomas de eficiencia o deficiencia nutricional, como también por la incidencia de las enfermedades y malezas.

IX. INDICADORES DE MANEJO DEL SUELO Y DEL CULTIVO

La sostenibilidad de los recursos del suelo y de agua se puede también evaluar con base en las tendencias de la cantidad y naturaleza de los insumos ajenos a la finca, requeridos para producir rendimientos equivalentes a los obtenidos anteriormente y el grado de habilidad gerencial requerido para minimizar las limitantes relacionadas con el suelo y el cultivo, para obtener el nivel de producción deseado. En general, cuanto más son los insumos requeridos para producir igual rendimiento, menos sostenible es el sistema (Figura 9).

El incremento en insumos gerenciales para obtener el mismo rendimiento es indicativo de la degradación del suelo. En contraste, el manejo con base en la ciencia y tecnología relacionado con la producción prevista, es indicativo del mantenimiento o de la recuperación del suelo. La sincronización de las operaciones de la granja es otro indicador gerencial muy útil. Cuando los demás factores restantes permanecen iguales, las operaciones de la finca efectuadas de acuerdo con el cronograma preestablecido son un indicador de un uso sostenible de los recursos suelo y agua. Las operaciones retrasadas de la finca, debido al suelo húmedo o a la labranza excesiva, necesaria para preparar una óptima cama para la semilla, son indicadores del uso no-sostenible de los recursos suelo y agua.

Figura 9. Indicadores de manejo sostenible del suelo y del cultivo



X. INDICADORES DE LA BASE DEL RECURSO

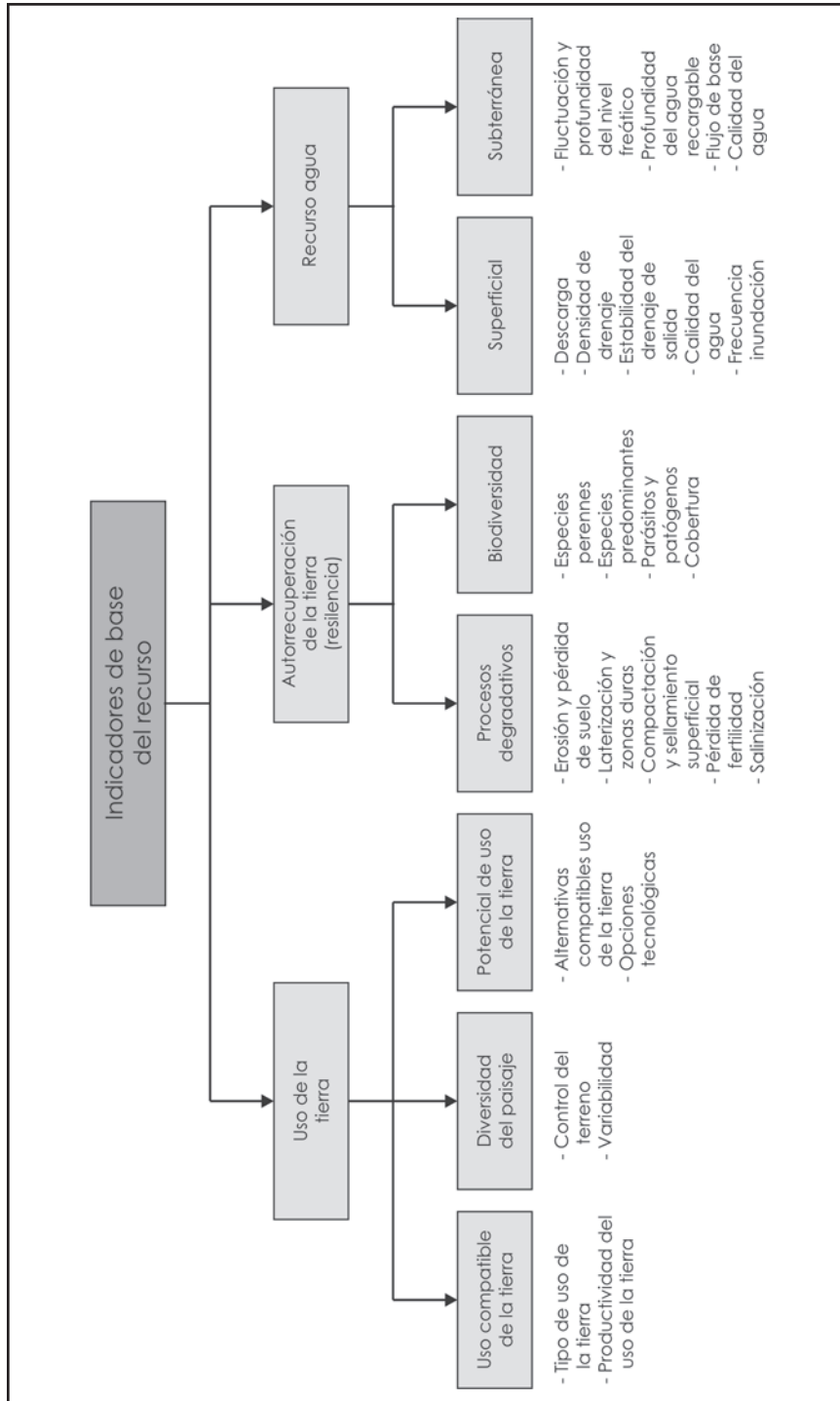
La magnitud y la naturaleza de los insumos que el suelo y el manejo del cultivo requieren para producir el rendimiento previsto, son indicativas de la condición o de la calidad de la base del recurso. Cuanto más son los insumos requeridos, más pobre es la base del recurso. Hay una amplia gama de indicadores de la base del recurso, dependiendo de los valores específicos referidos. La base del recurso es un término genérico que implica todos los recursos naturales como biofísicos, socio-económicos y culturales. Este documento se refiere solamente al suelo, al agua, y en un grado menor a los componentes de la vegetación del recurso biofísico. Los indicadores base del recurso, se ocupan más bien, de una aplicación amplia del uso total del recurso y no de las características inherentes a los componentes del suelo, del agua o de la vegetación. Algunos indicadores importantes del uso del recurso descritos en la Figura 10, se agrupan bajo 4 amplias categorías:

1. Indicadores del uso de la tierra.
2. Indicadores de la autorecuperación (resiliencia) de la tierra.
3. Indicador del recurso agua.
4. Indicadores orientados a procesos.

1. Indicadores del uso de la tierra: Un sistema es sostenible solamente si la utilización del suelo es compatible con la capacidad de uso del suelo. El uso incompatible del suelo está relacionado con los procesos degradantes de la tierra. La diversidad del paisaje es otro indicador útil de la sostenibilidad. El tipo de diversidad del paisaje es indicativo de una utilización sostenible del suelo. La adecuación de tierras para remover diversos tipos de paisaje puede llevar a la inestabilidad e insostenibilidad del paisaje. Usos alternativos y diversos de la tierra dentro de su capacidad de uso son también compatibles con el sistema sostenible de la utilización del suelo. Usar opciones tecnológicas basadas en la ciencia para obtener beneficios de los usos del suelo son alternativas compatibles con el uso sostenible de la base del recurso.

2. Indicadores de la autorecuperación (resiliencia) de la tierra: La degradación de la tierra es un desastre ecológico producto del uso erróneo y mal manejo. El grado de autorecuperación de la tierra

Figura 10. Indicadores de base del recurso para el uso sostenible de los recursos del suelo y el agua



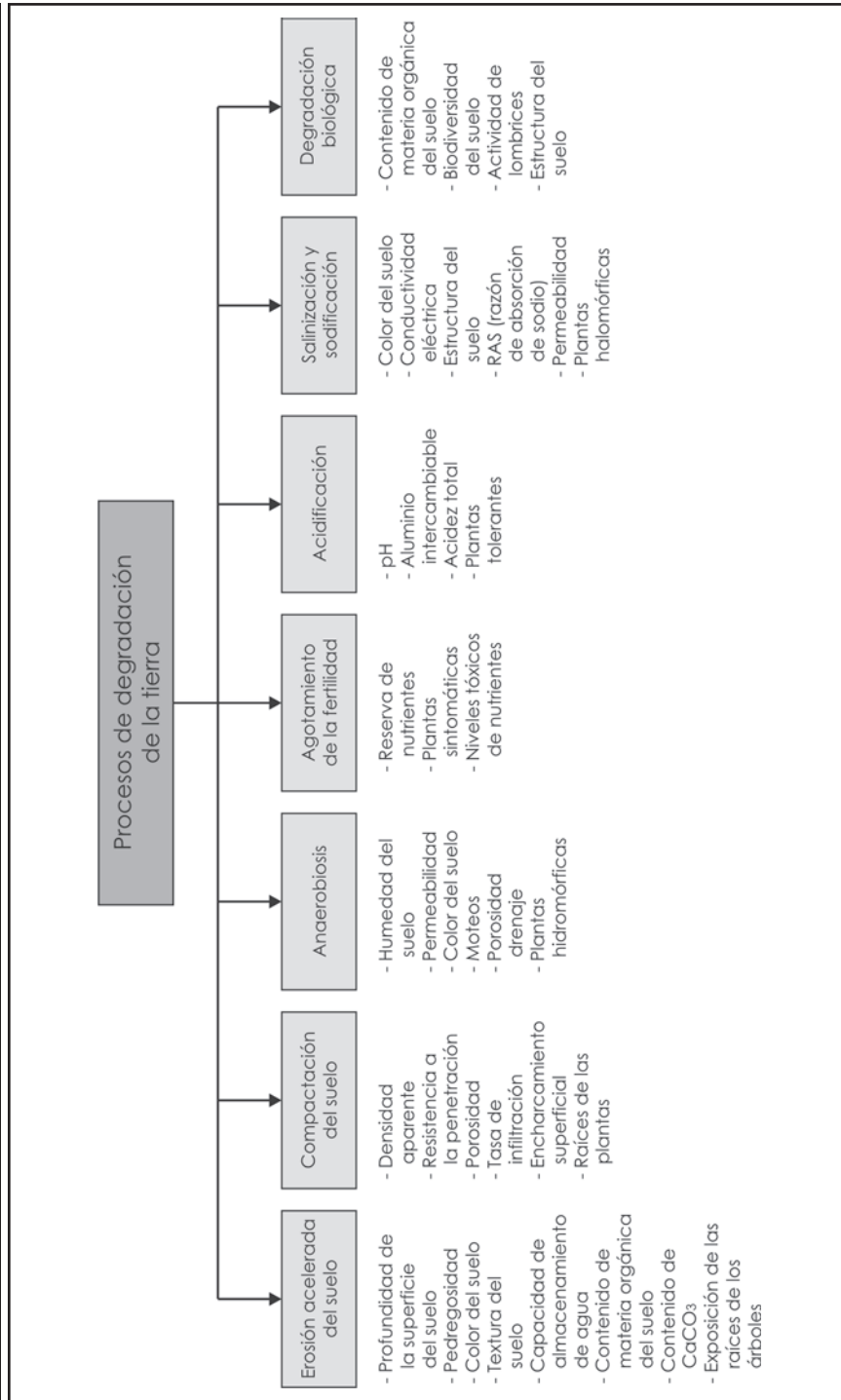
disminuye cuando los procesos degradantes actúan. Los indicadores apropiados de la autorecuperación de la tierra se pueden utilizar para evaluar la sostenibilidad de la base del recurso. Un indicador común de la autorecuperación de la tierra es el tipo(s) e intensidad de procesos degradantes. Los procesos degradantes físicos e hidrológicos del suelo incluyen la compactación, configuración dura, formación de cárcavas y pérdida total y frecuentes inundaciones. La formación de cárcavas es indicativo de una utilización insostenible del suelo. La degradación química y nutricional del suelo incluye agotamiento de la fertilidad y desbalance de nutrientes incluyendo toxicidad (como Al, Mn, etc.) y deficiencia de elementos esenciales para la planta (como N, P, K, Ca, Zn, S, etc.). La degradación biológica puede referirse a la pérdida de vegetación, fauna y flora del suelo y, en general, a la carencia de biodiversidad en general. El predominio de malezas perennes y altamente competidoras es también un síntoma de la carencia de biodiversidad y de un sistema insostenible. La baja actividad o la ausencia de lombrices, de termitas y otra macrofauna del suelo, es también indicativa de pobreza biológica y de la degradación de la base del recurso. En términos del suelo, la degradación biológica implica la declinación en contenido de la materia orgánica de suelo y del carbón de la biomasa.

3. **Indicador del recurso agua:** El abastecimiento de agua adecuado es un requisito previo esencial de una base sostenible del recurso. Tanto la superficial como el agua subterránea, en cantidad y calidad, son importantes para la sostenibilidad. El agua superficial, su cantidad y calidad, pueden valorarse con base en la descarga total, los picos de inundación y su frecuencia, la densidad del drenaje, la estabilidad de las canales de drenaje y de los taludes de los canales y de la calidad del agua indicada por la naturaleza y la cantidad de cargas suspendidas y disueltas. Hay indicadores similares para la calidad del agua subterránea.

4. **Indicadores orientados a procesos:** Los indicadores ambientales de suelo y de agua también pueden ser relevantes dentro del proceso degradante de la tierra. Los indicadores orientados a procesos, son especialmente útiles para definir una estrategia restaurativa, pensando en opciones posibles de manejo para la utilización del suelo. Algunos indicadores orientados a procesos, se muestran en la Figura 11.

Es una estrategia útil efectuar el monitoreo de algunos indicadores visuales, antes de tomar medidas detalladas de las características del suelo y del agua. Por ejemplo, la severidad de la erosión del suelo se puede evaluar por: el color del suelo, la presencia de piedras en la superficie del suelo, la exposición de raíces y de otras huellas permanentes. De igual manera, la compactación del suelo y el anaerobismo se pueden evaluar en forma cualitativa por el estancamiento del agua, el moteado y la presencia de

Figura 11. Indicadores del suelo, agua y planta relacionados con procesos degradativos predominantes



algunas plantas indicadoras. El crecimiento de algunas plantas tolerantes a una situación específica es una guía útil; especies hidromórficas, o sea, las que crecen en las tierras húmedas, las plantas halomórficas o aquellas que crecen en los suelos afectados por sales, las especies tolerantes al aluminio que crecen en suelos ácidos, o simplemente la pobreza del vigor de la cosecha y el crecimiento limitado en las áreas propensas a procesos degradantes específicos. La alta diversidad de especies puede también ser importante para una utilización sostenible del suelo.

La vegetación y el clima son también componentes importantes de la base del recurso. Mientras que los indicadores del clima han sido discutidos, la evaluación de la biomasa de la vegetación y la productividad neta, son también medidas relevantes de sostenibilidad. Estos aspectos importantes no se tratan, sin embargo, en este documento.

XI. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA DIVERSAS ECORREGIONES

Las limitaciones para un uso sostenible de los recursos suelo y agua son diferentes para las diversas ecorregiones. Por lo tanto, los indicadores del suelo y del agua son diferentes entre ecorregiones (Figura 12).

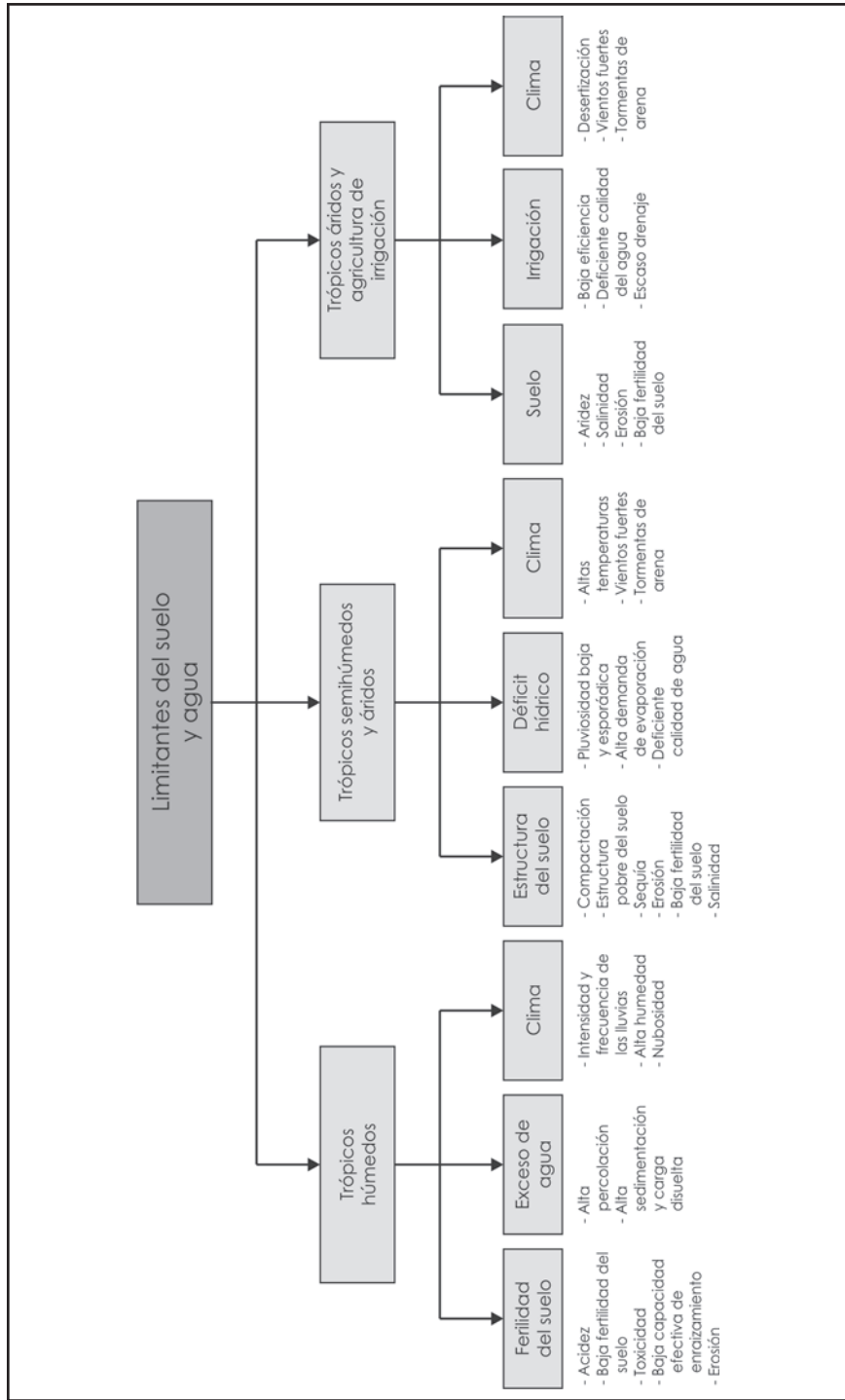
1. Trópico húmedo: La acidez, baja fertilidad del suelo, y las concentraciones tóxicas de Al y del Mn en la zona de la raíz son los principales problemas relacionados con el suelo en el trópico húmedo. Además, algunos suelos también tienen estructura pobre y son propensos a la compactación y a la erosión. Las lluvias frecuentes e intensas, la baja radiación y alta nubosidad son problemas serios para las tierras arables en estas regiones (Figura 12).

Los indicadores del suelo y del agua para el uso sostenible de los recursos naturales en los trópicos húmedos, listados en la Tabla 15, están agrupados bajo tres categorías. Los indicadores del suelo, de acuerdo con los limitantes relacionados del suelo, incluyen:

- (i) El pH y los parámetros de reacción del suelo como la acidez total, el Al y el Mn intercambiables y la saturación de bases.
- (ii) La medida de la fertilidad del suelo, es decir, la concentración total y disponible de nutrientes de la planta, el contenido de materia orgánica en el suelo, la actividad y diversidad de las especies de lombrices de tierra.
- (iii) La estructura del suelo y los parámetros relacionados como el porcentaje de agua en los agregados estables, el peso promedio y diámetro de los agregados, la resistencia del suelo, su densidad y volumen, la porosidad y distribución de los poros según su tamaño y la profundidad efectiva de las raíces.
- (iv) La capacidad del suelo para retener el agua disponible para la planta, la velocidad de infiltración.
- (v) La erosión del suelo.

Estos indicadores se listan en orden de prioridad. Los suelos altamente deteriorados y lixiviados de los trópicos húmedos tienen comparativamente más restricciones de fertilidad edáfica y nutritivas que limitaciones físicas.

Figura 12. Limitantes biofísicas para el uso sostenible de los recursos suelo y agua en los trópicos



En la Tabla 15, también se listan los indicadores para el agua y los factores climáticos. Los principales indicadores para agua incluyen:

- (i) Los componentes del balance hídrico que comprenden la velocidad y cantidad de la escorrentía, caudales, capacidad de retención de agua del suelo y el déficit de agua.
- (ii) La calidad de agua determinada por la concentración de cargas disueltas y en suspensión, y el tipo y concentración de químicos agrícolas.

Existen dos categorías de indicadores importantes del clima que incluyen:

- (i) Las características de lluvia que comprenden la cantidad, intensidad, erosibilidad y períodos de retorno.
- (ii) El depósito de energía basado en la radiación solar neta, las temperaturas ambiental y del suelo.

Tabla 15. Indicadores de sostenibilidad del suelo y el agua para trópicos húmedos

PROCESOS	PARÁMETROS	INDICADORES
Suelo	Acidificación	pH, acidez total, saturación de bases, Al y Mn intercambiables
	Fertilidad del suelo	Contenido total y disponible para la planta de N, P, K, Ca, Zn, S, contenido de materia orgánica en el suelo, actividad y diversidad de especies de lombrices de tierra y de termitas
	Estructura del suelo	Agregados, su diámetro y peso promedio, densidad, volumen y dinámica, porosidad y distribución de los poros según su tamaño, erodabilidad, profundidad de enraizamiento
	El agua del suelo	La capacidad de agua disponible, velocidad de infiltración, conductividad hidráulica saturada y no saturada
	Erosión del suelo	Riesgos potenciales y la tasa actual de erosión, bajo diferentes sistemas de manejo, tolerancia a la pérdida de suelo, erosión y productividad de los cultivos
Agua	Balance del agua	Grado y cantidad de escorrentía, caudales, almacenamiento de agua en el suelo, déficit de agua
	Calidad del agua	Cargas disueltas y suspendidas, tipo y concentración de químicos agrícolas, eutroficación
Clima	Lluvia	Distribución, erosibilidad de las lluvias, intensidad y cantidad, períodos de retorno
	Inventario de energía	Radiación solar neta, temperaturas del suelo y ambiental, inventario de energía

2. Trópicos semihúmedos y semiáridos: En la Tabla 16 se listan tres categorías de indicadores relevantes para los trópicos semihúmedos y semiáridos. En estas ecorregiones, los limitantes del suelo relacionados con la producción agrícola y la calidad del medio ambiente son diferentes a los de los trópicos húmedos.

Tabla 16. Indicadores de sostenibilidad del suelo y el agua para trópicos semihúmedos y semiáridos

PROCESOS	PARÁMETROS	INDICADORES
Suelo	Compactación y grado de dureza	Resistencia de la corteza, densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad y distribución de poros según su tamaño, velocidad de infiltración, tipo e intensidad de resquebrajamiento
	Erosión del suelo	Magnitud de la erosión eólica e hídrica, y proporción del avance de las cárcavas, erodabilidad del suelo, interrelación erosión-productividad, tolerancia a la pérdida de suelo
	Estructura del suelo	Agregación y estabilidad de los agregados, distribución de los poros por tamaño
	Estrés por sequía	La capacidad de agua disponible, la profundidad de enraizamiento, el déficit de agua, la probabilidad de sequía durante la estación
	Fertilidad del suelo	El carbono orgánico del suelo, el total de macro y micronutrientes disponibles para la planta
	Fauna del suelo	Actividad y diversidad de especies de termitas
	Salinización	Conductividad eléctrica, SAR, total de sales solubles
	Distribución y tamaño de partículas	Pedregosidad, textura
Agua	Balance hídrico	Déficit hídrico, balance hídrico en términos semanales
	Calidad	La concentración y naturaleza de sales solubles en aguas superficiales y subterráneas, carga de sedimentos, eutroficación
Clima	Lluvias	Descargue y cesación de lluvias, períodos vegetativos
	Contenido energético	Temperaturas del suelo y ambiental, demanda de evaporación
	Vientos	Velocidad y dirección del viento, tormentas de arena

Los limitantes físicos del suelo, la estructura frágil del suelo y el estrés por sequía, son comparativamente problemas más severos que los limitantes químicos y nutricionales del suelo. Por consiguiente los indicadores del suelo incluyen aquellos que comprenden y reflejan los siguientes factores:

- (i) La compactación y factores del endurecimiento de la superficie del suelo, como el encostramiento, el cuarteamiento, etc.
- (ii) La erosión del suelo relacionada con los factores agua y viento.
- (iii) El estrés por sequía reflejado como efecto de la capacidad de agua disponible y la profundidad efectiva de enraizamiento.
- (iv) La fertilidad del suelo medida en términos del contenido de la materia orgánica del suelo y concentraciones del total disponible de los nutrientes esenciales para la planta.
- (v) La actividad y diversidad de las especies de invertebrados del suelo especialmente de termitas.
- (vi) La salinidad del suelo y los parámetros relevantes como conductividad eléctrica, el total de sales solubles, y la rata de absorción de sodio (RAS), etc. La pedregosidad así como el cuarzo y la concentración de material fósil, es un importante factor, frecuentemente adverso para la producción de cultivos en los suelos de estas regiones. La distribución, tamaño y concentraciones de piedras son buenos indicadores de las características del suelo y de su limitado uso potencial.

El agua y los indicadores climáticos para las ecorregiones semihúmedas y semiáridas, también reflejan la importancia relativa del estrés por sequía en estas ecorregiones. Por consiguiente, los indicadores de agua incluyen componentes como:

- (i) El balance de agua para proporcionar una medida del déficit de agua y la probabilidad de ocurrencia de sequía de diferente duración e intensidad.
- (ii) La calidad del agua, comprendiendo su conductividad eléctrica y la concentración y naturaleza de sales solubles presentes en el agua superficial y subterránea.

Los indicadores del clima son aquellos que están relacionados con:

- (i) Los contenidos energéticos del suelo, las temperaturas del aire y el suelo y la demanda de evaporación.
- (ii) La velocidad y dirección predominante del viento como indicativos de potencial erosión eólica.

3. Trópicos áridos. El estrés por sequía y el deterioro del recurso son los limitantes predominantes para el uso sostenible de los recursos suelo y agua en las ecorregiones áridas. Por consiguiente, tres grupos de indicadores listados en la Tabla 17, priorizan estos limitantes. Los indicadores más importantes del suelo comprenden:

- (i) El estrés por sequía medido según el balance de agua, duración de la época de crecimiento, recursos de agua superficial y subterránea y calidad del agua.
- (ii) La salinidad del suelo respecto a la conductividad eléctrica, concentración y naturaleza de las sales solubles en la zona radical, e indicadores del grado de salinidad de la planta.
- (iii) La erosión eólica relacionada con la textura y estructura del suelo, la estabilidad de las dunas de arena, y el efecto nocivo de la arena en árboles jóvenes.
- (iv) Los factores de la fertilidad del suelo incluyendo pH, el total de nutrientes disponibles para la planta y la profundidad de enraizamiento.

Por ser la disponibilidad de agua para las plantas y animales una limitante importante, las características relacionadas con irrigación, son importantes indicadores de sostenibilidad en los trópicos áridos. Estos indicadores incluyen:

- (i) La eficiencia de diseño respecto a las pérdidas por filtración y evaporación, los requerimientos hídricos del cultivo en las etapas fenológicas críticas de crecimiento y la planificación de la irrigación.
- (ii) Las características de drenaje del perfil y paisaje del suelo que influyen sobre los riesgos de salinidad, como se indicó, por los encharcamientos y la humedad del suelo, los desagües del drenaje y la posibilidad de reciclar el agua del drenaje para la irrigación y otros usos en la finca.
- (iii) Las características del nivel freático que comprenden el nivel y las fluctuaciones, la recarga acuífera y la calidad de agua especialmente respecto de los riesgos de salinización.

También se relacionan importantes indicadores climáticos sobre aridez y estrés por sequía. (Tabla 17). Los indicadores climáticos para las ecorregiones áridas incluyen:

- (i) La demanda de evaporación, como efecto de la temperatura del aire y del suelo, la radiación solar y la humedad relativa.
- (ii) Características del viento que comprenden la velocidad del viento y la dirección prevalente.
- (iii) La calidad del aire, especialmente respecto a la concentración del polvo.

Tabla 17. Indicadores del suelo y el agua para trópicos áridos y agricultura irrigada

PROCESOS / PARÁMETROS	INDICADORES
Suelo	
Aridez	Balance hídrico, períodos de crecimiento, fuentes de aguas superficiales y subterráneas, calidad de agua, temperaturas del suelo y ambiental
Salinidad	Concentración de sales en la zona de la raíz, naturaleza de las sales y SAR), lavado y lixiviación de sales, plantas indicadoras de salinidad
Erosión	Erosión eólica, textura y estructura, compactación, movimiento y estabilidad de dunas de arena, arena que causa daño a las plántulas
Fertilidad del suelo	pH, cantidad y disponibilidad de nutrientes para la planta, profundidad efectiva de enraizamiento
Pedregosidad superficial	Tamaño y concentración de piedras y agregados
Irrigación	
Tipo y disponibilidad	Eficiencia de diseño y requerimientos hídricos del cultivo, planificación del riego
Drenaje	Drenaje del perfil, características del drenaje superficial, salidas de los desagües, encharcamientos, reciclaje del agua de drenaje
Nivel frático	Grado y fluctuaciones del nivel freático y la recarga acuífera
Clima	
Aridez	Demanda de evaporación, temperaturas ambiental y del suelo, humedad relativa
Viento	Velocidad y duración de los vientos

La base mínima de datos de cada bioma/ecorregión puede ser diferente debido a las diferencias de los limitantes ambientales. La base de datos debe ser suficiente para indicar, en las características del suelo y del agua, las diferencias entre la degradación inducida por manejo Vs. el deterioro irreversible. Por otra parte, la base de datos también depende de los factores específicos del sitio que incluye los medios y el soporte institucionales.

En la Tabla 18 se listan las bases de datos, mínimas, para tres ecorregiones. Los indicadores importantes son aquellos que pueden medirse a través de

escalas espaciales, sistemáticas y temporales. Las bases de datos para las diferentes ecorregiones se basan en:

- (i) La fertilidad del suelo y las limitantes nutricionales, para los trópicos húmedos.
- (ii) La estructura pobre del suelo y las condiciones físicas adversas, que conllevan erosión y degradación edáfica y salinización, en los trópicos semihúmedos y semiáridos.
- (iii) Estrés por sequía, erosión eólica, y migración de dunas de arena en las regiones áridas.

Tabla 18. Datos mínimos necesarios para la valoración de la calidad del suelo en las principales ecorregiones en el trópico

Húmedos	Semihúmedos / semiáridos	Áridos
pH, acidez, saturación de bases	Estructura del suelo, densidad aparente, compactación, característica o sistema de cultivo	Agua disponible para las plantas, profundidad de raíces, compactación, sistema de cultivo, encostramiento
Densidad aparente, sistema de cultivo, tasa de infiltración, capacidad de agua disponible	pH, contenido de materia orgánica del suelo, disponibilidad de nutrientes para la planta	Temperatura del aire y del suelo
Cantidad y tasa de escorrentía, erosión hídrica	Erosión por viento y agua, erosión por cárcava	Evapotranspiración, velocidad del viento
Cantidad de lluvia e intensidad, radiación neta, temperatura de suelo	Balace de agua, escurrimiento, salinidad total y tipos de sales, temperatura del suelo y el aire, velocidad del viento, época de siembra	Agua superficial y subterránea y calidad de agua, pH y disponibilidad de nutrientes para la planta

XII. MÉTODOS DE VALORACIÓN DE INDICADORES

Los datos mínimos, reportados para la evaluación de la calidad del suelo (Lamp, 1986; Wagner *et al.*, 1991) son igualmente aplicables para la evaluación de la sostenibilidad en el uso de suelos y aguas. Los datos mínimos están listados en la Tabla 18 y pueden ser obtenidos por un amplio rango de métodos. Sin embargo la precisión, exactitud, la credibilidad y la relevancia de datos, son consideraciones importantes en la selección de métodos apropiados para la evaluación de indicadores. Además los procedimientos analíticos deben ser estandarizados para poder realizar en diferentes sitios y ecorregiones, mediciones comparativas.

Es igualmente importante que los indicadores de sostenibilidad del suelo y agua, se encuentren relacionados con los objetivos de la medición de los cambios en las características, causados por las diferencias en el uso del suelo y de los sistemas de manejo. Los indicadores apropiados igualmente deben reflejar una tendencia en el tiempo, de esas características, bajo diferentes sistemas de manejo. Los criterios relevantes para la selección del método más apropiado, se encuentran listados en la Tabla 19. Consideraciones importantes son la objetividad, credibilidad, relatividad, eficiencia, simplicidad, sensibilidad y reflectividad en relación con los efectos del manejo. Además, los métodos analíticos deben considerar la variabilidad espacial de los indicadores en forma sistémica y al azar. Los procedimientos de muestreo utilizados, deben asegurar representatividad en el sitio, de las características ecorregionales.

La medida de los indicadores debe ser bien diseñada y ejecutada correctamente con experimentos de manejo de suelos, de largo plazo. Los experimentos deben ser conducidos con iguales tratamientos de manejo y en el mismo sitio por lo menos durante 10 años consecutivos, preferiblemente por varias décadas. La tendencia en las diferencias en los indicadores de suelo y agua, inducidas por manejo, es decir, causadas por el estrés ambiental impuesto hasta cierto punto por diferentes tratamientos se desarrollan con base en el largo plazo. Son muy pocos los experimentos a largo plazo en el trópico (Lal y Stewart, 1994). También es importante que donde existan experimentos, estos se continúen y se mantengan; igualmente, deben iniciarse nuevos experimentos que llenen el vacío de conocimiento para ecorregiones y sistemas importantes de manejo. Los suelos y las ecorregiones en el trópico donde se necesita continuar o iniciar nuevos experimentos se listan en la Tabla 20. Los nuevos sitios deben ser cuidadosamente seleccionados para realizar

Tabla 19. Criterios para la selección de los métodos apropiados para el análisis de suelos y agua

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Objetividad	El dato obtenido está acorde con los objetivos
Credibilidad	Exactitud, precisión y credibilidad
Relatividad	Análisis comparativos entre sitios y ecorregiones basados en métodos standards.
Eficiencia	Efectividad en costos de procedimientos rutinarios y simples
Simplicidad	De fácil uso basado en un equipamiento simple, de fácil mantenimiento y simple para el análisis y la interpretación de datos
Cambios temporales	Los indicadores de tendencia en el tiempo son importantes para la sostenibilidad
Efectos de manejo	Datos que reflejan los efectos del uso y manejo de la tierra, sensitivos en el uso de la tierra y el suelo y adaptados a los diferentes sistemas de manejo de las cosechas
Sensitividad en los análisis	La interpretación de análisis es importante para la toma de decisiones especialmente con miras al uso de la tierra, sistemas de cosecha y entradas
Variabilidad	La sensibilidad para la variabilidad espacial en los indicadores es importante para la comprensión de los análisis y la valoración de las características del suelo
Complementaridad	Compatibilizada y acuerdo con la base de datos existente y complementariedad con las facilidades y equipos existentes

la compatibilidad y complementariedad con los ya existentes en otras áreas. Existe una falta prominente de sitios en el Sudeste Asiático, Occidente de Asia y Norte del Africa, Africa Central y Occidental, América Central y Sur América. En colaboración con organizaciones internacionales (FAO, UNDP, WORLD BANK) y centros del CGIAR , Institutos Nacionales de Investigación Agrícola (INIAs) deberían ser los encargados de establecer experimentos semejantes y asegurar su continuidad. Una red de trabajo efectiva y una buena coordinación es esencial para el desarrollar un manejo efectivo de los costos y la complementariedad de los datos obtenidos.

Tabla 20. Sitios sugeridos para el establecimiento de experimentos de largo plazo sobre manejo de suelo y agua en los trópicos

Ecorregión	Orden de suelo	Región geográfica
Húmeda	1. Oxisoles y ultisoles	Cuenca del Amazonas, cuenca del Congo, Sudeste de Asia
	2. Andisoles	América Central
	3. Alfisoles	Brasil, África Occidental, China
Semi-húmeda y semiárida	1. Alfisoles	África Occidental, India Central
	2. Vertisoles	África Oriental, India Central, Sudán
Aridas	1. Aridisoles	África Sub-Sahara, Norte del África
	2. Psamments	África Occidental, Asia Occidental

A. Valoración de indicadores físicos del suelo

La mayor parte de los atributos físicos del suelo deben ser medidos *in situ* bajo ciertas condiciones de campo o en secciones intactas o sin disturbar. La medición de la retención de humedad, transmisión de agua y propiedades estructurales preferiblemente deben ser tomadas en campo, pues existe una alta variabilidad espacial (Cassel, 1983) que puede cambiar las propiedades del suelo en el proceso de obtención de la muestra; esto es importante para proceder correctamente en la obtención y preparación de las muestras de suelo (Thomas, 1967; Soil Survery Staff, 1984). Se debe tener particular cuidado para hacer las correcciones apropiadas, donde sean necesarias, por los contenidos de grava y la fracción esquelética del suelo (Lal, 1979 A).

Los más importantes indicadores físicos del suelo y los métodos de valoración se relacionan en la Tabla 21.

- 1) **Textura:** La caracterización inicial de la textura del suelo es importante. Medidas posteriores pueden ser hechas cada 2 a 4 años, porque las características de textura del horizonte superficial son alteradas solamente si la erosión acelerada del suelo es un proceso degradativo predominante.

La erosión es un proceso selectivo que preferencialmente remueve arcilla y otras partículas finas dejando debajo la fracción gruesa y el material de esqueleto. La erosión severa puede también exponer el subsuelo a una composición textural diferente. Las medidas de la textura del suelo, deben ser hechas preferencialmente por el método de la pipeta (Gee y Baudir, 1986), con consideración especial para la remoción inicial de agentes cementantes

Tabla 21. Métodos sugeridos para la valoración de indicadores físicos del suelo

INDICADOR / ATRIBUTO	MÉTODO	REFERENCIA
Textura	Método internacional de la pipeta o método del hidrómetro, corrección para gravillas	Gee y Bauder (1986), Lal (19789a)
Condición de siembra	Índice de labranza, procesos de cultivo	Singh <i>et al.</i> (1992); Karlen <i>et al.</i> (1990)
Estructura del suelo	(i) WSA > 1 mm y MWD	Kemper y Rosenau (1986); Edwards and Bremmer (1967)
	(ii) Densidad aparente usando núcleos sin disturbar	Blake y Hartge (1986); Manrique y Jones (1991)
	(iii) Rango no limitante de humedad del suelo	Letey (1985)
	(iv) Permeabilidad del aire	Corey (1986)
	(v) Conductancia de costras	Falayi y Bauma (1976); Hanks y Thorp (1956)
	(vi) Índices estructurales	Lal (1991)
Capacidad de retención de agua	(i) Capacidad de campo <i>in situ</i>	Klute (1986); Baver <i>et al.</i> , (1972)
	(ii) Punto de marchitez permanente	Bruce y Luxmoor (1986); Klute (1986)
Profundidad radical	Método de ruptura de núcleo	Bohm (1979)
Transmisión de agua	(i) Conductividad hidráulica saturada sobre muestras no disturbadas	Klute y Dirksen (1986)
	(ii) Tasa de infiltración (doble anillo)	Klute (1986)
Resistencia del suelo	(i) Resistencia a la penetración a un conocido contenido de humedad	Blake y Hartge (1986); Bradford (1986)

en suelos bien estructurados, ejemplo: sesquióxidos, materia orgánica, materiales calcáreos y silíceos, etc.

2) Condición (de siembra) del suelo: La condición física o condiciones de siembra del suelo es a menudo difícil de cuantificar (Karlen, *et al.*,

1990). La condición de siembra, puede ser cuantificada valorando los procesos de formación de la condición de siembra (Karlen et al, 1990) o computando el índice de siembra o labranza (Singh et al, 1992). El índice de siembra va desde 0 (ambiente óptimo o sin limitaciones para la raíz) a 1 (restricción para la raíz y no apto para el desarrollo de la planta).

3. Reservas de agua del suelo: La diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente es expresada con base en el volumen o lámina (Ritchie, 1981; Gupta and Larson, 1979a; Bruce and Luxmoore, 1986; Cassel and Nielsen, 1986; Klute, 1986). La capacidad de campo, límite superior de contenido de agua disponible, debe ser determinada en campo después de que a un suelo saturado se ha permitido drenar el agua por gravedad y sin evaporación superficial. Aunque logísticamente difícil, la capacidad de campo puede ser determinada en el laboratorio con núcleos de suelo intactos usando platos extractores de presión. El potencial de humedad del suelo para determinar capacidad de campo puede ser de 0.006 a 0.01 megapascuales (Mpa) para suelos de texturas gruesas y de 0.03 a 0.05 megapascuales para suelos de texturas finas o pesados. El punto de marchitez permanente, puede ser determinado sobre muestras de suelo disturbadas y tamizadas a un potencial de humedad de 0.5 a 1.5 megapascuales dependiendo de la textura del suelo (Lal, 1979a). La medida *in situ* del régimen de humedad es un reto en los suelos altamente variables de los trópicos. La técnica de la termalización neutrónica no es adaptable para muchos suelos, como suelos con alta concentración de Fe, B y Mn; suelos con horizontes de grava, suelos arcillosos cuarteados (Lal, 1974; 1979b). Los bloques de yeso tienen problemas para su uso en suelos ácidos. La caracterización exacta del régimen de humedad del suelo aún sigue siendo un reto. Aunque dispendioso y destructivo, el método gravimétrico es la técnica más confiable.

4. Estructura del suelo: Es un atributo complejo y difícil de cuantificar. Lal (1991) propuso varios índices de valoración de la estructura del suelo, y varias técnicas y métodos conceptuales han sido sugeridos y descritos por Blake y Hartge (1986) y Kay (1989). Los atributos morfológicos de la estructura del suelo involucran agregación y la distribución y tamaño de los agregados. Estos atributos pueden ser medidos mediante técnicas de tamizado en húmedo o en seco (Kemper y Rosenau, 1986), y los resultados pueden ser expresados como porcentaje de agregados estables en agua (% WSA) más grandes, de 0.5 mm a 1.0 mm, de tamaño. Los datos también pueden ser computados en términos del diámetro de peso medio (MWD) o diámetro geométrico medio (GMD).

Los atributos funcionales de la estructura del suelo se determinan mejor evaluando porosidad total y macroporosidad y la distribución del tamaño de poros. Determinar la distribución del tamaño de poros es un aspecto importante de la caracterización estructural (Olson, 1985 - 1987; Olson y Zobeck, 1989). La macroporosidad y porosidad drenable medida a 0.006 megapascuales de succión o a 0.01 megapascuales de succión es una medida de la habilidad del

suelo para transmitir agua o su susceptibilidad a la anaerobiosis. La distribución del tamaño de poros puede ser determinada de la curva característica de retención de humedad del suelo (Child y Collins-George, 1951).

5) Dureza del suelo y profundidad radical: La compactación del suelo es medida directamente de la densidad aparente del suelo (Blake y Hartge, 1986) o puede ser predicha de la distribución del tamaño de partículas (Gupta y Larson, 1979b). La dureza del suelo y el adensamiento afecta el crecimiento de la raíz y su desarrollo. La dureza del suelo puede ser evaluada indirectamente por medio de medidas de la resistencia a la penetración expresada en kg/cm² o kilopascales (Bradford, 1986). La evaluación de la resistencia a la penetración debe relacionarse siempre con el contenido de humedad del suelo medida a ese tiempo. La dureza del encostramiento también puede ser evaluada determinando la resistencia a la penetración. La conductividad del encostramiento es igualmente un indicador útil en relación con el crecimiento del cultivo (Falayi y Bonena, 1975). Otra medida indirecta de la compactación y dureza del suelo relacionada al crecimiento y desarrollo de la raíz es la densidad aparente o relación peso / volumen.

La profundidad radical efectiva es un indicador importante de la productividad del suelo y puede ser evaluada de las características del suelo (Groenerelt *et al.*, 1984). La profundidad radical también varía entre especies y cultivares (Taylor y Terrel, 1982). Las características restrictivas del enraizamiento en el suelo pueden estar relacionadas con atributos físicos, químicos y nutricionales. Fisicamente, las capas del suelo de densidad aparente o resistencia alta, restringen o limitan el crecimiento de la raíz. La profundidad de penetración de la raíz se puede determinar por varios métodos (Bohm, 1979). Un método comúnmente usado, simple y práctico, es el basado en obtener bloques del suelo y contar las raíces en los bordes rotos naturalmente. Este método es llamado el método de " rompimiento de núcleo". El dato se expresa apropiadamente como densidad de la longitud de raíces.

6. Propiedades de transmisión del agua. Las características de transmisión del agua también pueden ser determinadas midiendo la conductividad hidráulica saturada (K_S) o no saturada (K_o) de bloques sin disturbar en el laboratorio. La conductividad hidráulica también puede ser determinada bajo condiciones de campo utilizando el método del "pozo barrenado" bien sea sobre o bajo el nivel freático (Klute, 1980). Existen también varios modelos para predecir la permeabilidad del suelo (Child y Collis George, 1950; Marshall, 1958; Millington y Quirk, 1961; Green y Corey, 1971; Mckeage *et al.*, 1982). Un indicador integrador de varios atributos físicos del suelo es la tasa de infiltración. La tasa infiltrada, el equilibrio de la tasa de infiltración obtenida después de mantener una cabeza constante de agua sobre la superficie del suelo por cerca de 3 horas, es una medida de la habilidad de los suelos para recibir agua en la interfase suelo - aire y transmitirla a través del perfil. La tasa de infiltración puede ser con flujo controlado (dependiendo de la tasa de aplicación de agua a la superficie, por

lluvia o riego) o controlada en el perfil. Un indicador apropiado de las características de transmisión de agua es la tasa de infiltración controlada en el perfil, determinada en el campo bien sea por medio de los anillos dobles infiltrómetros o con un simulador de lluvias (Lal, 1979 S). Es útil, analizar los datos de infiltración de acuerdo con varios modelos, ejemplo, Kostiaikov, Green-Ampt y Horton, etc. (Lal, 1979 b).

B. Valoración de indicadores químicos y nutricionales del suelo

Los métodos comúnmente usados para determinar las propiedades químicas y nutricionales se describen en la Tabla 22. La importancia relativa de los indicadores químicos y nutricionales varía entre suelos, ecorregiones y objetivos.

Tabla 22. Métodos para determinar indicadores químicos y nutricionales del suelo

INDICADOR / ATRIBUTO	MÉTODO	REFERENCIA
pH	Electrodo de vidrio, electrodo calomel, medidor de pH, potenciómetro	Mc Lean (1982)
Carbono orgánico total	Método de combustión húmeda	Nelson y Sommers (1983)
Carbono orgánico activo	Digestión con KCl	Gianello y Bremner (1986)
ECEC	Sumatoria de cationes intercambiables	IITA, 1975; Page (1982)
Nitrógeno del suelo	Método químico	Gianello y Bremner (1986); Stanford (1982)
Nutrientes disponibles para la planta	Análisis de suelo	Engelsted, 1986; Thomas (1967)
Conductividad hidráulica y sales solubles totales	Medidor de Ohms	U.S. SLS (1954); Rhoades (1986)

1. **pH y acidez:** La reacción del suelo, un indicador importante de la salud química del suelo, puede ser determinada midiendo el pH del suelo. La reacción del suelo también determina la solubilidad y disponibilidad de algunos elementos y deficiencia o toxicidad de otros. Un pH bajo de 4.5 a

5.5, indica la posibilidad de altas concentraciones de aluminio intercambiable. En contraste, un pH alto de 7.5 a 8.5, es indicativo de la presencia de carbonatos libres de calcio. El pH del suelo puede ser determinado utilizando un medidor de pH en agua 1:1 o en suelo: 0.01 McaCl₂ en suspensión (McClean, 1982).

- 2. Carbono orgánico del suelo:** La cantidad y naturaleza del contenido de carbono orgánico del suelo juega un papel importante en la calidad del suelo (Larson y Pierce, 1922; Parr *et al.*, 1992). Aunque el carbono orgánico no es un nutriente de la planta, bajas concentraciones (0.5 - 1% por peso) pueden tener serios efectos sobre la productividad (Stevenson, 1982; Allison, 1973). Sin embargo, los efectos en la productividad de pequeños cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo, son insignificantes en los suelos con antecedentes de concentraciones altas, en exceso del 5%, por ejemplo Mollisoles o Histosoles, etc. El carbono orgánico del suelo afecta la productividad a través de su efecto sobre la estructura del suelo, capacidad de agua disponible para la planta, como fuente o extractor para los nutrientes de la planta y como un amortiguador contra las fluctuaciones súbitas en las características del suelo.

Adicionalmente al carbono orgánico total del suelo determinado por los métodos de combustión seca o húmeda (Gianello y Bremner, 1986) también es importante para determinar el carbono activo o de biomasa. El carbono de biomasa es el más sensible a las diferencias en los sistemas de manejo y uso de la tierra. Los efectos del manejo y uso de la tierra debieran ser valorados en términos de cantidad y composición del contenido de materia orgánica del suelo.

La fracción activa de carbono orgánico va desde 10 al 20% del contenido de carbono orgánico total. A pesar de sus efectos benéficos ampliamente conocidos es difícil incrementar el contenido de carbono orgánico del suelo especialmente en trópicos áridos y semiáridos. Grandes cantidades y aplicaciones frecuentes de residuos de cosechas y biomasa son necesarios para mantener e incrementar ligeramente el contenido de carbono orgánico del suelo en aquellas ecorregiones duras y con ambientes ecológicamente sensibles.

- 3. Capacidad de nutrientes y factores de intensidad:** La baja fertilidad del suelo es el factor más responsable de la baja productividad del suelo en los trópicos. Las reservas totales de nutriente (capacidad) y la disponibilidad de nutrientes (intensidad) son indicadores importantes de la calidad y productividad del suelo. Los factores intensidad y capacidad deben ser evaluados para todos los nutrientes esenciales, es decir, macro nutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes (Zn, S, Cu, B, etc). La toxicidad de elementos (ejemplo: altas concentraciones de algunos elementos) es un aspecto importante de la calidad y productividad del suelo en varios suelos de los trópicos húmedos y subhúmedos, ejemplo: Oxisoles y Ultisoles. El potencial de suministro de nutrientes del

suelo debe ser determinado por medio de procedimientos estándares (Engelstal, 1985; Page, 1982). La validación de estos procedimientos es esencial para condiciones locales relevantes al suelo, cultivo y otros factores agroecológicos. La capacidad de mineralización de N y la capacidad de fijación de P son factores importantes de la productividad del suelo. Baja disponibilidad de P y alta capacidad de fijación del mismo, son severas limitantes en varios suelos principales de los trópicos, como suelos ácidos en América Latina.

- 4. Sales solubles y conductividad eléctrica:** La alta concentración de sales en la zona de raíces es una severa limitante en muchos suelos de regiones áridas y semiáridas. Por tanto, el conocimiento del estado de salinidad y alcalinidad de esos suelos es extremadamente relevante con respecto a la calidad y productividad del suelo. La conductividad eléctrica de una pasta saturada es una buena medida de la concentración total de sales (Rhoades, 1982). En adición al total de sales, la naturaleza de las sales (ej: Na vs. Ca y Mg) es también importante, especialmente en relación con la estructura del suelo. La rata de absorción de sodio (SAR) es un buen indicador de la alcalinidad potencial y actual del suelo. Se requiere determinar empírica y específicamente para cada cultivo los límites críticos para la conductividad eléctrica y la concentración de sales (Gupta y Abrol, 1990). El crecimiento y la predominancia de las especies de plantas halomórficas, también puede ser usado como indicador del estado de la relación salinidad / alcalinidad.

C. Valoración de la fauna del suelo

La fauna del suelo juega un papel importante en la estructura del suelo, reciclaje de nutrientes y la dinámica del contenido de materia orgánica del suelo. La macrofauna del suelo, la actividad de comprensión y la diversidad de especies de lombrices de tierra y termitas, son un indicador del suelo, importante para el uso sostenible de los recursos suelo y agua (Lal, 1987; Lavelle et al, 1992). La actividad y población de la macrofauna, debe ser medida por métodos no destructivos de tamizado. El uso de químicos para extraer estos organismos del suelo, aunque es un método rápido y fácil, es destructivo y no es una técnica precisa.

D. Valoración de la erosión del suelo

A pesar de su importancia o amenaza a la sostenibilidad y la voluminosa literatura disponible sobre la materia, la evaluación de la erosión del suelo, parece más un arte que una ciencia. Los datos reportados en la literatura son obtenidos por un amplio rango de técnicas no estandarizadas. La exactitud y credibilidad de los datos son los mayores limitantes para precisar la magnitud del problema de la erosión del suelo. Sin embargo a pesar de los esfuerzos

hechos hacia la estandarización de las técnicas de evaluación de erosión (Lal, 1994), la credibilidad de los datos es un gran reto en la caracterización potencial y actual de los riesgos de erosión del suelo.

Técnicas apropiadas de campo y laboratorio, de medición de la magnitud y tasa de erosión del suelo por el viento o el agua se describen en el manual de Lal (1994). Aparentemente, las técnicas apropiadas son aquellas que pueden ser usadas en varios suelos y a través de diferentes escalas temporales y espaciales. Algunos métodos comunes de valoración de la erosión a diferentes escalas espacio-temporales son descritos en la Tabla 23.

Tabla 23. Técnicas para la valoración de la erosión con diferentes escalas espaciales

ESCALA	TAMAÑO	TÉCNICAS
Parcelas mínimas	1 - 2 m ²	Simulación de lluvias
Microparcela	1 - 10 m ²	Parcelas de escorrentía, técnica de enterrada
Parcelas de campo	10 - 100 m ²	Parcela de escorrentía de campo, marcado fluorescente, técnica de la puntilla enterrada y sistema multidivisor
Ladera	0.01 - 0.5 ha	Canaletas, registro de agua, muestreador de escorrentía
Cuenca agrícola	0.5 - 5.0 ha	Canaletas, registro de agua, muestreador de escorrentía
Cuencas agrícolas grandes y vegas de río	> 100 has	Compuertas, medida de la altura, muestreador de sedimento, sensores remotos

La calibración del equipo en campo y la medición exacta después de cada tormenta son críticas para obtener datos confiables. La concentración de sedimentos en cauces y ríos también puede ser determinada por medio de técnicas de sensores remotos utilizando imágenes satelitales. Una apropiada calibración de esta técnica, es esencial para la medición confiable de la variabilidad espacio - temporal en depósitos de sedimento. Sin embargo, esta técnica puede no ser aplicable, para medidas de la carga en el lecho o cauce.

La erosión del suelo también puede ser medida por varios modelos paramétricos y conceptuales (Tabla 24). Los modelos comúnmente usados para erosión eólica son la ecuación de erosión eólica (WEQ), la ecuación revisada de erosión eólica (RWEQ) y el sistema de predicción de erosión eólica (WEPS) o el modelo de investigación de la erosión eólica (WERM). Los pros y contras y métodos para su uso, son descritos por Skidmore (1994) , Skidmore *et al.* (1994). La WEQ, aunque ampliamente usada, es un modelo empírico y de caja negra y puede tener aplicaciones limitadas.

Tabla 24. Modelos de predicción para valorar la erosión del suelo

PROCESO DE EROSIÓN	MODELO	REFERENCIAS
Erosión eólica		
Promedio anual estimado de la erosión del suelo	La ecuación de la erosión eólica (WEE)	Woodruff y Siddoway (1965)
Modelo orientado a procesos	i) Sistema de predicción de erosión eólica (WEPS)	Skidmore <i>et al.</i> (1994)
	ii) Modelo de investigación de erosión eólica (WERM)	Skidmore <i>et al.</i> (1994)
Erosión hídrica		
Modelos paramétricos	i) Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)	Wischmeier y Smith (1978)
	ii) Ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE)	Foster (1982); Renhard <i>et al.</i> (1994)
	iii) Ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE)	William (1975)
Modelo conceptual	i) Proyecto de predicción de Erosión Hídrica (WGPP)	Nearing <i>et al.</i> (1994)
	ii) Modelo Griffith	Rose (1994)
Manejo de la cuenca	i) RESPUESTAS	Beasley <i>et al.</i> (1980)
Erosión del suelo - Productividad de cultivos		
Modelo paramétrico	i) Índice de productividad (PI)	Pierce <i>et al.</i> (1983)
	ii) Theprom	Biot (1990)
Modelos conceptuales	i) Cálculo del impacto de la erosión en la productividad (EPIC)	Williams <i>et al.</i> (1983; 1984)
Modelo de productividad y ambiente	CREAMS	Knisel y Foster (1981)

Los aspectos dinámicos de la erosión eólica son valorados por modelos basados en procesos WEPS y WERM. Sin embargo, los índices climáticos, del suelo y los coeficientes de cultivo deben ser obtenidos para condiciones locales.

La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) es también un modelo empírico y de caja negra. El modelo estadístico, desarrollado para suelo y ambiente agroecológico del oeste medio de los Estados Unidos, tiene una aplicación limitada y ha sido ampliamente utilizado para situaciones donde es menos aplicable. El modelo original ha sido revisado (RUSLE; Renard *et al.*,

1994) y modificado (MUSLE) para resolver algunas limitantes; sin embargo, la aproximación conceptual del proyecto de predicción de erosión hídrica (WEPP) lo hace un modelo basado en proceso y más relevante para situaciones diferentes. A pesar de todo, el conocimiento de los parámetros locales de clima y suelo es tan crítico que amerita y justifica el uso de cualquier modelo.

La severidad de la erosión del suelo puede ser medida solamente por medio de la valoración de los efectos en y fuera del sitio. Los principales efectos de la erosión acelerada, en el sitio, están relacionados con la reducción en la productividad del cultivo. Sin embargo, información cuantitativa acerca de los efectos de la erosión sobre la productividad del cultivo, no está disponible para la mayoría de los suelos, cultivos y ecorregiones de los trópicos.

Varias técnicas están disponibles para evaluar el impacto de la erosión del suelo sobre el rendimiento del cultivo (Lal, 1987; Pierce y Lal 1994). Las técnicas de campo están basadas en medidas experimentales del desarrollo del cultivo en parcelas de erosión, para las cuales se conoce la cantidad exacta de pérdida de suelo. Los efectos de la erosión en el rendimiento, también pueden ser medidos estimando la erosión en parcelas de campo por medio de técnicas de análisis de suelo y monitoreo del desarrollo del cultivo bajo sistemas recomendados de manejo. Diferentes niveles de erosión del suelo también pueden ser simulados por remoción artificial del suelo y evaluando sus efectos sobre el crecimiento del cultivo y el rendimiento. Las técnicas basadas en la erosión del suelo simulada, a menudo proveen efectos no naturales e inexactos de la erosión sobre la productividad.

Hay varios modelos disponibles para estimar el impacto de la erosión sobre la productividad (Pierce y Lal, 1994). Un modelo comúnmente usado es el Índice de Productividad (PI) desarrollado por Pierce *et al.* (1983). Este modelo paramétrico se basa en información cuantitativa sobre las características del perfil del suelo hasta por lo menos 1.0 m de profundidad. Estas características incluyen pH, profundidad radical, carbono orgánico del suelo, capacidad de agua disponible, etc. Sin embargo, la aplicación de esta técnica relativa y paramétrica puede ser cuestionable para varios suelos de los trópicos.

Varios modelos orientados a procesos (ejemplo: EPIC y CREAMS) requieren de una gran base de datos de suelo, clima y de parámetros de crecimiento del cultivo. Por lo tanto, medidas de campo de los efectos de erosión sobre la productividad se requieren para los principales suelos y cultivos de los trópicos, para diferentes sistemas de manejo y niveles de insumo. El uso de modelos de simulación es un atajo viable, siempre y cuando los parámetros apropiados sean conocidos. Los modelos no tienen como propósito sustituir los datos experimentales de experimentos de campo bien diseñados.

XIII. DISEÑO DEL MUESTREO Y FRECUENCIA DEL MONITOREO

La caracterización inicial de base, o evaluación de los antecedentes de las condiciones del sitio experimental, es crucial para medir objetivamente los cambios inducidos por manejo, en los indicadores del suelo. Adicional a las condiciones del suelo también es importante registrar la historia del uso de la tierra y realizar un levantamiento topográfico a 0.5 o 1.0 m de intervalo entre curvas. Un mapa de suelos detallado también debe ser preparado a escalas 1: 1500 o 1: 2500.

Para medir las propiedades del suelo, se debe diseñar una cuadrícula de muestreo de 25 m X 25 m. El tamaño de la cuadrícula puede ser menor, para un sitio con variaciones altas. Se puede usar un diseño de transecto para un terreno ondulado o sitio con fuerte pendiente. La orientación del transecto es usualmente normal al contorno desde la cresta de la ladera al fondo del valle.

El muestreo de suelo puede ser también hecho con base en unidades de mapeo. Este último es una parcela de tierra de varias hectáreas. Una unidad de mapeo, sin embargo, puede contener varias series de suelo con alta variabilidad espacial en las propiedades del suelo (Cassel y Fryrear, 1990).

La variabilidad puede ser natural o introducida por el manejo, ejemplo: cambio en la densidad aparente debido a las llantas del tractor (Cassel, 1983). Sin embargo, algunas propiedades son más variables que otras. Wilding (1988) listó la variabilidad de varias propiedades del suelo dentro de una unidad de mapeo (Tabla 25). Considerando la magnitud de la variabilidad, Wilding agrupó las propiedades del suelo en tres categorías: (i) propiedades menos variables con coeficiente de variación (CV) menor de 15%, (ii) moderadamente variables con un coeficiente de variación de 16 a 35%, y (iii) propiedades altamente variables, con un coeficiente de variación de 36 a 70%.

La valoración de los cambios temporales en las propiedades del suelo, es preferible realizarla a nivel del pedón. El objetivo es muestrear exactamente el mismo sitio en un tiempo dado, para que los cambios inducidos por el manejo en las propiedades del suelo o en los indicadores de sostenibilidad, puedan ser cuantificados y establecer tendencias.

Los tratamientos de manejo deben ser establecidos preferiblemente sobre las mismas series o asociaciones de suelos. Los tratamientos deben montarse

Tabla 25. Variabilidad relativa de las propiedades del suelo seleccionadas y muestreadas dentro de las unidades de mapeo de las series de suelos

Propiedad del suelo	Coeficiente de variabilidad (%)	
	Media	Rango
Densidad	7	5 - 13
pH	10	5 - 15
Espesor del horizonte A (cm)	10	8-13
Retención de humedad (33 kPa.)	18	10-31
Contenido total de arena (%)	25	8 - 46
Contenido total de arcilla (%)	25	10-31
Contenido de materia orgánica	39	20-61
Profundidad del suelo (cm)	43	25-58

de acuerdo con un diseño de bloques al azar con 3 a 6 replicaciones, dependiendo de la variabilidad de las propiedades del suelo en el sitio. Suelos con alta variabilidad requieren más replicaciones que suelos relativamente uniformes. También puede ser usado un diseño en parcelas divididas imponiendo los tratamientos más críticos a nivel de parcela principal. Diseños en franjas también pueden ser utilizados en el establecimiento de tratamientos que requieran de un tamaño de parcela grande. Tales diseños, sin embargo, son ineficientes para la computación y el análisis de varianza (ANOVA).

La frecuencia del monitoreo es importante para establecer las tendencias de cambio en el tiempo, de los indicadores de suelo, inducidos por manejo. La frecuencia del monitoreo depende de la naturaleza del indicador. Algunos indicadores son altamente disponibles y registran cambios rápidos en corto tiempo, otros son estables y los cambios son observables ligeramente, después de varios años. La tasa de cambio de algunas características del suelo e indicadores han sido descritas por Arnold *et al.* (1990). Muchos indicadores físicos de suelo cambian en menos de 0.1 año. La transmisión y retención de humedad y las reservas de nutrientes cambian entre 0.1 y 1 año. Hay varias propiedades que pueden cambiar en un espacio de tiempo geológico. La frecuencia de monitoreo descrita en la Tabla 26, está basada en este concepto de cambio relativo en los indicadores. Estos indicadores están agrupados en 5 categorías. Algunos indicadores físicos de suelo como: humedad y temperatura de suelo registran cambios diarios, mientras que otros como la densidad aparente y la porosidad cambian estacionalmente. En contraste, los cambios en la estructura del suelo son relativamente lentos y solo son medibles en un lapso entre

Tabla 26. Frecuencia de monitoreo sugerida por los indicadores de suelo

Indicador de suelo	Frecuencia de monitoreo sugerida
Indicadores físicos del suelo	
Humedad del suelo	Semanalmente
Densidad aparente y resistencia a la penetración	Estacionalmente
Conductividad hidráulica	Anualmente
Estructura	1 a 2 años
Infiltración	1 a 2 años
Capacidad de almacenamiento de agua disponible	3 a 5 años
Textura	3 a 5 años
Indicadores químicos del suelo	
pH	Estacionalmente
Nitrógeno total	1 a 2 años
Disponibilidad de nutrientes	1 a 2 años
CIC	1 a 2 años
Indicadores biológicos del suelo	
Actividad de lombrices	Cada estación
Carbono de la biomasa	1 a 2 años
Carbono orgánico del suelo	1 a 2 años
Indicadores de cultivo	
Rendimiento	Estacionalmente
Crecimiento de raíces	Estacionalmente
Nivel de nutrientes	1 a 2 años
Microclima	
Temperatura de suelo	Diaria y estacionalmente
Temperatura del aire	Diariamente
Evaporación	Diariamente
Cantidad de lluvia	Estacionalmente
Intensidad de lluvia	Máximo cada 5 0 10 minutos

1 y 2 años. Los cambios en la textura del suelo son extremadamente lentos y usualmente son causados por una aceleración de los procesos de erosión de la superficie del suelo. Estos cambios de textura son difícilmente observables y solo se logra después de un período de 3 a 5 años.

Para los suelos que predominantemente contienen baja actividad de arcillas los cambios en el pH y acidez pueden ser relativamente rápidos; por lo tanto, los cambios en el pH del suelo se deben monitorear en cada estación, en tanto que los cambios en la concentración total y disponible de nutrientes son relativamente lentos y pueden ser cuantificados en períodos de 1 a 2 años. A menos que los procesos degradativos predominantes sean acelerados por la erosión del suelo, los cambios en los contenidos de la materia orgánica del suelo, son relativamente lentos y la frecuencia de monitoreo debe ser cada 1 ó 2 años. El carbono de biomasa cambia drásticamente y puede variar con el cambio de estación. Los cambios en la población de lombrices son altamente influenciados por el cambio de estación.

El rendimiento del cultivo y los parámetros de producción, deben ser registrados en secuencia para cada cultivo, Los niveles de nutrientes en los cultivos pueden ser medidos, usualmente durante la floración y sobre tejidos específicos una vez en cada estación. El crecimiento de raíces debe ser medido estacionalmente, usualmente en la fase reproductiva. La mayoría de los indicadores climáticos son medidos diaria o estacionalmente.

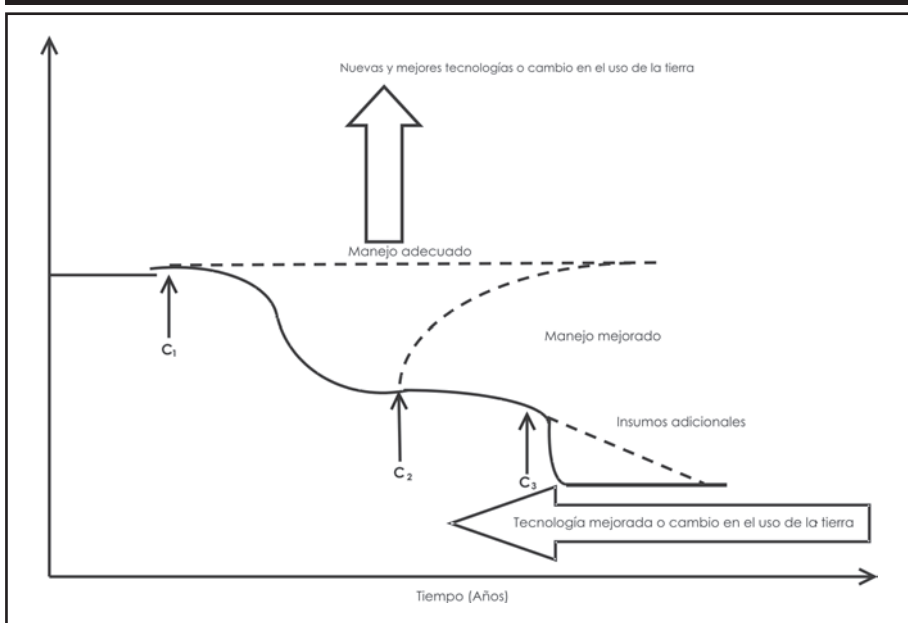
XIV. BASES CONCEPTUALES PARA DEFINIR NIVELES CRÍTICOS DE LOS INDICADORES DE SUELO Y AGUA

Una vez desarrollado un conjunto mínimo de base de datos estandarizados, es importante interpretar la información desde el punto de vista de la potencialidad y las limitaciones del recurso y evaluar el uso apropiado de la tierra y el suelo, lo mismo que los sistemas de manejo de cultivos. El desarrollo y el fortalecimiento de la base de datos es un proceso permanente y continuo. La base de datos disponible debe ser interpretada desde el punto de vista del uso de la tierra buscado e incluyendo la producción, la regulación ambiental, la calidad del agua, etc. La valoración de la potencialidad y las limitantes del recurso para los diferentes usos de la tierra, se hace con base en el conocimiento del nivel crítico de los indicadores de agua y suelo.

El nivel crítico de un indicador o un atributo se define como el nivel más allá (superior o inferior), en el cual la producción del cultivo o animal, declinan rápidamente. El nivel crítico puede también ser definido en términos de la severidad de la degradación. El límite inferior del nivel crítico es aquel en que el valor de degradación es alto, pero la tendencia puede revertirse. El límite superior del nivel crítico se refiere al punto de no retorno o degradación irreversible del suelo. El esquema en la Figura 13 identifica tres categorías de niveles críticos. El nivel crítico C, muestra las condiciones del suelo en donde la producción u otras funciones económicas comienzan a retardarse y registra una significativa declinación. A este nivel la productividad comienza a declinar aún con sistemas recomendados de manejo. Sin embargo, la producción puede mantenerse con la adopción e implementación de mejores prácticas de manejo. A este nivel, cambios en el uso de la tierra, o la adopción de nuevos cultivos o de técnicas innovadoras pueden transformar drásticamente la capacidad de producción a otro plano.

Si no se adoptan mejores técnicas de manejo en el nivel crítico 1, las tendencias degradativas del suelo continuarán hasta el nivel crítico 2, donde la producción alcanza un nivel económicamente bajo. No es lo más económico continuar con el mismo sistema de cultivo o con sistema tradicional del agricultor o con los sistemas recomendados de manejo. Sin embargo, la adopción de un mejor sistema de manejo o de uso de la tierra, puede mejorar la producción y reducir la tendencia degradativa. El nuevo o el sistema alternativo de uso de la tierra, sin embargo, puede no ser social o políticamente aceptable al no satisfacer las necesidades económicas y culturales. Si el uso de la tierra,

Figura 13. Diferentes tipos de niveles críticos relacionados con uso de la tierra y sistemas de manejo



tradicional o convencional, continúa y el proceso de la degradación no disminuye, el suelo pierde calidad llegando al nivel crítico 3. Este es un punto de no regreso y el suelo se degrada irreversiblemente.

La capacidad y calidad productiva de un suelo a este nivel no pueden ser cambiados aún con la adopción de un sistema mejorado de manejo y con insumos adicionales. Allí se puede, sin embargo, tener otros usos de la tierra que pueden producir algunos bienes y servicios útiles. Los cultivos de árboles y arbustos han tenido resultados exitosos en regiones de alta presión demográfica, que tienen suelos severamente degradados y superficiales. Esta solución, requiere de técnicas especiales de manejo ej., excavar fosas profundas y llenarlas con la materia orgánica y compostaje con anterioridad al establecimiento de siembra, y usando riego suplementario por lo menos durante las etapas iniciales. El hambre y la presión demográfica determinan estos usos alternativos de la tierra. Sin embargo, el impacto ambiental adverso puede ser drástico, aún con estos sistemas alternativos de uso de la tierra.

Los niveles críticos de los indicadores de suelo, deben definirse en términos del retorno cuantificable de bienes y servicios e.j., producción, capacidad de regulación ambiental. Lamentablemente se desconocen los niveles críticos relacionados con funciones económicas y ambientales para la mayoría de los suelos y las ecorregiones de los trópicos. Es preciso aclarar

que estos niveles aún no se conocen en los países avanzados tecnológicamente de Norte América y de Europa Occidental, para varias ecorregiones, suelos y diversos usos de la tierra. Aunque se ha hecho algún progreso con la obtención inicial de estimados regionales y globales de la magnitud de la degradación del suelo por diferentes procesos (Oldeman, 1991.192; WRI, 1992.93), esta información es una conjetura cualitativa, elaborada con base en la experiencia y no en datos.

Los niveles deben ser definidos en términos de la pérdida en producción o de cualquier función económica o ambiental del suelo. La producción y la productividad son función del uso de la tierra, del manejo y de la intensidad y cantidad de insumos. Por lo anterior una evaluación objetiva de la severidad de un proceso degradativo y de la calidad del suelo, sólo puede hacerse en términos de la pérdida económica de bienes y servicios. Un ejemplo de este tipo de matriz, para valorar la severidad de la degradación del suelo, aparece en la Tabla 27. El nivel de pérdida de productividad sugerido, puede variar entre suelos, ecorregiones y sistema de uso de la tierra.

Tabla 27. Ejemplo de una matriz para valorar cuantitativa y objetivamente la degradación del suelo con relación a la productividad

Clase de degradación	Pérdidas en productividad para un manejo recomendado basado en la ciencia (%)		
	Uso agronómico de la tierra 1	Función ambiental	Uso cultural
Ninguna	Ninguno	Indicador cuantitativo de pérdida	
Ligera	0 - 10		
Moderada	10 - 25		
Fuerte	20 - 50		
Muy fuerte	> 50		

Las magnitud de las pérdidas deben ser, sin embargo, cuantificadas y estandarizadas. La matriz de la Tabla 28 muestra un ejemplo de un sistema de medición cualitativa y subjetiva, de la degradación del suelo. La valoración cuantitativa de la erosión del suelo se basa en el uso de modelos empíricos (ej., USLE o WEQ). Estos estimados casi nunca se basan en la tasa de erosión medida en campo. De una manera similar, la extensión y los tipos de erosión son estimados, por muestreos hechos en escalas muy grandes, 1:1.000.000 o 1:5.000.000 o superiores.

Tabla 28. Ejemplo de una matriz de valoración cualitativa y subjetiva de la degradación del suelo sin considerar la productividad y las funciones ambientales

Clase de degradación	Magnitud de la erosión del suelo	
	Cualitativa (Mg/ha/año)	Cobertura del área (%)
Ninguno	0 - 5	0 - 5
Ligera	5 - 10	5 - 10
Moderada	10 - 20	10 - 20
Fuerte	20 - 100	20 - 30
Muy fuerte	> 100	30 - 40

Esta información es útil para que el público en general se concientice de la magnitud del riesgo percibido, pero su uso es muy limitado en el planeamiento del uso de la tierra y en la definición de opciones de política para mejorar el manejo o la restauración de la tierra. Estos estimativos cuantitativos y subjetivos pueden llevarnos a conclusiones erróneas y errores costosos y desastrosos para el medio ambiente. La mala información no es sustituto de la no información.

XV. NIVELES CRÍTICOS SUGERIDOS PARA LOS INDICADORES CLAVES

Es sumamente importante establecer el criterio apropiado para el establecimiento de niveles críticos de indicadores de suelo y agua. Siendo el principal objetivo el uso sostenible de los recursos naturales, los niveles críticos deben relacionarse con la productividad. Deben asignarse a los niveles críticos, diferentes factores de rango e importancia. Para el factor importancia, su valor relativo, está basado en la pérdida de productividad a ese nivel de indicador del suelo.

Debido a los diversos órdenes de suelo, climas, ecorregiones, cultivos y sistemas de cultivo, es sumamente difícil generalizar o universalizar el nivel crítico de los indicadores. El nivel crítico de los indicadores debe decidirse con base en las situaciones locales específicas y relacionando la productividad con los atributos del suelo. No obstante, algunas pautas arbitrarias y sus factores de rango para la resistencia del suelo y las propiedades estructurales se muestran en Tabla 29; para las propiedades mecánicas en la Tabla 30; para la porosidad y la capacidad de agua disponible en la Tabla 31, y para las características de transmisión de agua en la Tabla 32. Los rangos de los indicadores del suelo para ninguna o severas limitaciones están tentativamente fijados de 150 a 20 centímetros para la profundidad radicular efectiva, y 1.3 a 1.6 Mg / m³ para la densidad aparente en suelos livianos y 1.2 a 1.5 Mg / m³ para suelos de textura pesada. Los niveles críticos de indicadores estructurales del suelo para ninguna o para las limitaciones severas varía de 75% a 5% para el porcentaje de agregación (basado en el tamizado húmedo o seco) y 2.5 mm a 0.5 mm para el MWD. Para algunos otros indicadores físicos del suelo (por ejemplo, pedregosidad, la conductividad hidráulica, etc.) pueden elaborarse rangos apropiados. Es, sin embargo, difícil desarrollar un factor de importancia para el contenido de la arcilla. Ambos extremos, demasiado y muy poco, de contenidos de arcilla o arenal, tienen efectos adversos sobre la productividad y sostenibilidad. Los niveles críticos para la textura del suelo deben, por consiguiente, ser establecidos conjuntamente con otros atributos por ejemplo, capacidad del agua disponible, la tasa de infiltración, etc.

Es difícil generalizar niveles críticos de nutrientes de la planta. Los niveles de suficiencia de nutrientes de la planta dependen de la especie cultivada y del rendimiento esperado. Los niveles críticos de algunas características químicas del suelo se muestran en las Tablas 33 y 34. Los niveles críticos de pH del suelo dependen de las escalas del pH. El rango óptimo de pH está en la vecindad de la reacción neutra del suelo de 6.0 a 7.0. El pH generalmente es subóptimo para el crecimiento de la planta en ambos extremos de la balanza del pH. Los

Tabla 29. Niveles críticos sugeridos de indicadores de resistencia y estructura del suelo

Limitación	Peso relativo del factor	Profundidad efectiva de raíces (cm)	Resistencia a la penetración (mPa)	Densidad aparente (Mg/m ³)		Estructura del suelo		
				Text liv.	Text pes.	Morfología	WSA %	MWD mm
Ninguna	1	> 150	< 1.0	< 1.3	< 1.2	Bloq. subangulares fuertes a migajosa	> 75	> 2.5
Ligera	2	100 - 150	1.0 - 1.5	1.3 - 1.4	1.2-1.3	Bloq. subangulares	50 - 75	2 - 2.5
Moderada	3	50 - 100	1.5 - 2.0	1.4 - 1.5	1.3-1.6	Bloq. subangulares moderados	25 - 50	1.0 - 2.0
Fuerte	4	25 - 50	2.0 - 2.5	1.5 - 1.6	1.4-1.5	Bloq. subangulares débiles	5-25	0.5-1.0
Muy fuerte	5	< 25	> 2.5	> 1.6	> 1.5	Masiva o sin estructura	< 5	< 0.5

Tabla 30. Límites críticos para las propiedades mecánicas del suelo

Limitaciones	Importancia del factor	Consistencia	Textura	Fragmento grueso en superficie (%)	Resistencia a la penetración (mPa)
Ninguna	1	Suelta	Franco	< 10	< 1.0
Ligera	2	Muy friable	Franco limoso Franco arcilloso limoso	10 - 20	1.0 - 1.5
Moderada	3	Friable	Franco arcilloso Franco arenoso	20 - 40	1.5 - 2.0
Fuerte	4	Dura	Arcillo limoso Arenoso franco	40 - 60	2.0 - 2.5
Muy fuerte	5	Extremadamente dura	Arcillo arenoso	> 60	> 2.5

Tabla 31. Límites críticos para la porosidad y la capacidad de almacenamiento de agua

Limitación	Importancia del factor	Permeabilidad	Porosidad drenable a 0.006 mPa (%)	Retención de humedad porosidad (%)	Porosidad residual	Capacidad de almacenamiento de agua (cm)
Ninguna	1	Rápida	> 20	> 20	< 15	> 30
Ligera	2	Moderadamente rápida	18 - 20	18 - 20	15 - 18	20 - 30
Moderada	3	Moderada	15 - 18	15 - 18	18 - 20	8 - 20
Fuerte	4	Lenta	10 - 15	10 - 15	20 - 25	2 - 8
Muy fuerte	5	Muy rápida o muy lenta	< 10	< 10	> 25	< 2

Tabla 32. Límites críticos para las propiedades de transmisión de agua

Limitación	Importancia relativa del factor	Permeabilidad	Tasa de infiltración (cm/h)	Conductividad hidráulica saturada (cm/h)
Ninguno	1	Rápida	> 5	> 2
Ligera	2	Moderadamente rápida	2 - 5	0.2 - 2
Moderada	3	Moderada	1 - 2	0.02 - 0.2
Fuerte	4	Lenta	1 - 0.5	0.002 - 0.02
Muy fuerte	5	Muy lenta o excesivamente rápida	< 0.5	< 0.002

rangos de pH de la tierra para ninguna o limitaciones severas en suelos ácidos son > 6.0 y < 5.0. En suelos alcalinos y sódicos, sin embargo, los rangos de pH del suelo para ninguna a severas limitaciones son 7 a 7.4 y >8.2 (Tabla 33).

Tabla 33. Niveles críticos sugeridos de indicadores químicos de suelo

Limitación	Importancia del factor	pH (1:1 en H ₂ O)	SAR*	Conductividad eléctrica (ds/m)
Ninguno	1	6.0 - 7.0	< 10	< 3
Ligera	2	5.8 a 6.0 y 7.0 a 7.4	10 - 12	3 - 5
Moderada	3	5.4 a 5.8 y 7.4 a 7.8	12 - 15	5 - 7
Fuerte	4	5.0 - 5.4 y 7.8 - 8.2	15 - 20	7 - 10
Muy fuerte	5	< 5.0 y > 8.2	> 20	> 10

* *Rata de absorción de sodio*

Las concentraciones tóxicas de Al, Mn y otros nutrientes también varían entre los suelos (dependiendo de la mineralogía de arcilla, CIC, contenido del carbono orgánico del suelo, etc.) y de la especie cultivada. Algunas especies tolerantes a condiciones ácidas pueden resistir a altas concentraciones de Al, Mn y acidez total que otros. La tolerancia a altas concentraciones de Al y Mn también depende de los contenidos totales y solubles de Ca. En muchos suelos, el cultivo responde de más a la deficiencia de Ca que al exceso de Al y Mn. Algunos niveles críticos sugeridos en la Tabla 34, indican la concentración de Al para ninguna a limitaciones severas desde menos de 20% de CIC total a más de 50%. Igualmente, porcentajes de Mn en el complejo intercambiable varía desde < 5% para ninguna limitación a más de 20% para la limitación severa.

Similar al pH, es difícil establecer niveles críticos del contenido de carbono orgánico del suelo. El contenido de carbono orgánico sólo es importante para esos suelos con antecedentes de niveles bajos. En general, el carbono orgánico de los suelos minerales es considerado suficiente si es de 5 a 10%. El contenido del carbono orgánico del suelo puede ser una limitante severa si su concentración es menos del 0.5%. En ese caso, la estructura del suelo se deteriora rápidamente, y el agua y las capacidades de retención de nutrientes están en el nivel subóptimo. Más que el carbono orgánico total, es el carbono de la biomasa o fracción activa del carbono orgánico del suelo, el que juega un papel importante regulando propiedades y definiendo los procesos. En la Tabla 35, se muestran los niveles críticos de carbono del suelo de la biomasa. Bajo condiciones favorables, el carbono de la biomasa debiera ser por lo menos el 25% del contenido de carbono total.

Tabla 34. Niveles críticos de las concentraciones tóxicas de Al y Mn en suelos tropicales ácidos

Limitación	Importancia del Factor	Cationes intercambiables (% de CIC)	
		Al	Mn
Ninguna	1	< 20	< 5
Ligera	2	20 - 35	5 - 10
Moderada	3	35 - 40	10 - 15
Fuerte	4	40 - 50	15 - 20
Muy fuerte	5	> 50	> 20

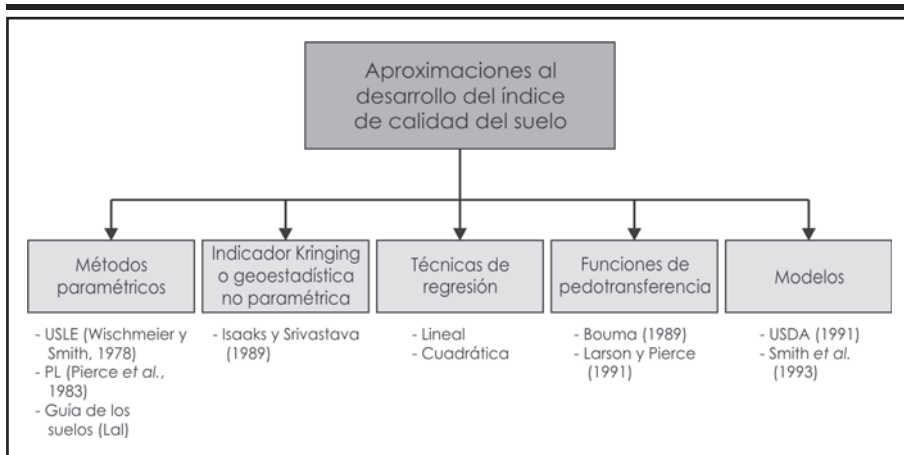
Tabla 35. Niveles críticos para el contenido de carbono orgánico del suelo

Limitación	Importancia del Factor	Contenido de carbono orgánico en el horizonte superficial del suelo (%)	Carbono de la biomasa (% del total)
Ninguna	1	5 - 10	> 25
Ligera	2	3 - 5	20 - 25
Moderada	3	1 - 3	10 - 20
Fuerte	4	0.5 - 1	5 - 10
Muy fuerte	5	< 0.5	< 5

XVI. ANÁLISIS DE LOS DATOS E INTERPRETACIÓN

La base de datos obtenida de los niveles críticos de indicadores del suelo tiene que ser combinada en uno o varios índices, para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua. En la Figura 14, se perfilan algunas posibles opciones para el análisis de los datos.

Figura 14. Posibles opciones para el análisis de datos y su síntesis en un índice operacional



La conferencia sobre calidad del suelo sostenida en el Instituto de Rodale (J. Alternative Agric., Vol 7, 1992) propuso un método o procedimiento para integrar las interacciones de los indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo en un índice respecto de la productividad y de los componentes ambientales y de salud. USDA (1992) desarrolló otro método para suministrar los rangos de calidad del suelo para el manejo de cultivos. El propósito fue, desarrollar un modelo de valoración de la calidad del suelo que relaciona el efecto combinado de tres variables en las tendencias sobre la calidad del suelo. El modelo propuesto con relación al manejo de la materia orgánica del suelo se muestra en la Ecuación 11:

$$SQR = OM + TP + ER \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde SQR es la calidad del suelo, OM es la cantidad de materia orgánica del suelo que debe devolverse al suelo para mantener o aumentar el conte-

nido de materia orgánica, TP es el subfactor relacionado con todas las operaciones del campo que rompe todos los residuos y airea el suelo por ejemplo, labranza, siembra, el intercultivo, la aplicación de fertilizante, etc., ER es el subfactor de erosión que relaciona la baja en productividad, con la erosión del suelo predicha por el USLE o WEQ. El índice SQR monitorea la magnitud y la tendencia de los cambios en la calidad del suelo.

Smith *et al.* (1993) propusieron otro modelo llamado Indicador Múltiple Variable Kriging (MVIK) que integra un conjunto de variables continuas en un solo índice, el cual puede usarse para mapear la calidad del suelo con base en el paisaje. Este proceso involucra una valoración independiente de los valores del umbral de todos los indicadores del suelo para diferentes cultivos. Estos valores se dan en un rango de 0 a 1. El procedimiento de Kriging integra algunos indicadores del suelo, en un nuevo indicador que se usa después para desarrollar un variograma. El variograma se usa para estimar los valores del indicador en otros sitios no monitoreados. Estos valores del indicador se usan para desarrollar mapas de calidad del suelo con base en el paisaje. Esta técnica puede ser aplicada en campo, finca, cuenca o región.

Larson y Pierce (1991) propusieron otra técnica llamada « Funciones de pedotransferencia» (PTF). Estos PTF son funciones matemáticas que relacionan indicadores y propiedades del suelo entre sí para la evaluación de la calidad del suelo (Bouma, 1989). Larson y Pierce (1991) realizaron un estudio de revisión de literatura para agrupar tales funciones (Tabla 36). Muchos de estos PTF son estadísticos o empíricos en naturaleza, y pueden usarse por consiguiente sólo para el mismo tipo de suelo o región. Estas funciones necesitan ser validadas para su aplicación a otra ecorregión.

Una aproximación comúnmente usada, es combinar los datos dentro de un índice de evaluación acumulativo. Este acercamiento analítico fue seguido por Mansfield (1975), Muchena (1979) y Lal (1985). Los factores de importancia para diez indicadores pertinentes puede combinarse en un índice acumulativo. Como se discutió en la sección de «indicadores críticos», los indicadores pertinentes pueden diferir entre los tipos de suelos, cultivos, sistemas de cultivo y usos de la tierra. Una vez los indicadores pertinentes para un suelo o el uso de la tierra han sido escogidos, análisis de laboratorio y de campo se hacen para asignar un factor de importancia apropiado, y obtener un índice de evaluación acumulativo (Tabla 37).

El valor máximo de un índice acumulativo basado en 10 factores es 50. El próximo paso es establecer la relación entre sostenibilidad y el índice acumulativo. Un ejemplo de un esquema de evaluación se muestra en la Tabla 38. Este esquema de evaluación sugiere que el factor de importancia, para los indicadores del suelo para un uso del suelo o sistema de cultivo sostenible, es aproximadamente 2. Sin embargo, relaciones específicas deben establecerse entre el índice de valoración acumulativo y uno o varios índices de sostenibilidad discutidos en otra sección de este documento.

**Tabla 36. Algunos ejemplos de funciones de pedotransferencia (o PTF)
(Larson y Pierce, 1991)**

PTF	Relaciones
Químicos	
Capacidad de absorción de fosfato (PSC)	$PSC = 0.4 (AIOX + Feox)$
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	$CIC = aOC + bC$
Cambios en la materia orgánica	$AC = a + bOR$
Físicos	
Densidad aparente	$D_b = b_0 + b_1 OC + b_2 S_1 + b_3 M$
Densidad aparente	Modelo estadístico que usa la distribución del tamaño de las partículas
Densidad aparente	$D_b = f(OC, \text{arcilla})$
Retención de humedad	$q_{10} = b_0 + b_1 C + b_2 S_y$
Retención de humedad	$q = b_1 (\% Sa) + b_2 (\% Si) + b_3 (\% Cl) + b_4 (\% OC)$
Rugosidad	$RR = f(\text{Morfología del suelo})$
Incremento de la porosidad	$P = f(MR, IP, \text{Arcilla}, Si, OC)$
Hidráulicos	
Conductividad hidráulica	$K^s = f(\text{textura})$
Conductividad sellada	$SC = f(\text{textura})$
Conductividad hidráulica saturada	$D_s = f(\text{morfología del suelo})$
Productividad	
Suelo productivo	$PI = f(D_b, AWHC, pH, E_c, ARE)$
Profundidad de raíces	$RD = f(D_b, WHC, pH)$

D_b = Densidad aparente
 M = Fracción de arenas medias
 C = Arcilla, $S_y = 1/D_b$
 $Alox$ = Oxalato de Al extractable
 $M.O$ = Materia orgánica
 Mr = Tasa de humedad
 ARE = Aireación

Si = porcentaje limo
 OC = Carbono orgánico
 PSC = Capacidad de absorción de fosfato
 $Feox$ = Oxalato de hierro extractable
 Su = Arena
 IP = Porosidad inicial

Tabla 37. Ejemplo de la sumatoria de los factores de importancia para diez indicadores críticos relevantes

Indicador de suelo	Importancia relativa del factor	Limitación
Profundidad de raíces	3	Moderada
Acidez	5	Extremadamente baja
Toxicidad de Al	4	Fuerte
Capacidad de almacenamiento de agua	2	Ligera
Textura	1	Ninguna
Densidad aparente	2	Ligera
Extracción de nutrientes	5	Extremadamente baja
Carbono orgánico del suelo	3	Moderada
Porcentaje de agregación	1	Ninguna
Erosión del suelo	3	Moderada
Índice acumulativo	29	

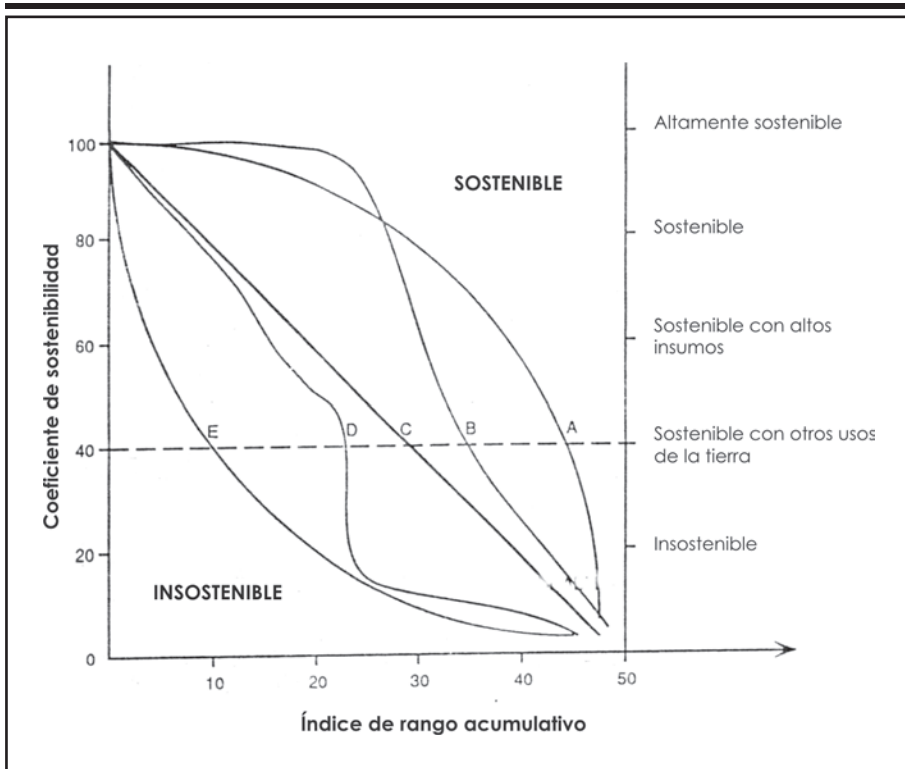
Tabla 38. Sostenibilidad del uso de la tierra con relación al índice acumulativo basado en diez indicadores del suelo

Sostenibilidad	Índice de la tasa acumulativa
Altamente sostenible	> 20
Sostenible	20 - 25
Sostenible con entradas altas	25 - 30
Sostenible con otro tipo de uso de la tierra	30 - 40
Insostenible	> 40

Contrariamente al esquema de valoración sugerido en Tabla 38, es probable que la relación entre el índice acumulativo y la sostenibilidad, computados de los datos experimentales no sea lineal. En la Figura 15, se muestran entre varias, cinco posibles relaciones. El esquema de la valoración presentado en

la Tabla 38, puede mejorarse con base en los datos empíricos del tipo presentados en la Figura 15. Estas relaciones empíricas también pueden diferir entre los tipos de suelo, ecorregiones, y usos de la tierra. La curva A muestra una declinación gradual en la sostenibilidad, hasta que el índice acumulativo es 30. La curva B no muestra cambios en la sostenibilidad hasta un índice acumulativo de 25, por debajo del cual ocurre un marcado declive en la sostenibilidad. La curva C es más probablemente atípica, o un escenario poco usual donde la sostenibilidad cae linealmente con aumento en el índice acumulativo. La curva D exhibe una función compuesta con declive lineal en sostenibilidad hasta el índice de valoración de 25, seguida por un declive rápido de 25 a 30. La curva E es un ejemplo de un declive logarítmico en sostenibilidad. El esquema en la Figura 15, muestra que los sistemas sostenibles tienen el índice acumulativo de < 30.

Figura 15. Esquema de las posibles relaciones entre en índice acumulativo y los índices de sostenibilidad

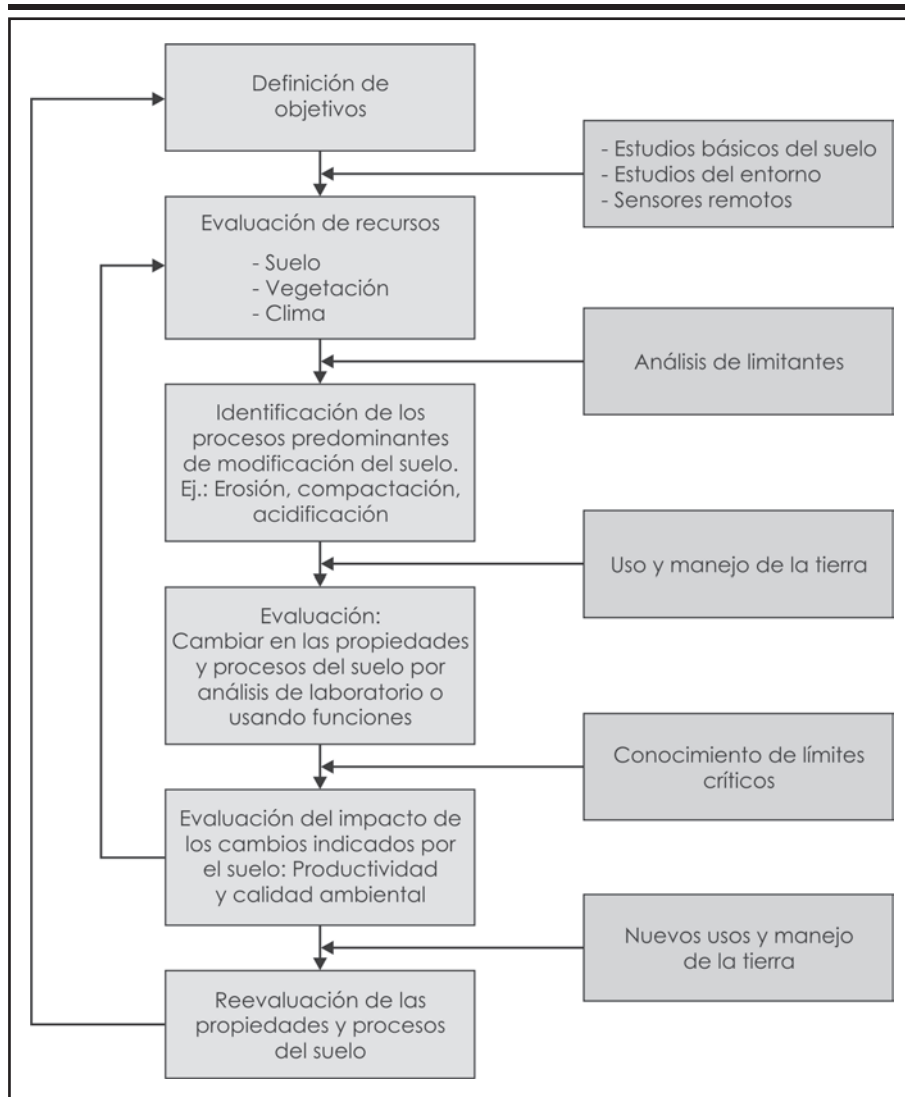


XVII. LISTA DE CONTROL Y SECUENCIA DE PASOS EN LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD

La lista de control consiste en la valoración detallada de todos los factores físicos y socioeconómicos del sitio del estudio, en la finca, paisaje o cuenca. El análisis del factor también comprende parámetros antropogénicos y las variables institucionales. Una vez el estudio rutinario ha sido completado, la valoración de sostenibilidad del recurso suelo y agua exige seguir una secuencia de pasos. Estos pasos se presentan en la Figura 16.

1. El primer paso en la valoración de la sostenibilidad, es la planificación del programa y la definición de objetivos, identificando los factores más críticos o limitantes para alcanzar las metas previstas. Los factores más críticos o limitantes se deciden por medio de un estudio muy detallado para medir el potencial y los problemas de los recursos suelo y agua. El estudio de valoración del recurso detallado, basado en los factores del suelo e hidrológicos junto con características climáticas y de vegetación, proporcionarán la información necesaria sobre la calidad inherente al suelo. La selección de la escala (temporal, sistemática y espacial) también es hecha en esta etapa.
2. El segundo paso es dirigir un análisis objetivo de problemas e identificar los procesos degradativos del suelo, tanto potenciales como actuales y las propiedades que pueden alterarse por esos procesos. Los procesos modificadores del suelo son la erosión acelerada, la compactación y la formación de capas duras, la degradación química y el descenso en la fertilidad del suelo, la acidificación, la salinización, la degradación biológica, etc. Los indicadores del suelo afectados por estos procesos se listan en la Tabla 39.
3. El tercer paso es reevaluar los indicadores del suelo, afectados por procesos modificadores predominantes, respecto al uso de la tierra y sistemas de manejo. El tipo y rata de los procesos degradativos, son determinadas por el uso de la tierra y sistema de manejo. Por consiguiente, debe hacerse la reevaluación de los indicadores de sostenibilidad con base en estos factores.
4. Del conocimiento de los límites críticos de indicadores del suelo y de la relación funcional entre los indicadores del suelo y productividad, obtenida por un conjunto de experimentos o revisión de literatura, evaluar la pérdida en la productividad real y potencial debido al cambio en los indicadores de calidad del suelo.

Figura 16. Pasos sugeridos para la evaluación de la sostenibilidad de los recursos suelo y agua



5. Si el impacto adverso del cambio en los indicadores del suelo sobre la productividad y la calidad medioambiental es drástico, se requiere de un cambio en el uso y manejo de la tierra. Un uso apropiado de la tierra debe seleccionarse con base en factores del suelo y medioambientales. Como consecuencia, las etapas uno a cuatro, deben repetirse para reevaluar los objetivos, y realizar un análisis de problemas, etc.

Tabla 39. Algunos indicadores de sostenibilidad influenciados por procesos degradativos modificadores del suelo

Procesos	Indicadores de suelo afectados
Erosión acelerada	Carbono orgánico del suelo, profundidad del suelo, capacidad de almacenamiento de agua, textura del suelo, capacidad de nutrientes
Compactación y formación de capas duras	Densidad aparente del suelo, porosidad, tamaño y distribución de poros, dureza del suelo, rata de infiltración, conductividad hidráulica
Degradación química	Pérdida de nutrientes, reducción de la CIC
Acidificación	Disminución del pH, disminución de la saturación de bases, incremento en la acidez total y aumento de la concentración de Al
Salinización	Incremento en la conductividad eléctrica para la concentración total de sales solubles, cambios de color
Alcalinización	Incremento en el RAS (Rata de absorción de sodio), cambio de color del suelo por la Solubilización del carbono, disminución de la infiltración
Degradación biológica	Reducción del contenido de materia orgánica, disminución en la biodiversidad del suelo y población de lombrices etc, disminución en la biomasa

6. En vista del nuevo uso y manejo de la tierra, se reevalúan los procesos degradativos predominantes y los indicadores de suelo y agua modificados por ellos. Este paso debe involucrar la reevaluación de los potenciales y limitantes de los recursos suelos y agua.

La sostenibilidad de los recursos suelo y agua debe computarse, usando los coeficientes e indicadores, descritos en la sección II de este documento, en la etapa 5. La selección del índice y la escala apropiada de cómputo es importante y debe ser considerada durante el paso 1. El conocimiento de cambios temporales en los indicadores del suelo y productividad, y la relación entre los indicadores del suelo y productividad es esencial en la evaluación de la sostenibilidad.

XVIII. MEJORAMIENTO DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS SUELO Y AGUA

El mejoramiento de la sostenibilidad de los recursos suelo y agua implica mejorar la estructura del suelo, la capacidad nutriente y los mecanismos de ciclaje, la capacidad de agua disponible y mecanismos de ciclaje y los procesos de apoyo de vida del suelo. El mantenimiento y mejoramiento del contenido de la materia orgánica del suelo, es crucial en el mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas. Entre estas prácticas importantes están las técnicas de cobertura, la labranza de conservación, el manejo de cultivos de cobertura y abonos verdes, el fortalecimiento de los mecanismos del ciclaje de nutrientes, sistemas diversificados de cultivo, y la aplicación frecuente y liberal de enmiendas orgánicas. Estas tecnologías genéricas necesitan ser adaptadas y validadas bajo condiciones específicas y locales (Tabla 40).

Tabla 40. Principios básicos y opciones tecnológicas para mejorar el uso sostenible de los recursos suelo y agua

Estrategia	Opción tecnológica
Mejoramiento de la estructura del suelo	Residuos de cosecha, labranza de conservación, uso de coberturas
Mejoramiento del contenido de materia orgánica del suelo	Aplicación de residuos orgánicos, abonos verdes, labranza de conservación
Reducción de la compactación	Labranza de conservación, uso de cinceles o subsolador, tráfico guiado
Mejoramiento del reciclaje de nutrientes	Agroforestería, labranza de conservación, cultivos múltiples, aplicación de materia orgánica
Incremento de la fertilidad	Aplicación de una nutrición balanceada, aplicación de nutrientes acorde con las expectativas de producción, reciclaje de residuos orgánicos
Manejo de la acidez del suelo	Encalamiento, aplicación de fertilizantes apropiados, uso de variedades y cultivos tolerantes
Manejo de la salinidad y de la alcalinidad	Sistemas apropiados de cultivo. Ejemplo: usar como base de rotación el arroz para incrementar el lavado, aplicación de yeso en suelos alcalinos, uso de enmiendas

Existen dos estrategias básicas para mejorar el uso sostenible de los recursos suelo y agua. Uno es prevenir la degradación y el otro mejorar la calidad del suelo.

Las opciones de manejo para prevenir la degradación del suelo y las medidas de mejoramiento del suelo pueden ser similares. Las medidas preventivas de degradación incluyen: uso apropiado de la tierra, las rotaciones y combinaciones convenientes de cultivos, el mantenimiento de la fertilidad a través del tipo y dosis apropiadas de aplicación de fertilizante y de cal, la baja intensidad de cultivo y el bajo almacenamiento. La evaluación de la capacidad de la tierra y la opción de uso apropiado de la tierra son cruciales para la prevención de la degradación del suelo. Las medidas para mejorar la calidad del suelo incluyen el barbecho restaurativo y análisis de suelos basados en la aplicación de fertilizantes y enmiendas orgánicas. Para varios suelos en los climas inclementes del trópico, las expectativas de rendimiento deben ser comparativamente bajas. Son el uso intensivo de la tierra, el uso de ningún o de bajos niveles de insumos en la finca, el abandono y el mal uso de los recursos por un periodo largo, los que reducen la resistencia, acentúan la degradación, amenazan la calidad del suelo y disminuyen la sostenibilidad de los recursos de suelo y agua.

XIX. PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

La necesidad de desarrollar sistemas sostenibles de manejo del suelo y agua es mayor ahora que antes. Aunque existe alguna información disponible sobre principios básicos del suelo y del manejo de cultivos, se conoce menos acerca de las relaciones cuantitativas entre los indicadores del suelo y la productividad. La base de datos para mejorar nuestro entendimiento de la magnitud cuantitativa o la extensión de la degradación del suelo y la relación causa – efecto es bastante estrecha, especialmente con relación a indicadores físicos e hidrológicos del suelo y otros procesos. Consecuentemente hay varios tópicos de investigación:

1. **Procedimientos analíticos:** Se necesitan métodos simples y confiables para la cuantificación de los indicadores físicos e hidrológicos del suelo, con relevancia a suelos altamente variables en ambientes adversos y extremos. Estas técnicas analíticas deben ser orientadas al campo, basadas más en dispositivos mecánicos que electrónicos, y tener especial relevancia con la productividad agronómica como una medida de producción animal y de cultivos, la capacidad reguladora medioambiental para filtrar y desintoxicar contaminantes y basuras aplicadas al suelo, la capacidad del suelo para retener y reciclar los nutrientes, y la habilidad del suelo de regular el suministro de agua.
2. **Procesos y propiedades limitantes:** Es importante identificar las propiedades y procesos que limitan la productividad y acentúan los procesos degradativos. Tal información es fundamental para la identificación del uso apropiado de la tierra y la selección de los suelos y sistemas adecuados de manejo del suelo y del cultivo. Las propiedades y los procesos limitantes son diferentes para diferentes usos de la tierra. ¿ La profundidad del suelo o el pH, son más importantes que el CIC y que el contenido de materia orgánica?.
3. **Procesos interactivos:** Ambos procesos degradativo y restaurativo están a menudo interrelacionados. La pérdida en la estructura del suelo puede causar compactación, el incremento en la compactación acelera la escorrentía, la escorrentía alta acentúa la erosión y agrava la sequía. Es particularmente importante determinar la interrelación entre los procesos físicos y biológicos del suelo, los procesos biológicos y químicos o nutritivos del suelo y los procesos físicos y nutricionales del suelo. También

deben establecerse las relaciones interactivas entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, que regulan estos procesos.

4. Límites críticos: Poco es conocido sobre los límites críticos de los indicadores del suelo con respecto a la productividad y a las funciones reguladoras medioambientales. Estos límites varían entre los tipos de suelo, uso de la tierra, cultivos y manejo. Es importante reconocer que el manejo tiene un impacto importante en los límites críticos, siendo los límites más extremos para aquellos basados en la ciencia, comparados con los basados en recursos existentes o en sistemas de bajos insumos. Los límites críticos también pueden ser diferentes para diferentes objetivos o estrategias. Estos límites necesitan ser identificados con respecto a:

- (i) Selección del uso de la tierra.
- (ii) Decisión sobre los insumos requeridos para mantener un nivel esperado de productividad.
- (iii) Prevenir o minimizar riesgos de degradación.
- (iv) Invertir las tendencias degradativas.

Por ejemplo, es importante determinar:

- (i) La cantidad y calidad del contenido de la materia orgánica del suelo para mantener la estructura del mismo.
- (ii) La capacidad de agua disponible para minimizar riesgos de sequía.
- (iii) Los niveles tóxicos de Al o Mn respecto del crecimiento de la raíz.
- (iv) El nivel tolerable de pérdida del suelo.
- (v) El nivel del umbral de temperatura del suelo para la germinación y establecimiento de semillas.
- (vi) La tasa de difusión de oxígeno para una aireación adecuada.
- (vii) La densidad aparente y resistencia de la tierra que limitan el crecimiento de la raíz de diferentes cultivos.
- (viii) El diámetro medio y la estabilidad de los agregados para minimizar el cuarteamiento y el encostramiento.
- (ix) La dureza de la costra que limita la emergencia de la semilla.
- (x) La biodiversidad del suelo y la actividad de las lombrices que regulan la macroporosidad y mineralizan las basuras orgánicas.

El entender los límites críticos también es esencial para escoger una estrategia apropiada para la restauración del suelo. ¿Cuáles son los límites críticos de las propiedades y procesos esenciales del suelo más allá de los cuales el suelo se degrada irreversiblemente? Tal información es sumamente importante para programar el uso de la tierra y eliminar usos degradativos, antes de que estos alcancen el punto de no retorno.

5. **Resistencia del suelo:** Cuantificar la resistencia del suelo, junto con las propiedades y procesos subyacentes y los métodos para su determinación, es importante para desarrollar un uso sostenible de los recursos suelo y agua. Los suelos resistentes pueden sostener el intensivo y algún excesivo o inapropiado uso mejor que suelos no resistentes. Los procesos y propiedades que gobiernan la resistencia del suelo deben identificarse y establecer sus límites críticos.

6. **Coefficiente de sostenibilidad:** La cuantificación de la sostenibilidad es importante con referencia a la propiedad más limitante del suelo o al recurso no renovable por ejemplo, el no recargue del agua subterránea, la profundidad del suelo superior poco profundo, etc. Aunque pueden conocerse los principios básicos, el coeficiente conveniente de sostenibilidad y los niveles críticos de las propiedades limitantes del suelo y sus procesos, difieren entre suelos y regiones agroecológicas. El desarrollo, validación y adaptación de estos coeficientes es importante para convertir conceptos cualitativos y vagos de sostenibilidad en conceptos objetivos, cuantitativos y medibles.

7. **Indicadores de calidad del suelo:** Similar a los coeficientes de sostenibilidad, hay también una necesidad de desarrollar los indicadores de calidad del suelo. Los indicadores del suelo y sus límites críticos difieren entre los suelos, usos de la tierra y sistemas de manejo. Los indicadores de calidad del suelo también pueden depender del tipo de calidad del suelo. MacDonald et al. (1993) identificó dos tipos de calidad del suelo.
 - (a) La calidad del suelo inherente, que está relacionada con la capacidad del suelo para realizar funciones críticas que no cambian con tiempo. Los indicadores de calidad inherentes del suelo pueden ser el material parental, composición elemental total, etc.
 - b) La cualidad dinámica del suelo que está relacionada con funciones que son dependientes, del tiempo. La calidad dinámica del suelo puede cambiar con el tiempo especialmente debido al manejo. El cambio puede ser debido a: (i.) factores biológicos o (ii) uso de la tierra o factores de manejo.

Estos indicadores relacionados con factores ambientales y objetivos, deben desarrollarse para situaciones específicas locales respecto al tipo de calidad del suelo.

8. **Número mínimo de datos:** Para el indicador de sostenibilidad del suelo este número mínimo varía, de acuerdo con: los objetivos, las características del suelo, el uso de la tierra, los sistemas de manejo y la escala de valoración. Con referencia a la escala espacial, los datos mínimos y la intensidad de medida depende del área ej., la cuenca, la región, los límites políticos o nacionales. Estos datos mínimos deben establecerse.
9. **Estándares de calidad y control:** La exactitud y confiabilidad de los datos debe verificarse con normas de referencia establecidas para técnicas de campo y laboratorio, para los parámetros biológicos y físicos, para las propiedades y procesos y para los índices de calidad del suelo y sostenibilidad. Deben generalizarse tales estándares y preferentemente deben desarrollarse por las sociedades profesionales por ejemplo, Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo, etc.
10. **Modelaje:** Los modelos, aunque no sustituyen la buena calidad de los datos experimentales, son herramientas útiles para identificar la brecha en el conocimiento y extrapolar la información a suelos similares y las condiciones medioambientales similares. Es necesario desarrollar modelos basados en el proceso o conceptuales, para evaluar sostenibilidad de recursos de suelo y agua para diferentes usos del suelo y sistemas de manejo. También se necesitan los modelos conceptuales para desarrollar los indicadores de calidad del suelo con referencia a la productividad, y las funciones reguladoras medioambientales. Será útil desarrollar habilidad predictiva para estimar la proporción de degradación del suelo o proporción de restauración del suelo respecto al uso de la tierra, manejo, propiedades del suelo y procesos predominantes.

XX. CONCLUSIONES

El uso sostenible de los recursos de suelo y agua es ahora más importante, en los trópicos, que antes debido a:

- (i) El hambre de la tierra y la escasez de tierra agrícola.
- (ii) La baja productividad de la agricultura predominante en los trópicos, la agricultura de subsistencia o basada exclusivamente en los recursos existentes.
- (iii) La susceptibilidad de los suelos a los procesos degradativos prevalentes en ambientes adversos y perpetuados por sistemas agrícolas de bajos insumos.
- (iv) La sensibilidad ecológica de algunas regiones tropicales en términos de su impacto global por ejemplo, el efecto invernadero.
- (v) La pobreza extendida, desnutrición, trabajo pesado y subestándares de vida de la mayoría de población agrícola.
- (vi) Falta de apoyo institucional en estas regiones para direccionar efectivamente los problemas de manejo del recurso.

El concepto de sostenibilidad ha recibido una entusiasta y amplia respuesta de científicos y hacedores de políticas. A pesar de la necesidad urgente de desarrollar y adoptar sistemas para el uso sustentable de los recursos de agua y suelo en los trópicos, el concepto sigue siendo vago, subjetivo, cualitativo y meramente una retórica emocional. Por consiguiente, es importante desarrollar y estandarizar criterios objetivos y basados en la ciencia, para la valoración cuantitativa de la sostenibilidad, especialmente en relación con los recursos de suelos y aguas.

Los índices o coeficientes de sostenibilidad pueden definirse en términos de tendencia de la productividad en el tiempo por unidad de insumo o uso del recurso más crítico o limitante. Los índices relevantes de sostenibilidad son aquellos que proporcionan una medida cuantitativa de las tendencias en el tiempo, de la productividad y de los indicadores de calidad del suelo.

La selección de un índice apropiado de sostenibilidad depende de varios factores incluyendo: objetivos de la evaluación, uso de la tierra, manejo, y escalas de medida. Hay 3 tipos de escalas operacionales por ejemplo, tem-

poral, espacial y sistemática. Con referencia a los ecosistemas tropicales, es apropiado evaluar la productividad para los sistemas de cultivo a nivel de la finca, durante aproximadamente 10 años.

La calidad inherente del suelo y su productividad dependen de algunas propiedades claves. Un juego de propiedades importantes o indicadores del suelo difiere entre los tipos de suelo, uso de la tierra, manejo y factores agroecológicos. La selección de propiedades claves también depende de los procesos predominantes de modificación del suelo. Los indicadores de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo incluyen la textura, estructura, la profundidad radical efectiva, la capacidad de agua disponible para las plantas y tasa de infiltración. Los procesos importantes que modifican los indicadores físicos del suelo son la acelerada erosión del suelo, la desertización, la compactación y la formación de capas duras, lixiviación, anaerobiosis y sequía. Los indicadores químicos pertinentes son: el pH, la CIC, las reservas de nutrientes y la concentración de elementos tóxicos. Los modificadores de los indicadores químicos del suelo son: la acidificación, el lavado, la volatilización y el agotamiento de nutrientes. Los indicadores biológicos importantes son el contenido del carbono orgánico total y bioreactivo y la biodiversidad del suelo. La actividad y diversidad de las especies de la fauna del suelo, son indicadores biológicos importantes. Los modificadores de indicadores biológicos del suelo son: la erosión, la anaerobiosis, la compactación, etc.

Además de las características de suelo y agua, la productividad del cultivo es un indicador importante de la sostenibilidad. La productividad puede medirse en términos de intensidad de uso de la tierra (por ejemplo, factor de uso de tierra, LER, ATER, etc.), la producción de biomasa, o índice de cosecha. La productividad también puede ser estimada por varios modelos como PI, EPIC, etc.

La valoración de los indicadores del suelo debe hacerse por métodos estándar para que los resultados sean comparables. Estas mediciones deben hacerse en series de experimentos de largo plazo, en suelos de referencia en ecorregiones representativas. La sostenibilidad de los recursos de suelo y agua en éstos experimentos de largo plazo debe ser evaluada para sistemas tradicionales de uso y manejo de la tierra o deben controlarse comparándola con varios nuevos e innovadores sistemas, que incluyen los conceptos basados en la ciencia y las mejores prácticas de manejo.

Es necesario desarrollar bases de datos científicos para desarrollar sistemas cuantitativos y objetivos de valoración de la sostenibilidad. La investigación es necesaria para desarrollar los procedimientos analíticos que identifican los procesos y propiedades limitantes de productividad, delinear límites críticos de indicadores de suelos y aguas, cuantificar la recuperación del suelo, desarrollar índices de sostenibilidad y calidad del suelo. También es importante definir el número de datos mínimo necesario para la valoración de la sostenibilidad, y para desarrollar normas de control de calidad. El desarrollo de modelos predictivos puede ser útil para extrapolar los resultados a suelos y ecorregiones similares.

BIBLIOGRAFÍA

- Acton, D.F., 1993. *A program to assess and monitor soil quality in Canada*. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture, Canada, Ottawa, Contribution No. 93-94 pp.
- Allen, T.F.H. and T.B. Starr, 1982. *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*. Univ. Of Chicago Press, Chicago, 310 pp.
- Allison, F.E., 1973. *Soil organic matter and its role in crop production*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
- Anonymous, 1992. *Special Issue on Soil Quality*. American Journal of Alternative Agriculture, Vol. 7 (1 & 2): 88 pp.
- Arnold, R.W., Zaboies, Y., Targulian, V.C., eds, 1990. *Global soil change*. Report of an IIASA-ISSS-UNEP task force on the role of soil in global change. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria: IIASA.
- Aune, J.B., and R. Lal. *The tropical soil productivity calculator: A model for assessing effects of soil management on productivity*. In R. Lal and B.A. Stewart (eds) "Sustainable Management of Soils" Lewis Publishers, Chelsea, MI (In Press).
- Bauer, Armand, and A.L. Black, 1992. *Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups*. Soil Sci. Soc. Am.J.56: 248 - 254.
- Baver, L.D., W.H. Gardner, and W.R. Gardner, 1972. *Soil physics*. 4th ed. John Wiley and Sons, NY.
- Beasley, D.B., E.J. Monke, and L.F. Huggins, 1980. *Answers: a model for watershed planning*. Trans. ASAE 23: 839-844.
- Biot, Y., 1990. *Theprom: An erosion productivity model*. In J. Boardman, I.D.L. Foster and J.A. Dearing (eds) "Soil Erosion on agricultural Land". J. Wiley & Sons, U.K.: 465-479.
- Blake, G.R., and Hartge, K.H., 1986. *Bulk density*. In Methods of soil analysis, ed. A. Klute. 2nd ed., pt. 1, 363-376. Agronomy Monographs No. 9. Madison, WI: ASA, SSSA.

- Bohm, W., 1979. *Ecological Studies: Analysis and Synthesis*. Vol 33: 39-41.
- Bouma, J., 1989. *Using soil survey data for quantitative land evaluation*. *Advances in Soil Sci.* 9: 177-213.
- Bouwer, H., 1986. *Intake rate: Cylinder infiltrometer*. In *Methods of soil analysis*. A. Klute (ed.) *Agronomy 9*, pt.1, 2nd ed. Am.Soc.Agron., Madison, WI.
- Bowman, R.A., J.D. Reeder, and G.E. Schuman, 1990. *Evaluation of selected soil physical, chemical and biological parameters as indicators of soil productivity*. *Proc. Int'l. Conf. on Soil Quality in Semi-arid Agriculture (1989)*, Univ. Of Saskatchewan, Saskatoon 2: 64-70.
- Bradford, J.M., 1986. *Penetrability*. In *Methods of soils analysis*. Ed. A. Klute, 2nd ed., pt 1, 463-478. *Agronomy monographs No.9* Madison, WI: ASA, SSSA.
- Bradford, J.M., 1986. *Permeability*. In A. Klute (ed.) "Methods of Soil Analysis, Part I, 2nd edition". *Agronomy Monograph 9*, ASA, Madison, WI: 425-441.
- Brewer, R., and J.R. Sleeman, 1960. *Soil structure and fabric: Their definition and description*. *J. Soil Sci.* 11: 172-185.
- Bruce, R.R., and Luxmoor, R.J., 1986. *Water retention: Field methods*. In *Methods of soil analysis de. A. Klute, 2nd ed., pt. 1*, 663-686. *Agronomy Monographs no. 9*. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Brutsaert, W., 1967. *Some methods of calculating unsaturated permeability*. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 10: 400-404.
- Cassel, D.K., 1983. *Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand*. *Soil Sci.Soc.Am. J.* 47: 196-201.
- Cassel, D.K., and Fryrear, D.W., 1990. *Evaluation of productivity changes due to accelerated erosion*. In *research issues in soil erosion/productivity*, ed. W.E. Larson, G.R. Foster, R.R. Allmaras, and C.M. Smith 41-54. St. Paul: University of Minnesota.
- Cassel, D.K. and Nielsen, D.R. 1986. *Field capacity and available water capacity*. In *Methods of soil analysis*, ed. A. Klute, 2nd ed., pt. 1, 901-926. *Agronomy Monographs No. 9*. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Childs, E.C., and Collis-George, N., 1950. *The permeability of porous materials*. *Proceedings of the Royal Society (London)*, series A 201: 392-405.
- Corey, A.T., 1986. *Air permeability*. In *Methods of soil analysis*, ed. A. Klute, 2nd ed. Pt. 1, 1121-1136. *Agronomy Monographs no. 9*. Madison, WI: ASA, SSSA.

- Edwards, A.P., and J.M. Bremner, 1967. *Microaggregates in soils*. J. Soil Sci. 18: 64-73.
- Falayi, O. And J. Bouma, 1975. *Relationship between the hydraulic conductivity of surface crusts and soil management in a Typic Hapludalf*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 957-963
- FAO, 1976. *A framework for land evaluation*. Soils Bull.32. FAO, Rome.
- FAO, 1983. *Guidelines: Land evaluation for rainfed agriculture*. Soil Bulletin No. 52. FAO, Rome.
- Farres, P.J. 1980. *Some observations on the stability of soil aggregates to rain-drop impact*. Catena 7: 223-231.
- Foster, G.R., 1982. *Modeling the erosion process*. In C.T. Haan, H.P. Johnson, and D.I. Brakensieck (eds) "Hydrologic Modeling of Small Watershed". ASAE, St. Joseph, MI: 297-380.
- Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. *Particle-size analysis*. In Methods of soil analysis, ed. A. Klute, 2nd ed., pt.1, 383-412. Agronomy Monographs no. 9. Madison, W.I: ASA, SSSA.
- Gianello, C., and Bremner, J.M. 1986. *A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil*. Communications in Soil Science and Plant Analysis 17: 195-214.
- Guilliland, D.C., 1990. *Experiences in Statistics*. Kendall/Hunt Publ. Co. Dubuque, IA 52004. 104 pp.
- Green, R.E., and Corey, J.C., 1971. *Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods*. Soil Science Society of American Journal 35: 3-8.
- Groenevelt, P.H., Kay, B.D., and Grant, D.C., 1984. *Physical assessment of a soil with respect to rooting potential*. Geoderma 34: 101-114.
- Gupta, R.K. and I.P. Abrol, 1990. *Salt-affected soils: their reclamation and management for crop production*. In R. Lal and B.A. Stewart (eds) "Soil Degradation". Adv. Soil Sci: 11: 223-288.
- Gupta, S.C., and Larson, W.E. 1979a. *Estimating soil water retention characteristics from particle-size distribution, organic matter percent and bulk density*. Water Resources Research 15: 1633-1635.
- Gupta, S.C. and Larson, E.E., 1979b. *A model for predicting packing density of soils using particle-size distribution*. Soil Science Society of America Journal 44: 758-764.

- Haberern, J., 1992. *A soil health index*. J. Soil Water Cons. 47: 6.
- Hanks, R.J., and Thorp, F.C., 1956. *Seedling emergence of Wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate and crust strenght*. Soil Science Society of America Proceedings 20: 407-310.
- Herd, R.W., 1993. *Measuring sustainability using long-term experiments*. Proc. Conf. Held at Rothamsted Experiment Station, 29-30 April, 1993, Rothamsted, England.
- Hiebsch, C.K., and R.E. McCollum, 1987. *Area x Time Equivalency Ratio: A method for evaluating the productivity of intercrops*. Agron. J.79: 15-22.
- IITA, 1975. *Methods of Soil Analysis*. IITA, IBADAN, Nigeria.
- Jenny, Hans, 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill Book Co., New York. 281 pp.
- Karlen, D.L., and D.C. Erbach, 1990. *Soil tilth: A fundamental basis for sustainable agricultural growth*. In R.P. Singh (ed) "Proc. Int'l. Symp, on Natural Resources Management for a Sustainable Agriculture". Vol 2, Indian Soc. Of Agron, New Delhi, India. 87-92 pp.
- Kay, B.D., 1989. *Rates of change of soil structure under different cropping systems*. Advances in Soil Science 12: 1-52.
- Kemper, W.D., and R.C. Rosenau, 1986. *Aggregate stability and size distribution*. In Methods of soils and analysis. A Klute (ed.). Agronomy 9, pt. 1, 2nd ed. Am.Soc Agron., Madison, WI.
- King, A.W., D.L. DeAngelis, and W.M. Post, 1987. *The seasonal exchange of CO₂ between the atnosphere and the terrestrial biosphere: Extrapolation from site-specific nodels to regional models*. ORNL/TM-10570, Oak Ridge TN, Oak Ridge National Laboratory.
- Kiniry, L.N., C.L. Scrivner, and M.E. Keener, 1983. *A soil productivity index based upon predicted water depletion and root growth*. Res. Bull, 1051. Mo. Agr. Exp. Sta., Columbia.
- Klute A., 1986. *Water retention: Laboratory methods*. In Methods of soil analysis, ed. A. Klute, 2nd ed. A. Klute, 2nd ed., pt. 1, 635-662. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Klute, A., and Dirksen, C., 1986. *Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory measurements*. In Methods of soil analysis, ed. A. Klute, 2nd ed., pt. 1, 687-734. Agronomy Monographs No. 9. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Knisel, W.G., and G.R. Fostter, 1981. *Creams: A system for evaluating best management practices*. In "Economics, Ethics, Ecology: Roots of Productive Conservation". Soil Water Conservation society Ankeny, I.A: 177-194.

- Lal, R., 1974. *The effect of soil texture and density on the neutron and density probe calibration for some tropical soils*. Soil Sci. 117: 183-190.
- Lal, R., 1979a. *Physical characteristics of soils of the tropics: determination and management*. In R. Lal and D.J. Greenland (eds) "Soil physical Properties and Crop Production in the Tropics", J. Wiley & Sons, U.K.: 7-44.
- Lal, R., 1979b. *Concentration and size of gravel in relation to neutron moisture meter and density probe calibration*. Soil Sci. 127: 41-50.
- Lal, R., 1985. *A soil suitability guide for different tillage systems in the tropics*. Soil & Tillage Res. 5: 179-196.
- Lal, R., 1987. *Effects of soil erosion on crop productivity*. CRC Critical Reviews in Plant Science 5 (4): 303-367.
- Lal, R., 1991. *Soil structure and sustainability*. J. Sustainable Agric. 1: 67-92.
- Lal, R., 1993. *Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability*. Soil & Tillage Res. 27: 1-8.
- Lal, R., 1994. *Soil Erosion Research Methods*. Second Edition, Soil & Water Conservation Society, Ankeny, IA.
- Lal, R., and B.A. Stewart (eds), 1994. *Sustainable Management of Soils*. Lewis Publishers, Chelsea, MI (In Press).
- Lal, R., and F.P. Miller, 1993. *Soil quality and its management in humid subtropical and tropical environments*. Proc. XVI Int'l. Grassland Conference, Massey, New Zealand.
- Lamp, J., 1986. *Minimum data sets and basic procedures for global assessments*. In Transactions XIIIth Congress of the International Society of Soil Science (Hamburg, 1986), vol. 5, 238-245.
- Larson, W.E., and F.J. Pierce, 1991. *Conservation and enhancement of soil quality*. In "Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World" IBSRAM Proc. 12, Vol. 2, Bangkok, Thailand.
- Larson, W.E., and F.J. Pierce, 1992. *Conservation and enhancement of soil quality*. In Evaluation for Sustainable Land management in the Developing World Vol. 2: Technical Papers. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991. IBSRAM Proceedings No.12(2).
- Lavelle, P., A.V. Spain, E. Blanchart, A. Martin, and S. Martin, 1992. *Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics*. In R. Lal and P.A. Sánchez (eds) "Myths and Science of Soils of the Tropics". SSSA Special Publication 29: 157-185.

- Lee, K.E., 1985. *Earthworms: Their Ecology and Relationships with Soils and Land Use*. Academic Press, London, U.K.
- Lee, K.E. and T.G. Wood, 1971. *Termites and soil*. Academic Press, London.
- MacDonald, K.B., F. Wang, W. Fraser, and I. Jarvis, 1993. *GIS based system to assess soil quality*. In D.F. Acton (ed) "A Program to Assess and Monitor Soil Quality in Canada". Research Branch, Agric., Canadá.
- Manrique, L.A., and C.A. Jones, 1991. *Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties*. Soil Science Society of America Journal 55: 476-481.
- Mansfield, J.E. 1979. *Land capability for annual rainfed arable crops in northern Nigeria based on soil physical limitation*. In R. Lal and D.J. Greenland (eds) "Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics", J. Wiley & Sons, U.K.: 407-426.
- Marshall, T.J., 1958. *A relation between permeability and size distribution of pores*. Journal of Soil Science 9: 1-8.
- McCoy, E., E. Kladvko, and C. Boast, 1993. *Macropore flow*. Lal and B.A. Stewart (ed) "Soil Processes and Water Quality". Lewis Publishers, Chelsea, MI. (In Press).
- McKeague, J.A., Wang, C., and Tapp, G.C., 1982. *Estimating saturated hydraulic conductivity from soil morphology*. Soil Science Society of America Journal 46: 1239 - 1244.
- McLean, E.O., 1982. *Soil pH and lime requirement*. In Methods of soil analysis, ed. A.L. Page, pt. 2, 199-224. Agronomy Monographs No. 9. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Millington, R.J., and Quirk, J.P. 1961. *Permeability of porous solids transactions of the Faraday Society*. 57: 1200-1206.
- Montgomery, D.C., 1985. *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley and Sons. New York. 520 pp.
- Mualem, Y., 1986. *Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas*. In Methods of soil analysis, ed. A. Klute, pt. 2, 799-823. Agronomy Monographs no. 9. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Muchena, F.N., 1979. *Use of soil physical characteristics for land evaluation*. In R. Lal and D.J. Greenland (eds) "Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics", J. Wiley & Sons, U.K.: 427-440.
- Nearing, M.A., L.J. Lane, and V.L. Lopes, 1994. *Modeling soil erosion*. In R. Lal (ed) "Soil Erosion Research Methods", 2nd edition, Soil Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

- Nelson, D.W., and L.E. Sommers, 1982. *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. In A.L. Page (ed) "Methods of Soil Analysis". Part 2, 2nd ed., ASA Monograph 9. Madison, WI: 539-594.
- O'Neill, R.V., D.L. DeAngelis, J.B. Waide, and T.F.H. Allen, 1986. *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 283 PP.
- Oakley, G., 1991. *The statistics of resource and environmental appraisal: Australian developments; parallels and contrasts with Canada*. In Hamblin, A., (ed). *Environmental indicators for sustainable agriculture*. Report on a National Workshop, 28-29 November, 1991, Bureau of Rural Resources, Land and Water Resource Research And Development Corporation, Canberra, Australia: 49-53 pp.
- Okigbo, B.N., 1978. *Cropping systems and related research in Africa*. AAASA Occasional Pub. Ser. OT-1, Addis Abeba, Ethiopia, 81 pp.
- Oldeman, L.R., 1991-92. *Global extent of soil degradation*. ISRIC. Biannual Report, Wageningen, Holland: 19-36.
- Olson, K.R., 1985. *Characterization of pore distribution within soils by mercury intrusion porosimetry and water release methods*. Soil Sci. 139: 400-404.
- Olson, K.R., 1987. *Method to measure soil pores outside the range of Hg intrusion porosimeter*. Soil Sci. Soc. Am: J.51: 132-135.
- Olson, K.R., and T.M. Zobeck, 1989. *Improved mercury-displacement method to measure the density of soil aggregates*. Soil Sci. 147: 71-75.
- Page, A.L. (de), 1982. *Methods of soil Analysis*. Part 2, 2nd ed. ASA Monograph 9, Madison, WI.
- Papendick, R.I., 1992. *Maintaining the soil physical condition*. Proc. Symposium on Soil Resilience and Land use, September 1992, Budapest, Hungary.
- Parr, J.F., R.I. Papendick, S.B. Hornick, and R.E. Meyer, 1992. *Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture*. Am. J. Alternative Agric. 7 (1 & 2): 5-11.
- Pierce, F.J., and R. Lal, 1994. *Monitoring soil erosion's impact on crop productivity*. IN R. Lal (ed) "Soil Erosion Research Methods", 2nd Edition, Soil Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Pierce, F.J., W.E. Larson, R.H. Dowdy, and W.A.P. Graham, 1983. *Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion*. J. Soil Water Cons, 38: 39-44.
- Reganold, J.P., 1986. *The land capability classification system*. Northwest Land Use Review. 2: 11-13.

- Renard, K.G., J.M. Lafen, and D.K. McCool, 1994. *The revised Universal Soil Loss Equation*. In R. Lal (ed) "Soil Erosion Research Methods", 2nd edition, Soil Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Reynolds, W.D., and D.E. Elrick, 1991. *Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer*. Soil Sci. Soc. Amer. J. 55: 633-639.
- Rhoades, J.D. 1982. *Soluble salts*. In Methods of soil analysis, de. A.L.. Page, pt 2, 167-179. Agronomy Monographs No. 9. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Ritchie, J.T., 1981. *Soil water availability*. Plant and Soil 58: 327-338.
- Ritchie, J.T., U. Singh, D.C. Goodwin, and L. Hunt, 1989. *A users guide to CERES*. Training Manual, IFDC, Muscle Shoals, AL.
- Rose, C.W., 1994. *Research on soil erosion processes and a basis for soil conservation practices*. IN R. Lal (ed) "Soil Erosion Research Methods", 2nd edition, Soil Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Ryan, T.P., 1989. *Statistical Methods for Quality Control*. John Wiley and Sons, New York. 446 pp.
- Singh, K.K., T.S. Colvin, D.C. Erbach, and A.Q. Mughal, 1992. *Tilth index. An approach to quantifying soil tilth*. Amer. Soc. Ag. Eng 35: 1-9.
- Skidmore, E.L., 1994. *Wind erosion*. In R. Lal (de) "Soil Erosion Research Methods", 2nd edition Soil Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Skidmore, E.L., L.J. Hagen, D.V. Armburst, A.A. Durar, D.W. Fryrear, K.N. Potter, L.E. Wagner, and T.M. Zobeck, 1994. *Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion*. In R. Lal (ed) "Soil Erosion Research Methods", 2nd edition, Soil Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Smith, J.L., J.J. Halvorson, and R.I. Papendick, 1993. *Estimating soil quality using Multivariate Indicator Kriging*. Soil Sci. Soc. Amer. J.
- Soil Survey Staff, 1984. *Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey*. Soil Survey Investigations. Report No. 1, SCS-usda, Gov't. Printing Office, Washington, D.C.
- Stanford, G., 1982. *Assessment of soil nitrogen availability*. In Nitrogen in agricultural soils, ed, F.J. Stevenson, 651 pp. Agronomy Monographs no. 22. Madison, WI: ASA, SSSA.
- Stevenson, F.J. 1982. *Humus chemistry: genesis, composition reactions*. J. Wiley & Sons, NY, 443 pp.

- Storie, E.R., 1976. *Storie index rating*. Spec. Pub. 3203. Appendix D, Div. Of Agric. Sciences, Univ. Of California, Berkeley.
- Swift, M.J. and P. Woome, 1993. *Organic matter and sustainability of agricultural systems*. In K. Mulongoy and R. Mercer (eds) "Soil Matter Dynamic and Sustainability of Tropical Agriculture", J. Wiley & Sons, U.k.: 3-18.
- Taylor, H.M., and Terrell, E.E., 1982. *CRC handbook of agricultural productivity*, de. J. Rechigl, Jr. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Thomas, G.W., 1967. *Problems encountered in soil methods*. In Soil testing and plant analysis, pt. 1, 37-54. Soil Science Society of America. Special Publications no. 2. Madison, WI: SSSA.
- U.S. SLS, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Handbook No. 60. Washington, D.C.: Government Printing Office.
- USDA, 1992. *Proceedings of the soil Quality Standards Symposium*. San Antonio, Texas, 23 October, 1990. USDA Forest Service, Washington, D.C. 80 pp.
- VanDiepen, C.A. Vankeulen, H., Wolf, J., and Berkhout, J.A.A., 1991. *Land evaluation: from intuition to quantification*, de. B.A. Stewart. Advances in Soil Science, vol. 15. New York: Springer-Verlag.
- Wagenet, R.J., J. Bouna, and R.B. Grossman, 1991. *Minimum data sets for use of soil survey information in soil interpretive models*. pp. 161-182. In M.J. Mausbach and L.P. Wilding (eds) Spatial Variabilities of Soils and land forms. SSSA Spec. Publ. Number 28. Soil Sci. Soc. Am., Inc., Madison, WI 53711.
- Walker, J. And B. Jones, 1991. *What is meant by indicators and the decision behind those chosen for environmental Indicators for Sustainable Agriculture*. Report on a National Workshop, Dept. of Primary Industry and Energy, Bureau of Rural Resource, Camberra, Australia: 44-49.
- Wilding, L.P., 1988. *Improving our understanding of the composition of the soil-landscape*. In Proceedings of an International Interactive Workshop on Soil Resources: Their inventory, Analysis and Interpretation for Use in the 1990's, 13-39. St. Paul, MN: University of Minnesota.
- Willey, R.W., and D.S.O. Osiru, 1972. *Studies on mixtures of maize and beans with particular reference to plant population*. J. Agric. Sci. (Cambridge) 79: 519-529.
- Williams, J.R., 1975. *Sediment yield prediction with Universal Soil Loss Equation using runoff-energy factor*. In "Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources", ARS 40, usda, Washington, D.C.: 244-252.

- Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke, 1984. *A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity*. Trans. ASAE 27: 129-144.
- Williams, J.R., K.G. Renard, and P.T. Dyke, 1983. *Epic: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity*. J. Soil Water Cons. 38: 381-383.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith 1978. *Predicting rainfall erosion losses*. Agric. Handbook, 537, USDA, Washington, D.C. 58 pp.
- Wodruff, N.P., and F.H. Siddoway, 1965. *A wind erosion equation*. Proc. Soil Sci. Amer. 29: 602-608.
- WRI, 1992-93. *Towards Sustainable Development: A guide to global environment*. World Resources Institute.