

MÉTODOS para a AVALIAÇÃO do USO SUSTENTÁVEL dos RECURSOS SOLO e ÁGUA nos TRÓPICOS



MA
3m
9

2006.01392

Métodos para a avaliação do
1999 LV-2006.01392



37490-1

ução e adaptação:
dia Conti Medugno
Flávio Dynia

Embrapa

Meio Ambiente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente: Fernando Henrique Cardoso

Ministro da Agricultura e do Abastecimento: Marcus Vinícius Pratini de Moraes

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa

Presidente: Alberto Duque Portugal

Diretores: Dante Daniel Giacomelli Scolari

José Roberto Rodrigues Peres

Elza Angela Battaglia Brito da Cunha

Embrapa Meio Ambiente

Chefe Geral: Bernardo van Raij

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento: Deise M. Fontana Capalbo

Chefe Adjunto Administrativo: Vander Roberto Bisinoto

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Embrapa Meio Ambiente

Ministério da Agricultura e do Abastecimento

MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DO USO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS SOLO E ÁGUA NOS TRÓPICOS

Rattan Lal

Tradução e Adaptação:

Cláudia Conti Medugno e José Flávio Dynia

Embrapa Meio Ambiente

Jaguariúna, SP

1999

EMBRAPA MEIO AMBIENTE – Documentos 03.

Exemplares desta publicação podem ser solicitados à:

Embrapa Meio Ambiente

Rodovia SP-340 – km 127,5 – Bairro Tanquinho Velho

Caixa Postal 69 13820-000 – Jaguariúna, SP

Fone: (019) 867-8700 Fax: (019) 867-8740

e-mail: sac@cnpmma.embrapa.br

Comitê de Publicações:

Aldemir Chaim

Célia M. M. de S. Silva

Franco Lucchini

Julio F. de Queiroz

Magda A. de Lima

Maria Cristina Tordin

Embrapa	
Unidade:	<u>Ai-Sede</u>
Valor aquisição:	_____
Data aquisição:	_____
N.º N. Fiscal/Fatura:	_____
Fornecedor:	_____
N.º QES:	_____
Origem:	<u>Doação</u>
N.º Registro:	<u>01392/06</u>

Revisão: Denise Moraes de Oliveira

Normalização: Maria Amélia de Toledo Leme

Ilustração da capa: Marcelo Eduardo Lelis de Oliveira

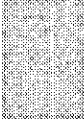
Produção Gráfica: Regina L. Siewert Rodrigues e Franco Ferreira de Moraes

Tiragem: 500 exemplares

LAL, R. Métodos para a avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos;
tradução e adaptação de Cláudia Conti Medugno e
José Flávio Dynia. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 97p. (Embrapa Meio Ambiente - Documentos, 03).

CDD 631.4

©EMBRAPA MEIO AMBIENTE, 1999



Prefácio

O solo e a água são recursos não renováveis e finitos, distribuídos de forma desigual pelas regiões geográficas. A degradação do solo, apesar de sua característica de resiliência, é um problema grave, particularmente nas regiões tropicais e subtropicais, devido ao progressivo aumento da pressão demográfica, ao cultivo de terras marginais, ao uso e manejo incorreto do solo e ao esgotamento da sua fertilidade devido a práticas de agricultura de subsistência, resultado do esforço de pequenos agricultores sem recursos que exploram áreas frágeis em ambientes inóspitos. A degradação do solo, um problema biofísico desencadeado por questões culturais e socioeconômicas, está gerando consequências econômicas, ecológicas e políticas. O complexo problema somente poderá ser efetivamente equacionado através do minucioso entendimento das causas, fatores e processos nele envolvidos.

Informações disponíveis sobre a extensão e a severidade da degradação do solo e da água em escalas locais, regionais e globais são, na grande maioria, qualitativas e subjetivas. A obtenção de dados quantitativos, objetivos e confiáveis, necessita de uma padronização da terminologia e dos métodos usados para a sua obtenção. O presente trabalho apresenta alguns métodos de avaliação do impacto do uso agrícola da terra na qualidade do solo e da água e tem o objetivo de oferecer, na forma de um guia prático, uma fonte de referência sobre procedimentos básicos para avaliar mudanças na qualidade do solo e da água.

É importante reconhecer estas mudanças antes que se inicie um severo processo de degradação. A identificação de indicadores apropriados da qualidade do solo e água é necessária para orientar medidas de intervenção que evitem a degradação irreversível desses recursos, e favoreçam a restauração de sua qualidades.

O trabalho enfoca especificamente os solos dos trópicos. Seus usuários são encorajados a introduzir modificações apropriadas nos métodos descritos da forma de atender necessidades locais e específicas.

Rattan Lall

Sumário

1. Princípios e objetivos da avaliação da sustentabilidade	7
• Índices de sustentabilidade	8
2. Escalas de avaliação da sustentabilidade	11
• Escala temporal	11
• Escala sistêmica	12
• Escala espacial	14
3. Indicadores ou critérios de sustentabilidade do solo	17
4. Processos e propriedades chave do solo	23
5. Indicadores de uso sustentável da água	27
6. Indicadores de mudanças climática	29
7. Produtividade como indicador de sustentabilidade	33
8. Indicadores de manejo do solo e cultura	37
9. Indicadores de recursos	39
10. Indicadores de sustentabilidade para diferentes ecorregiões	43
• Trópicos úmidos	43
• Trópicos semi-úmidos e semi-áridos	43
• Trópicos áridos	47
11. Métodos para avaliação de indicadores	51
• Avaliação de indicadores físicos de solo	51
• Avaliação de indicadores químicos e nutricionais do solo	56
• Avaliação da fauna do solo	59
• Avaliação da erosão do solo	59
12. Plano de amostragem e frequência de monitoramento	63
13. Base conceitual para a definição de níveis críticos de indicadores	67
14. Níveis críticos sugeridos para indicadores chave	71
15. Análise e interpretação dos dados	75
16. Lista de checagem e sequência de passos na avaliação da sustentabilidade	81
17. Prioridades de pesquisa e desenvolvimento	85
18. Referências Bibliográficas	89

MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DO USO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS SOLO E ÁGUA NOS TRÓPICOS¹

Cláudia Conti Medugno²

José Flávio Dynia³

1.

Princípios e objetivos da avaliação da sustentabilidade

A alta produtividade agrícola deve ser conciliada com padrões elevados de qualidade do meio ambiente. Tais metas não são mutuamente exclusivas nem difíceis de se atingir. O objetivo da agricultura sustentável é manter, de preferência, uma tendência de crescimento na produtividade per capita, preservar a capacidade produtiva dos solos e regular o meio ambiente. Os principais objetivos da avaliação da sustentabilidade incluem conservar os recursos naturais, caracterizar e quantificar os principais processos degradativos, identificar características de resiliência e restauração dos recursos solo e água e identificar opções de manejo compatíveis com seu potencial e suas limitações, e definir opções políticas para encorajar

¹Título original: Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics, de Rattan Lal, SMSS Technical Monograph N°21, 1994. Tradução e adaptação de Cláudia C. Medugno e José Flávio Dynia.

²Química, M.Sc., Embrapa Meio Ambiente, Caixa Postal 69, 13820-000 – Jaguariúna, SP.

³Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Embrapa Meio Ambiente.

seu uso sustentável. A quantificação da sustentabilidade implica em medidas precisas de produtividade, capazes de incluir custos e benefícios, inclusive os indiretos, como por exemplo o custo do nitrogênio adicionado ao solo através de fixação biológica *versus* a aplicação de nitrogênio na forma de fertilizantes orgânicos ou inorgânicos. No entanto, a ausência de foco, o estabelecimento de objetivos múltiplos e mutuamente exclusivos, a utilização de diferentes escalas de medidas espaciais e temporais e de critérios de avaliação não padronizados são algumas das causas do insucesso em alcançar a sustentabilidade da agricultura e a qualidade do meio ambiente.

ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE

A quantificação da sustentabilidade é essencial na avaliação do impacto dos sistemas de manejo sobre a produtividade real e potencial, e sobre o ambiente. Alguns índices relacionados a esse aspecto são apresentados a seguir:

1. Produtividade (P): a equação 1 relaciona produção com unidade de recurso.

$$P = p/R \quad (\text{Equação 1})$$

Onde **P** é a produtividade, **p** é a produção total e **R** é o recurso usado.

2. Fator Total de Produtividade (TFP): é definido pela unidade de custo de todos os fatores envolvidos (Herdt, 1993), como mostrado na Equação 2:

$$TFP = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (R_i \cdot C_i)} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde **p** é a produção total, **R** é o recurso, **C** o seu custo e **n** o número de recursos usados para alcançar a produção total.

3. Coeficiente de sustentabilidade (Cs): é uma medida das mudanças nas propriedades do solo em relação à produção, sob um sistema específico de manejo (Lal, 1991), conforme definido pela Equação 3:

$$C_s = f(O_i, O_d, O_m)_t \quad (\text{Equação 3})$$

Onde **Cs** é o coeficiente de sustentabilidade, **Oi** é a produção por unidade de insumo que maximiza a produtividade ou lucro per capita, **Od** é a produção por unidade de declínio no recurso mais limitante ou não renovável, **Om** é a produção mínima assegurada e **t** é o tempo.

4. Índice de Sustentabilidade (Is): é uma medida de sustentabilidade que relaciona produtividade com mudanças no solo e nas características ambientais (Lal, 1993; Lal & Miller, 1993), conforme descrito na equação 4:

$$I_s = f(P_i * S_i * W_i * C_i)_t \quad (\text{Equação 4})$$

Onde **Is** é o Índice de Sustentabilidade, **Si**, **Wi** e **Ci** são, respectivamente, mudanças nas propriedades do solo, qualidade do recurso água e fator climático, ao longo do tempo **t**.

5. Sustentabilidade agrícola (As): é um índice amplo, baseado em diversos parâmetros associados com a produção, conforme definido pela Equação 5 (Lal, 1993):

$$A_s = d(P_t * S_p * W_t * C_t)dt \quad (\text{Equação 5})$$

Onde **As** é a sustentabilidade agrícola, **P_t** é a produtividade por unidade do insumo do recurso limitado ou não renovável, **S_p** é uma propriedade crítica do solo, (por exemplo, teor de matéria orgânica), **W_t** é a capacidade de água disponível, incluindo sua qualidade, **C_t** é o fator climático, tal como fluxo gasoso a partir da atividade agrícola e **t** é o tempo.

6. Coeficiente de Sustentabilidade multi-propósito (Sc):

é um índice complexo, baseado em uma ampla gama de parâmetros e é similar a As. Define-se pelas Equações 6 e 7:

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

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

Onde **Pt** é a produtividade por unidade de insumo do recurso limitado, **Pd** é a produtividade por unidade de declínio em determinada propriedade do solo, **Pm** é a produtividade mínima assegurada, **Sc** é o nível crítico da propriedade do solo, **Wt** é o regime e qualidade da água no solo, **Ct** é o fator climático e **t** é o tempo.

2. Escalas de avaliação da sustentabilidade

Os problemas conceituais da avaliação da sustentabilidade podem ser resolvidos relacionando-se os dados em uma escala adequada. A avaliação pode ser feita em diferentes escalas temporais, sistêmicas e espaciais.

A. Escala Temporal

Diferentes escalas temporais podem ser usadas na avaliação da sustentabilidade (Tabela 1), sendo que a escolha da escala mais adequada depende dos objetivos. A avaliação da sustentabilidade econômica é geralmente feita em escalas de curto prazo, variando de uma a diversas safras. Os aspectos sociais e biofísicos são melhor avaliados em escalas de longo prazo, abrangendo várias gerações no espaço de décadas ou até séculos. Estudos ecológicos deveriam ser conduzidos em séries de décadas, para produzir resultados tangíveis, capazes de orientar o manejo dos recursos naturais. Tais estudos requerem um planejamento cuidadoso e projetos flexíveis, que possam acomodar possíveis mudanças nos sistemas de manejo ao longo do tempo.

Tabela 1. Escalas temporais para avaliação de sustentabilidade

Aspectos	Escala
Avaliação econômica e lucratividade	Uma ou várias safras
Tendências de rendimento	Cinco a vinte anos
Propriedades do solo	Uma a várias décadas
Características hidrológicas	Uma a várias décadas
Parâmetros ecológicos	Várias décadas a séculos
Aspectos sociais e culturais	Poucas a várias gerações

B. Escala sistêmica

Escalas sistêmicas para a avaliação da sustentabilidade estão descritas na Tabela 2. A avaliação de alterações no solo e na água, induzidas pelo manejo, requer cuidadosa consideração na escolha das escalas temporal e sistêmica adequadas (Tabela 3). A frequência de medida desses parâmetros também é importante e será discutida posteriormente.

Tabela 2. Escalas sistêmicas para avaliação de sustentabilidade.

Aspectos	Escala
Biodiversidade	Gen
Fotossíntese	Planta
Rendimento	Colheita
Produção	Lavoura
Lucratividade	Fazenda
Água subterrânea e qualidade da água	Unidade de paisagem ou bacia hidrográfica
Balanço hídrico e microclima	Ecorregião ou bioma
Produto nacional bruto/produtividade per capita	Unidade nacional ou política
Mudança climática em meso e macro escala	Regional
Concentração de gases na atmosfera/ temperatura dos oceanos, etc.	Global

Tabela 3. Escalas temporal e sistêmica para avaliação de mudanças induzidas por manejo em propriedades hidrológicas e do solo.

Propriedade/processo	Escala Temporal	Escala Sistêmica
Processo de solo		
Erosão	cinco a 20 anos	Declive/bacia hidrográfica
Compactação	uma a várias estações	Parcela de terreno/propriedade
Acidificação	uma a várias estações	Associação de solos
Depleção da fertilidade	cinco a 20 anos	Associação de solos/propriedade
Propriedades do solo		
Físicas, Químicas, Nutricionais	um a diversos anos	Associação de solos/propriedade
Regime de água		
Balanço hídrico	Poucos a diversos anos	Unidade de paisagem, bacia hidrográfica
Capacidade de água disponível	Poucos a diversos anos	Associação de solos/propriedade
Qualidade da água	Poucos a diversos anos	Bacia hidrográfica, aquífero, propriedade
Microclima		
Balanço energético	dez a 50 anos	Parcela de campo
Temperatura do ar e do solo	Poucos a diversos anos	Parcela de campo
Regime efetivo e probabilidade de chuvas	Poucas a diversas décadas	Unidade de paisagem

C. Escala espacial

Os indicadores de sustentabilidade podem ser avaliados em diferentes escalas espaciais (Tabela 4). No entanto, nem todos os indicadores podem ser avaliados em todas as escalas. Walker & Jones (1991), propuseram uma estrutura hierárquica composta de quatro etapas, e a respectiva identificação de objetivos e indicadores específicos: 1ª- caracterização da paisagem; 2ª- tendências regionais e nacionais; 3ª- resolução espacial ou temporal e 4ª- pesquisa orientada a processo. Esta última é efetuada em nível de microparcels. As alterações nas propriedades do solo, devido aos sistemas de manejo, são avaliadas em escala de parcelas de campo. O objetivo e a metodologia devem ser claramente definidos para cada etapa.

Tabela 4. Escalas espaciais de avaliação de indicadores de sustentabilidade.

Escala	Tamanho	Indicadores de sustentabilidade
Microparcela	<10 m ²	Propriedades do solo, avaliação direcionada a processo
Parcela de campo erodibilidade	10 a 100 m ²	Erosão em sulcos, resposta da cultura ao manejo
Encosta ou paisagem	0,1 a 1 ha	Mudanças do solo devido ao uso da terra ou sistema de colheita, processos hidrológicos e fluviais, caracterização da paisagem
Bacia hidrográfica	1 a 100 ha	Carga de sedimentos, balanço hídrico e energético, qualidade da água, micro clima
Bacia fluvial	milhares de km ²	Taxa de desmatamento, qualidade da água, mesoclima

A escolha de um sistema hierárquico que parte de escalas menores para maiores é uma opção lógica no sentido de avaliar os indicadores, uma vez que os objetivos da avaliação são distintos em diferentes escalas. É necessário sincronizar escala e objetivo e recomenda-se coletar dados em várias escalas interrelacionadas, com particular atenção às escalas locais e regionais, ou indicadores orientados a processos.

Praticamente todos os processos do solo (como erosão, compactação, enxurradas, etc) são "escala dependentes" e, portanto, são avaliados em diferentes escalas temporais, sistêmicas e espaciais. A avaliação comparativa de propriedades e processos medidos em escalas heterogêneas requer o estabelecimento de regras de *scaling* (escalonamento) e a identificação dos limites de extrapolação ou interpolação entre escalas. Em alguns casos, isso envolve uma simples integração através da heterogeneidade espacial, devendo-se então proceder a uma cuidadosa amostragem baseada em métodos estatísticos tradicionais, como a análise multivariada, técnicas de filtragem linear e modelos hierárquicos Bayesianos (King et al., 1987). Em casos complexos, a extrapolação através de escalas não é apenas uma questão estatística, porque a magnitude e a natureza dos processos envolvidos podem mudar quando se aumenta o tamanho da escala. Nesses casos, mesmo pequenas mudanças de escala podem alterar drasticamente a avaliação dos processos e seus impactos. Conseqüentemente, o escalonamento dos resultados envolve procedimentos complexos (Allen & Starr, 1982; O'Neil et al., 1986), como o desenvolvimento de métodos apropriados de predição através de escalas (uma prioridade de pesquisa). No entanto, deixando de lado o problema de escalonamento, o uso de técnicas estatísticas apropriadas é essencial para a análise, síntese e interpretação dos dados. Métodos estatísticos voltados para esse fim estão descritos em diversos livros, como os de Montgomery (1985), Ryan (1989) e Gilliland (1990).

3.

Indicadores ou critérios de sustentabilidade do solo

Os critérios ou indicadores de sustentabilidade podem ser agrupados em três amplas categorias (Walker & Jones, 1991): **Indicadores Resposta**, relativos a características ambientais, referem-se a condições biológicas do recurso solo e sua produtividade; **Indicadores Sensores**, são uma medida dos processos naturais, dos riscos ambientais ou dos efeitos do manejo; **Indicadores de Exposição** ou *habitat*, representam indicadores diagnósticos, que fornecem uma medida da conexão dos indicadores resposta frente ao estresse ambiental.

A sustentabilidade do solo pode ser estimada por avaliações periódicas de indicadores relacionados a processos e propriedades. Um indicador apropriado é aquele que provê uma medida quantitativa da magnitude e intensidade do estresse ambiental experimentado por plantas e animais. Os atributos de sustentabilidade do solo estão descritos em vários trabalhos (Anonymous, 1992; USDA, 1992; Acton, 1993). Existem também informações de levantamentos de solos que podem ser usadas para avaliar qualidade e uso sustentável (FAO, 1976; Bouma, 1989; Van Diepen et al., 1991). No entanto, uma clara distinção deve ser feita entre causas e fatores, propriedades, processos que afetam a qualidade do solo e a sustentabilidade. Os primeiros são dirigidos por forças sociais que incluem pressão demográfica, disputa por terras, e aspirações e necessidades culturais (Figura 1). Essas forças conduzem a uma gama de atividades que se refletem em importantes alterações no solo e no ambiente, como o desmatamento, o uso intensivo das terras, especialmente com monocultura, e o uso de agroquímicos para regular a fertilidade do solo e minimizar a competição das plantas com pragas e doenças.

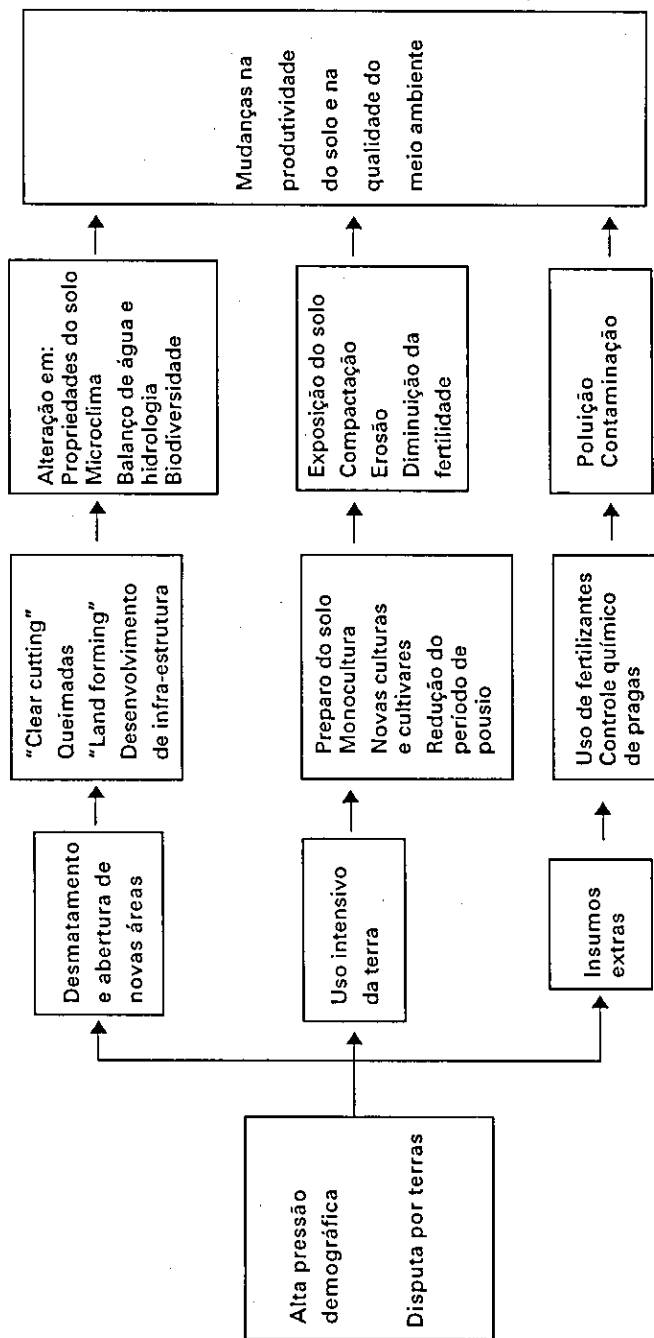


Figura 1. Fatores e causas que determinam a qualidade e a sustentabilidade do solo.

A. Processos e características físicas do solo

1. Características mecânicas: incluem textura, estrutura e distribuição de tamanho de poros e influenciam diversos processos modificadores do solo, como compactação e adensamento, formação de crosta e selo superficial, e infiltração de água e escoamento superficial. Interagindo com características climáticas, tais processos podem acentuar degradações físicas, como erosão acelerada e desertificação.

2. Características hidrológicas: incluem propriedades de retenção e transmissão de água, drenagem superficial e subsuperficial. Estes atributos também influenciam vários processos modificadores do solo, como lixiviação, drenagem profunda, fluxos internos da água e susceptibilidade à seca. Em função do clima e do uso da terra, podem conduzir à anaerobiose, aridez, e eutrofização de águas.

3. Características térmicas: referem-se à capacidade e à condutividade térmica, que interagem com o clima e com o regime de umidade do solo, afetando a temperatura e o fluxo de calor. Influenciam diversos processos modificadores do solo, incluindo mineralização ou decomposição da matéria orgânica, respiração microbiana, desnitrificação e biodiversidade do solo. Interagindo com o uso e manejo do solo e outros fatores ecológicos, esses processos influenciam o conteúdo da matéria orgânica e o fluxo de gases do solo para a atmosfera.

B. Processos e atributos químicos do solo

1. Acidez: pH, acidez total, alumínio trocável e saturação de bases são atributos determinantes da reação do solo. Interagindo com o clima, manejo e uso da terra, influenciam várias reações, incluindo transformação de nutrientes, intemperismo de minerais e processos de adsorção e dessorção. Alterações nesses processos e propriedades, principalmente devido a atividades como cultivo intensivo e uso

de agroquímicos, conduzem a importantes processos modificadores como acidificação, calcificação, eluviação, podzolização, intemperismo de minerais e salinização, sendo este último um importante processo modificador do solo em regiões áridas e semi-áridas sob condições de irrigação.

2. Capacidade e intensidade de nutrientes: os atributos nutricionais do solo são afetados por propriedades como capacidade de troca catiônica, carga elétrica, espécie e concentração de cátions permutáveis, sais solúveis e condutividade elétrica. Esses atributos governam a magnitude e a direção de inúmeros processos, incluindo lixiviação, osmose, difusão, troca iônica, e adsorção e dessorção de nutrientes. Interagindo com o clima, uso e manejo da terra, esses atributos influenciam diversos processos modificadores do solo, entre eles a ciclagem dos nutrientes e a eutrofização.

3. Propriedades húmicas: incluem o teor de carbono orgânico, a biomassa microbiana e as frações ativa e lábil da matéria orgânica do solo, atributos esses que influenciam diversos processos, como mineralização, respiração microbiana, produção de complexos organominerais e fluxos de gases do solo. Interagindo com o clima, manejo e uso da terra, tais atributos e processos influenciam a dinâmica da matéria orgânica no solo, o transporte de carbono nas águas na forma de carbono orgânico dissolvido ou carbono orgânico particulado, e a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera (notadamente CO_2 , CH_4 e NO_x) (Swift & Wooster, 1993).

C. Biodiversidade do solo e processos biológicos

A fauna e a flora do solo influenciam vários processos modificadores e estão agrupadas em 3 categorias:

1. Macrofauna: inclui minhocas, térmitas (cupins), centípodas, milípodas, e outros animais maiores. A população de minhocas e sua atividade são bons indicadores do ambiente do solo,

capazes de afetar a estrutura, fertilidade, ciclagem de nutrientes e crescimento das raízes. Esses animais têm um importante papel na formação e evolução da estrutura do solo e na distribuição do tamanho dos poros. Biocanais ou macroporos criados pela atividade da fauna do solo influenciam o crescimento das raízes, a difusão gasosa, o transporte de água e substâncias químicas da superfície para o subsolo e a água subterrânea e também o ciclo de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica e biomassa e a transformação húmica. Os fluxos da água através dos macroporos são um importante processo, com forte influência na qualidade da água e nos processos hidrológicos (McCoy et al., 1994).

2. Microbiota: responsável por diversas reações como oxidação, fixação biológica do nitrogênio e diversas outras reações não simbióticas com efeitos positivos e negativos sobre a qualidade do solo. A humificação e a dinâmica da matéria orgânica são diretamente influenciadas pela atividade e diversidade de espécies da microbiota.

3. Substâncias húmicas: são compostas de três frações (Swift & Wooller, 1993): a) biomassa do solo ou fração ativa; b) fração lábil; e c) fração húmica, passiva ou estável. Elas desempenham um importante papel na dinâmica da matéria orgânica e influenciam diversos processos como ciclagem de nutrientes, reações enzimáticas, formação de complexos organominerais, etc.

4. Processos e propriedades chave do solo

A avaliação plena de todos os indicadores listados nos itens anteriores não é exequível nem necessária. Alguns poucos indicadores importantes devem ser cuidadosamente escolhidos em relação aos objetivos, e devidamente interpretados e analisados. Oakley (1991), indica algumas características desejáveis dos indicadores:

1. Simples e de fácil mensuração, especialmente em condições de campo.

2. Aplicáveis em diferentes escalas: a erosão, por exemplo, pode ser medida pelas três escalas anteriormente discutidas.

3. Extrapoláveis: os indicadores escolhidos devem ser extrapoláveis para solos e regiões similares.

4. Versáteis: o indicador escolhido deve preferencialmente prover uma medida de vários processos e atributos inter-relacionados. O teor de matéria orgânica é um exemplo de indicador versátil. A taxa de infiltração de água é outro indicador que integra muitas propriedades de transporte de solutos e está relacionada a diversos processos.

5. Relevantes às condições ecológicas: nem todos os atributos são igualmente relevantes para todos os biomas, ecorregiões e classes de solo. Por exemplo, a acidificação pode não ser importante para solos calcários em regiões áridas ou semi-áridas.

6. Dirigidos a processos: relevância para os principais processos degradativos observados na área de estudo.

Levando-se em conta os fatores listados acima, são sugeridos alguns indicadores capazes de prover uma medida das condições anteriores do solo, bem como a magnitude e direção dos processos predominantes (Indicadores Físicos, Tabela 5; Químicos, Tabela 6; e Biológicos, Tabela 7). Esses mesmos indicadores podem ser reagrupados em categorias funcionais, como mostrado na Tabela 8.

Tabela 5. Atributos físicos chave e processos relacionados

Atributos	Processos
Mecânicos	
Textura	Formação de crosta, difusão gasosa e infiltração
Densidade	Compactação, crescimento de raízes e infiltração
Agregação	Erosão, formação de crosta, infiltração e difusão gasosa
Distribuição de tamanho de poros e continuidade	Transmissão e retenção de água, crescimento de raízes, trocas gasosas
Hidrológicos	
Capacidade de água disponível	Estresse por seca, produção de biomassa e evolução do conteúdo de matéria orgânica
Faixa de teor de água não limitante	Seca, desbalanço hídrico e estrutura do solo
Taxa de infiltração	Enxurrada, erosão e lixiviação
Zona de enraizamento	
Profundidade efetiva de enraizamento	Crescimento das raízes, eficiência no uso de água e nutrientes
Temperatura do solo	Fluxo de calor, aquecimento do solo, atividade e diversidade da fauna do solo

Tabela 6. Atributos químicos e nutricionais chave e processos relacionados

Atributos	Processos
pH	Acidificação do solo, disponibilidade de nutrientes
Saturação de bases	Adsorção e dessorção, solubilização
Capacidade de troca catiônica (CTC)	Troca iônica e lixiviação
Nutrientes totais e disponíveis	Fertilidade do solo, reservas de nutrientes
Matéria orgânica do solo	Desenvolvimento da estrutura do solo, mineralização da matéria orgânica, retenção de nutrientes pela biomassa

Tabela 7. Atributos biológicos chave e processos relacionados

Atributos	Processos do solo
População de minhocas, outros componentes da macrofauna do solo, e respectiva atividade	Ciclo de nutrientes, decomposição da matéria orgânica, formação da estrutura do solo
Teor de carbono da biomassa	Respiração e transformações microbianas, formação da estrutura do solo e de complexos organominerais
Carbono orgânico total	Ciclagem (fonte e dreno) e nutrientes, fluxo gasoso respiração do solo

Tabela 8. Categorias de indicadores de sustentabilidade do solo

Categoria	Indicadores
Indicadores resposta	Reservas de nutrientes, capacidade de água disponível, profundidade de enraizamento, balanço hídrico, estação de crescimento, graus dia, estrutura do solo
Indicadores sensores	Ciclo de nutrientes, erosão, fluxo de massa, lixiviação
Indicadores de exposição	Densidade, pH, textura, teor de matéria orgânica, velocidade de infiltração, erodibilidade, CTC

5.

Indicadores de uso sustentável da água

O uso sustentável da água pode ser avaliado por uma gama de indicadores. A Tabela 9 os agrupa conforme o objetivo da avaliação: **Quantidade, Processos, Eficiência de uso e Qualidade**. Do mesmo modo que para a qualidade do solo, a escolha de indicadores apropriados depende dos objetivos da avaliação, dos recursos e facilidades disponíveis e do suporte logístico necessário à condução das análises, ela depende também do uso da terra, das práticas agrícolas e da ecorregião. Em termos de qualidade da água, a carga (suspensa e dissolvida) e as concentrações de agroquímicos são indicadores importantes. A Tabela 10 descreve as categorias de indicadores de sustentabilidade.

Tabela 9. Alguns indicadores de sustentabilidade do recurso água

Objetivo	Indicador
Quantidade	A totalidade dos recursos hídricos (ciclo hidrológico) e diferentes componentes, lençol freático e suas flutuações, recarga da água subterrânea, balanço hídrico, características do fluxo da água superficial
Processos	Enxurrada, inundação, drenagem profunda, recarga da água subterrânea, evaporação e evapotranspiração reciclagem da água
Eficiência de uso	Área de terra irrigada, eficiência do uso da água, perdas por vazamento e evaporação, volume estocado na propriedade e tipo de uso da água para diferentes propósitos
Qualidade	Carga dissolvida e em suspensão, concentração de P e NO ₃ , pH, condutividade elétrica, concentração de pesticidas na água, crescimento de algas, patógenos e microrganismos aquáticos, DBO e DQO

Tabela 10. Categorias de indicadores de sustentabilidade da água

Categoria	Indicadores
Indicadores sensores	Ciclo da água, velocidade de enxurrada, evaporação e evapotranspiração, <i>déficit</i> de água
Indicadores resposta	Balanço hídrico, distribuição total e sazonal de precipitação, água subterrânea e sua recarga, recarga do aquífero
Indicadores de exposição	Carga dissolvida e sedimentos, condutividade elétrica, carbono orgânico particulado e dissolvido, demanda química e biológica de oxigênio

6. Indicadores de mudanças climáticas

Os efeitos diretos do clima sobre a sustentabilidade incluem a quantidade e disponibilidade da água, duração da estação de crescimento das plantas, baseada nos regimes de água e temperatura, produtividade potencial, governada pela qualidade e quantidade da radiação solar e seus efeitos na fotossíntese e eficiência e manutenção do cronograma das operações agrícolas. Os indiretos incluem fatores como degradação do solo e degradação ambiental devido a clima inóspito, eficiência no uso de recursos (por exemplo, água e nutrientes), incidência de pragas e doenças, perdas durante e após colheita, etc.

A escolha de indicadores apropriados de mudança no micro e mesoclima devido a manejo deve ser feita de modo a refletir tanto os efeitos diretos como os indiretos, na produtividade e na sustentabilidade. Os indicadores apresentados na Tabela 11 levam em conta os processos dominantes e as questões referentes à sustentabilidade. A estiagem pode ser um importante fator, mesmo nos trópicos úmidos e subúmidos, e é fator limitante nos trópicos áridos e semi-áridos. As diferenças entre as temperaturas diurna e noturna são um importante fator que afeta a taxa de assimilação líquida de carbono nos biomas tropicais.

Os processos do solo têm um importante efeito no clima global. A geração de gases de efeito estufa no solo, como CO_2 , CH_4 e N_2O , pode ser substancial, afetando sua concentração na atmosfera, e medidas de sua emissão fornecem informações úteis sobre esse efeito. Em geral, solos bem drenados são um sorvedouro para CH_4 . Contudo, uma substancial quantidade de CH_4 pode ser emitida por solos propensos à anaerobiose ou com drenagem deficiente. O arroz irrigado, principal cultura no sul e sudeste da Ásia e em outras áreas dos trópicos, é a principal fonte de emissão de CH_4 pelo solo. A poluição do ar está relacionada, entre outros fatores, com a emissão industrial de SO_x e com a concentração de partículas, que têm algum efeito indireto na produtividade e no uso sustentável do solo e da água.

Como nem todos os indicadores climáticos listados na Tabela 11 podem ser medidos rotineiramente, especialmente através de diferentes escalas, é importante identificar alguns parâmetros-chave e a escala apropriada para suas avaliações (Tabela 12). É possível medir alguns parâmetros através de diversas escalas (diferentes componentes do ciclo hidrológico, por exemplo, podem ser avaliados sob diferentes

Tabela 11. Indicadores de mudanças em micro e mesoclima induzidas por manejo.

Processo/fator	Indicadores
Balanco hídrico	Quantidade total e distribuição sazonal da precipitação, evapotranspiração efetiva e potencial, enxurrada e drenagem profunda, água estocada no solo
Estação de crescimento	Balanco hídrico, início das chuvas, graus dia, irrigação suplementar, radiação líquida sazonal, temperatura do ar e do solo
Estresse pela estiagem	Probabilidade de precipitação, a intervalos de 5 a 7 dias, precipitação efetiva, evapotranspiração efetiva e potencial, capacidade de água disponível no solo
Produtividade potencial	Radiação solar líquida, umidade relativa, cobertura de nuvens, flutuação diurna da temperatura do solo e do ar, balanço hídrico, graus dia, duração de estação de crescimento
Qualidade do ar	Emissão de gases (CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC'_s), SO_x e concentração de poeira

hierarquias de escalas espaciais e temporais), mas a eficiência do uso da água somente pode ser avaliada em sistemas de cultivo ou práticas agrícolas. Os indicadores podem, também, ser agrupados segundo diferentes categorias funcionais (Tabela 13). A escolha de indicadores climáticos depende da disponibilidade de equipamentos e suporte logístico.

Tabela 12. Indicadores climáticos chave e respectiva escala de medidas

Escala	Indicadores climáticos
Espacial	
Bacia hidrográfica	Balanço hídrico incluindo todos os componentes do ciclo hidrológico, quantidade e distribuição da precipitação
Paisagem	Armazenamento de água no solo, enxurrada, microclima em relação à declividade
Parcela	Temperatura do solo e do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação líquida
Sistêmica	
Sistema de cultivo	Eficiência do uso da água, uso da água pela cultura, evapotranspiração, temperatura do dossel
Planta	Fotossíntese líquida, estado hídrico da planta
Temporal	
Diurna	Temperatura média mínima e média máxima do solo e ar, umidade relativa, evaporação de tanque, quantidade e intensidade da precipitação
Sazonal	Balanço hídrico, graus dia, início e final das chuvas
Anual	Recorrência das precipitações e eventos de enxurrada, probabilidade de ocorrência de seca, eventos cíclicos

Tabela 13. Categorias de indicadores climáticos

Categoria	Indicadores
Indicadores resposta	Balanço hídrico sazonal ou anual, duração da estação de crescimento, graus dia
Indicadores sensores	Probabilidade de ocorrência de seca, início e final das chuvas, risco de perda de colheita
Indicadores de exposição	Temperatura média mínima e média máxima do solo e ar, umidade relativa, radiação líquida, quantidade e intensidade de chuvas

7.

Produtividade como indicador de sustentabilidade

A produtividade das culturas é um bom integrador dos fatores solo, água, bióticos e climáticos. A produtividade pode ser avaliada por diversos métodos, alguns destes listados na Tabela 14.

Tabela 14. Indicadores de produtividade

Indicador	Escala e objetivos das medidas
Biomassa total	Expressa em unidade de área, unidade de tempo, ou ambos
Rendimento agrônomo	Expressa em unidade de área, unidade de tempo, ou ambos
Rendimento econômico	Determinado em termos de retorno líquido
Eficiência de uso de recursos	Computado em termos da eficiência de uso da água, nutrientes ou energia
Produtividade potencial versus efetiva	Produtividade potencial depende das características inerentes, insumos e manejo
Relação equivalente de terra (LER)	Expressa como uma medida da intensidade do uso da terra
Intensidade de cultivo	Computada como o número de cultivos realizados por ano na mesma área
Relação equivalência área tempo	Considera a duração do crescimento de cada cultura em um sistema de cultivo misto
Fluxo de energia Termodinâmica	Energia total (valor calórico) produzida Energia produzida por unidade de insumo energético

É importante confrontar a produtividade potencial e a efetiva. Em sistemas de manejo com alta tecnologia, a produção efetiva pode exceder a potencial, particularmente em solos com baixa fertilidade inerente e em ambientes inóspitos. A produtividade potencial pode ser estimada por diversos modelos, por exemplo, CERES (Ritchie et al., 1989); EPIC (Williams et al., 1984); PI (Kiniry et al., 1983; Pierce et al., 1983) e o Calculador da Produtividade de Solos Tropicais (Aune e Lal, 1994). Se a disponibilidade de terra é um fator limitante, os índices apropriados de produtividade são o Fator Uso da Terra (L), Relação Terra Equivalente (LER) e Relação Equivalente Tempo Área (ATER). O Fator Uso da Terra (L) é definido como a relação entre o período de cultivo (C) somado ao período de pousio (F) e o período de cultivo C (Okigbo, 1978):

$$L = \frac{C+F}{C} \quad (\text{Equação 8})$$

O fator **L** é geralmente elevado para sistemas de baixa intensidade, por exemplo, o cultivo itinerante. O LER é calculado conforme a Equação 9 (Willey & Osiru, 1972):

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

Onde **Y_i** e **Y_m** são, respectivamente, os rendimentos das culturas componentes dos sistemas intercalado e monocultivo e **n** é o número de culturas envolvidas. Tendo em vista que o ciclo das culturas varia consideravelmente, no cálculo do índice ATER esse fator é levado em conta (Hiebsch & McCollun, 1987):

$$ATER = 1/t = \sum_{i=1}^n (d \cdot Y_i/Y_m) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde **d** é o ciclo da cultura e **t** é o tempo, em dias, de ocupação do campo, ou seja, o período de crescimento da cultura de ciclo mais longo. Os valores numéricos de **ATER** se aproximam daqueles do **LER** para uma mistura consistindo de culturas de ciclos quase idênticos, ou seja, quando $t=d$ na Equação 10. Comparativamente, a produtividade também pode ser expressa em termos da eficiência do uso do recurso mais limitante, por exemplo, água, nutrientes, energia ou trabalho.

Quanto aos indicadores de produtividade econômica, estes incluem relação custo-benefício, demanda *versus* oferta, lucro total ou componentes do lucro, balanço econômico da propriedade no tempo, tendências da renda, etc. A qualidade dos produtos é outro indicador da produtividade e pode ser expressa de vários modos, como qualidade do cozimento, sabor, qualidade nutricional ou visual.

A escolha dos indicadores de produtividade deve ser baseada nos objetivos da avaliação. A produção da biomassa total, o índice de colheita ou o rendimento agrônômico, expressos em termos de eficiência de uso da água ou nutrientes, são todos indicadores úteis de produtividade. Indicadores relacionados às plantas incluem estande da cultura, expresso como índice de área foliar ou de cobertura, vigor da cultura, determinado pela altura ou pela matéria seca produzida em estádios específicos de crescimento, estado nutricional, indicado por sintomas de deficiência ou suficiência de nutrientes e incidência de doenças e plantas daninhas.

A sustentabilidade do solo e da água pode ser avaliada pela tendência de uso dos insumos externos requeridos para manter a produtividade dos sistemas agrícolas. Em geral, quanto maior o volume de insumos requeridos para produzir a mesma colheita, menos sustentável se torna o sistema (Figura 2). O tempo das operações agrícolas é outro indicador útil de manejo: se todos os outros fatores permanecerem iguais, operações agrícolas realizadas nas datas planejadas são indicativas de uso sustentável dos recursos. Operações adiadas devido à excessiva umidade do solo, ou à necessidade de preparo excessivo para permitir uma boa semeadura, são indicativas de seu uso não sustentável.

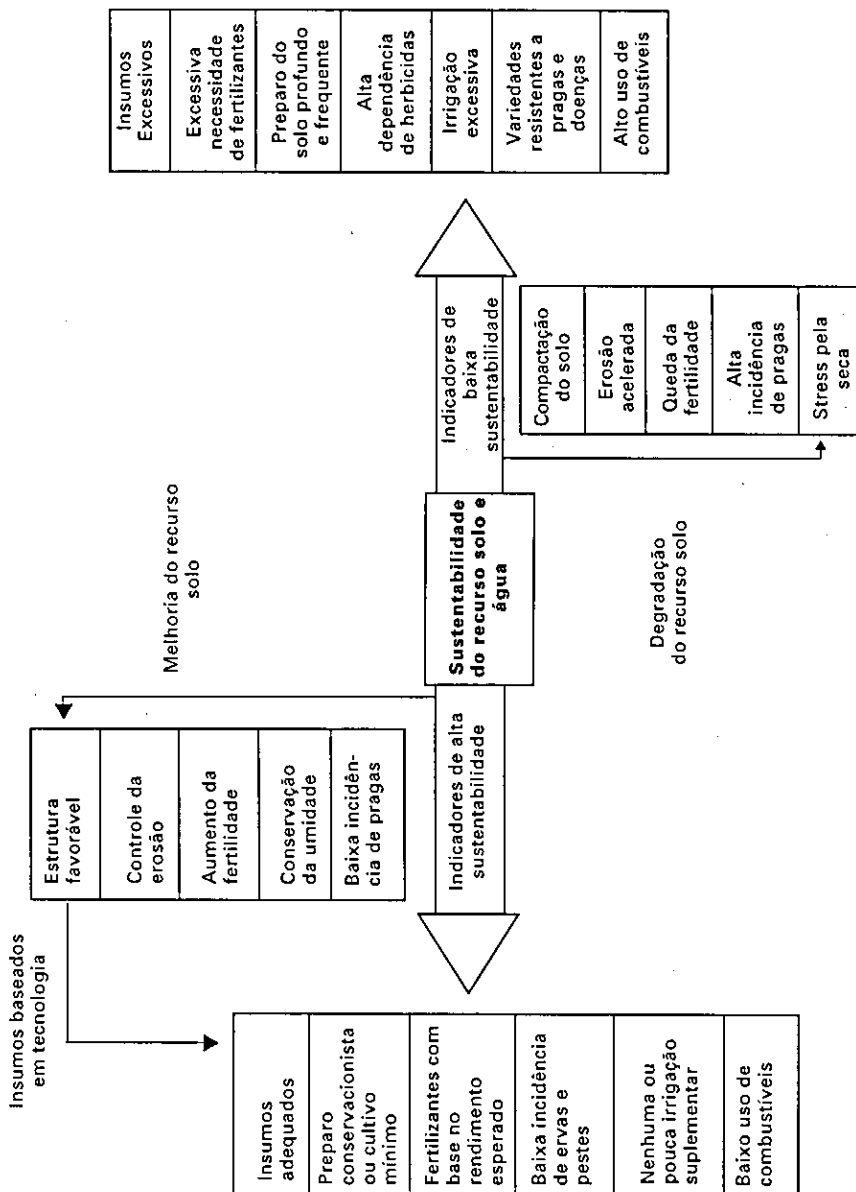


Figura 2. Indicadores de sustentabilidade de solo e de manejo de culturas

9. Indicadores de recursos

O termo recurso é genérico e abrange todos os recursos naturais, como os culturais, biofísicos e socioeconômicos. Os indicadores de recursos tratam referencialmente do uso do conjunto dos recursos, que das propriedades inerentes ao solo, água ou componentes da vegetação. Abordam-se aqui, principalmente, os recursos solo e água e, em menor extensão, os componentes vegetais. Os indicadores podem ser agrupados em quatro amplas categorias:

1. Indicadores do uso da terra: Um sistema agrícola é sustentável somente quando a terra é usada de acordo com sua capacidade. A diversidade das paisagens é um indicador útil de sustentabilidade. A remoção de diversos tipos de paisagem para a abertura de novas áreas pode conduzir ao uso não sustentável.

2. Indicadores de resiliência: a recuperação da terra degradada pode ser usada para avaliar a sustentabilidade dos recursos básicos. Os indicadores de recuperação relacionam-se ao tipo e à intensidade dos processos degradativos, tanto físicos quanto hidrológicos, incluindo compactação, formação de voçorocas (que são indicativas de uso não sustentável), perda de solo e inundações freqüentes. A degradação química do solo inclui redução da fertilidade e desbalanço de nutrientes, incluindo toxicidade de Al, Mn, e deficiência de macro e micronutrientes (N, P, K, Ca, Zn, S) essenciais às plantas. A predominância de plantas daninhas perenes é um sintoma de ausência, tanto de biodiversidade, quanto de sustentabilidade. Ausência, ou baixa população de minhocas, cupins e demais organismos componentes da macrofauna do solo, são indicativos de redução da biodiversidade e degradação dos recursos.

3. Indicadores do recurso água: o suprimento adequado de água é pré-requisito essencial de um recurso básico sustentável. A qualidade e quantidade da água superficial e subterrânea são fatores importantes, e podem ser avaliadas pela descarga total, frequência e pico das inundações, vazão da drenagem, estabilidade dos caminhos de drenagem e leitos de riachos, e qualidade da água, indicada pela quantidade e natureza das cargas suspensa e dissolvida.

4. Indicadores orientados a processos: os indicadores podem ser escolhidos quanto ao processo degradativo predominante, tornando-se especialmente úteis para definir uma estratégia de restauração e considerar possíveis opções de manejo (Figura 3). É interessante efetuar o levantamento de alguns indicadores visuais, antes de empreender medidas detalhadas. Por exemplo, a severidade da erosão pode ser avaliada a partir da cor do solo, pela presença de pedras na superfície e pela exposição de raízes. Similarmente, a compactação e a anaerobiose podem ser qualitativamente avaliadas pela presença de água estagnada, poças, e plantas indicadoras. A ocorrência de plantas adaptadas a situações específicas – como, por exemplo, espécies hidromórficas crescendo em terras úmidas, plantas halomórficas presentes em solos salinizados, espécies tolerantes ao alumínio em solos ácidos, ou simplesmente, culturas mal desenvolvidas, com estande baixo, em áreas propensas a processos degradativos específicos – constitui um bom indicador visual.

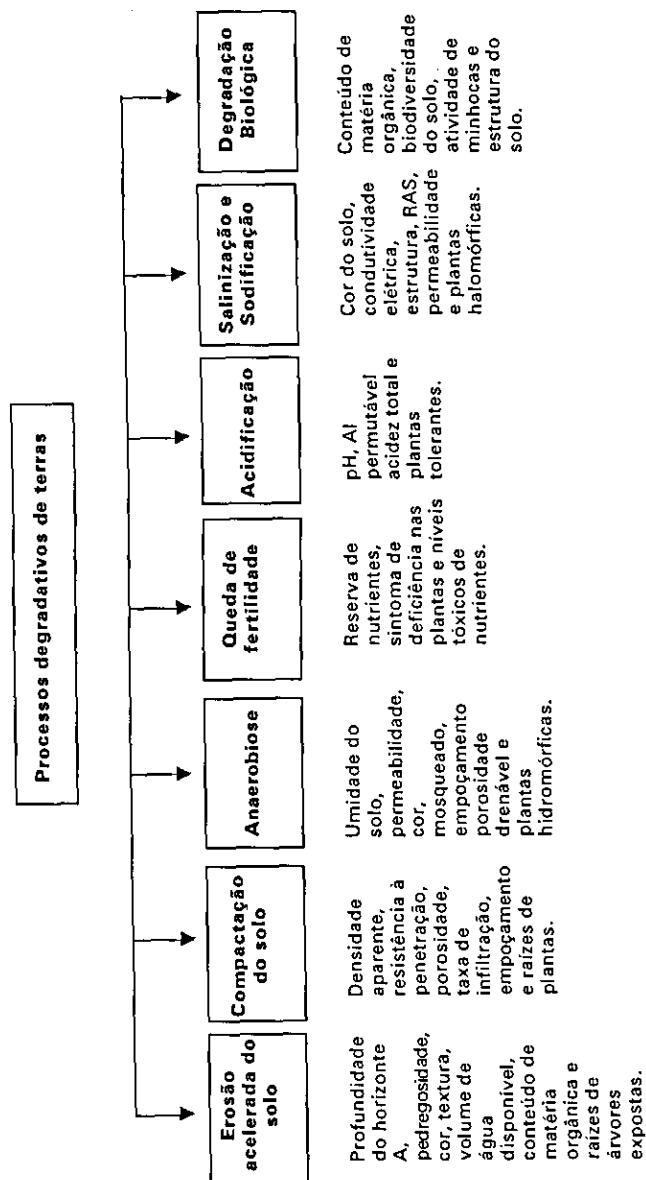


Figura 3. Indicadores de solo, água e planta em relação aos processos predominantes de degradação.

As limitações ao uso sustentável do solo e da água em relação aos recursos naturais são diferentes para cada ecorregião e, como consequência, os indicadores de água e solo são também diferentes (Figura 4):

1. Trópicos úmidos: acidez, baixa fertilidade e concentrações tóxicas de Al e Mn na zona das raízes são as principais restrições dos solos nos trópicos úmidos. Além disso, alguns solos também apresentam estrutura fraca, sendo propensos à compactação e à erosão. Chuvas pesadas e freqüentes, baixa radiação, e espessa cobertura de nuvens trazem sérios problemas para o uso das terras aráveis nessas regiões. Os indicadores de uso sustentável dos recursos naturais nos trópicos úmidos estão listados na Tabela 15.

2. Trópicos semi-úmidos e semi-áridos: indicadores importantes para estas regiões estão listadas na Tabela 16. As restrições relacionadas ao uso agrícola e à qualidade ambiental diferem daquelas dos trópicos úmidos. Restrições, tais como estrutura fraca do solo e estiagens, são problemas comparativamente mais severos que restrições químicas e nutricionais e, conseqüentemente, os indicadores devem refletir esses fatores. Por exemplo: pedregosidade e presença de concreções, freqüentemente são fatores adversos ao cultivo do solo. As concreções e a distribuição de tamanho de pedras são bons indicadores das características do solo e das limitações ao manejo. Indicadores de água e clima para essas ecorregiões também devem refletir a importância relativa do estresse hídrico devido à seca.

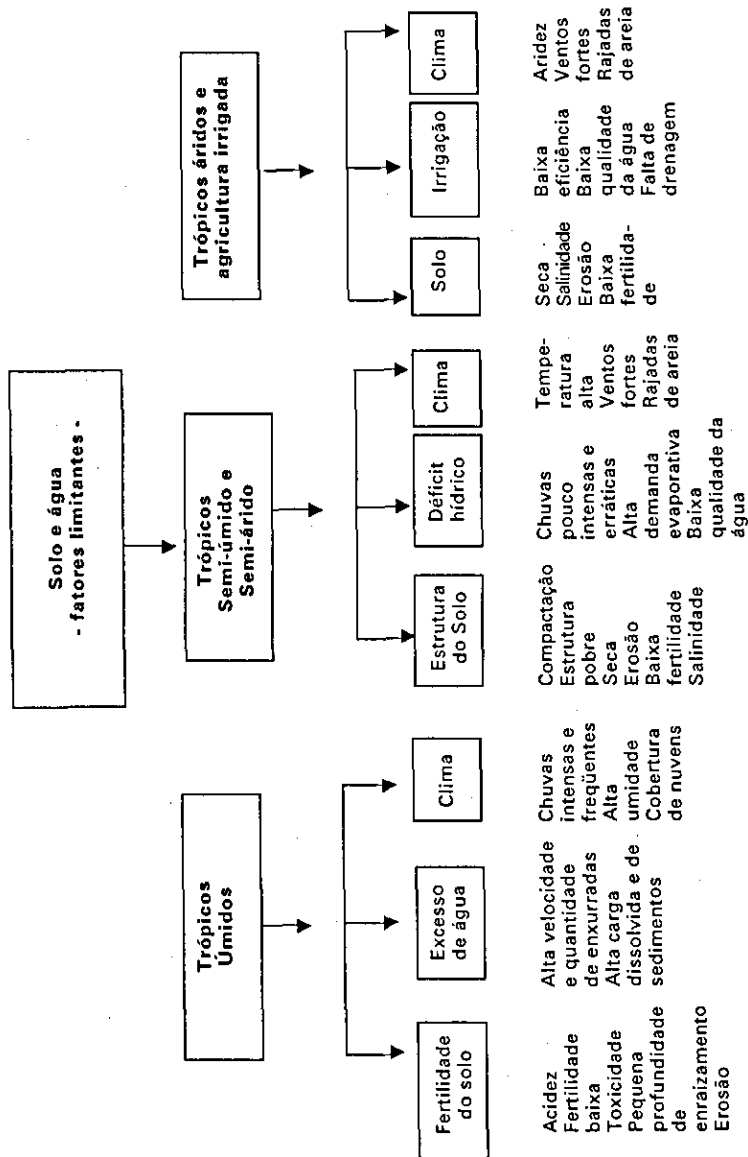


Figura 4. Fatores biofísicos limitantes ao uso sustentável dos recursos de água e solo nos trópicos.

Tabela 15. Indicadores de sustentabilidade de solo e água para os trópicos úmidos

Processos/parâmetros	Indicadores
Solo	
Acidificação	pH, acidez total, saturação de bases, Al e Mn permutáveis.
Fertilidade	Teor total e disponível de nutrientes para as plantas, teor de matéria orgânica, atividade e diversidade das espécies de minhocas e cupins.
Estrutura	Agregação, diâmetro peso médio, densidade e coesão, porosidade e distribuição de tamanho de poros, erodibilidade e profundidade de enraizamento.
Água	Capacidade de água disponível, velocidade de infiltração, condutividade hidráulica (saturada e não saturada).
Erosão	Risco potencial e velocidade efetiva de erosão, sob diferentes sistemas de manejo, perda de solo tolerável, erosão e produtividade das culturas.
Água	
Balanço	Velocidade e volume da enxurrada, fluxo interno, armazenamento de água pelo solo, déficit de água.
Qualidade	Carga suspensa e dissolvida, tipo e concentração de agroquímicos, eutrofização.
Clima	
Chuva	Intensidade e volume, distribuição, período de retorno.
Balanço energético	Radiação solar líquida, temperatura do solo e do ar, balanço energético.

Tabela 16. Indicadores de sustentabilidade de solo e água para trópicos semi-úmidos e semi-áridos

Processos/parâmetros	Indicadores
Solo	
Compactação e grau de dureza	Consistência da crosta, resistência à penetração, porosidade e distribuição de tamanho de poros, taxa de infiltração de água, padrão e intensidade de rachaduras.
Erosão	Magnitude da erosão hídrica e eólica, formação de voçorocas, erodibilidade do solo, relação entre erosão e produtividade, tolerância à perda de solo.
Estrutura	Agregação e estabilidade dos agregados, distribuição e tamanho de poros.
Estresse hídrico	Capacidade de água disponível, profundidade de enraizamento, déficit de água, probabilidade de ocorrência de veranicos.
Fertilidade	Carbono orgânico, macro e micronutrientes totais e disponíveis para as plantas.
Fauna	Atividade e diversidade das espécies de térmitas.
Salinização	Condutividade elétrica, taxa de adsorção do sódio (RAS), sais solúveis totais.
Distribuição de tamanho de partículas	Textura, pedregosidade
Água	
Balanco	Déficit de água, balanço hídrico semanal.
Qualidade	Concentração e natureza de sais solúveis nas águas superficiais e subterrâneas; carga de sedimentos; eutrofização.
Clima	
Chuvas	Início e fim das chuvas, estação de crescimento
Balanco energético	Temperatura do solo e do ar, demanda evaporativa
Ventos	Direção e velocidade do vento, tempestades de areia

3. Trópicos áridos: as estiagens e a degradação dos recursos são as principais restrições ao uso sustentável do solo e da água em regiões áridas. Consequentemente, os três grupos de indicadores listados na Tabela 17 dão prioridade a tais restrições. Tendo em vista que a disponibilidade de água é restritiva, os indicadores mais importantes estão relacionados à irrigação e incluem: a eficiência do dimensionamento do sistema de irrigação em relação às perdas por infiltração e evaporação, demanda de água das culturas em estádios fenológicos críticos e planejamento dos turnos de rega; características de drenagem do solo indicada pela inundação e umedecimento, bem como escoamento, afetando os riscos de salinização e a possibilidade de reciclagem da água na irrigação e em outros usos agrícolas; e características do lençol freático, compreendendo seu nível e flutuações, a recarga do aquífero, e a qualidade da água, especialmente em relação aos riscos de salinização do solo.

O conjunto mínimo necessário de dados pode variar de região para região, porque existem diferenças nas restrições ambientais. Os conjuntos mínimos de dados para as diferentes regiões dos trópicos estão listados na Tabela 18 e se fundamentam em: (i) restrições nutricionais e de fertilidade do solo para trópicos úmidos; (ii) estrutura do solo e condições físicas adversas, conduzindo a erosão e salinização, para trópicos semi-úmidos e semi-áridos; (iii) estiagem, erosão eólica e migração de dunas de areia, para regiões áridas.

Tabela 17. Indicadores de solo e água para trópicos áridos e agricultura irrigada

Processos/parâmetros	Indicadores
Solo	
Estiagem	Balanço hídrico, estação de crescimento, recursos de água superficial e subterrânea, qualidade da água, temperatura do solo e do ar.
Salinidade	Concentração de sais na zona radicular, natureza dos sais e RAS, drenagem e lixiviação de sais, plantas indicadoras de salinidade.
Erosão	Erosão eólica, estrutura e textura, compactação, movimento e estabilização de dunas
Fertilidade	pH, nutrientes totais e disponíveis para as plantas, profundidade de enraizamento.
Pedregosidade superficial	Tamanho e concentração de pedras e concreções
Irrigação	
Tipo e disponibilidade	Eficiência do sistema, necessidade de água das culturas, turno de rega
Drenagem	Perfil de drenagem, características da drenagem superficial, enxurrada, inundação, reciclagem da água drenada.
Lençol freático	Altura e flutuação do lençol freático, recarga do aquífero.
Clima	
Aridez	Demanda evaporativa, temperatura do solo e ar, umidade relativa.
Ventos	Duração e velocidade dos ventos

Tabela 18. Conjunto mínimo de dados para avaliar qualidade do solo nos trópicos

Úmido	Semi-úmido/Semi-árido	Árido
pH, acidez, saturação de bases.	Estrutura do solo, densidade, compactação.	Disponibilidade de água para plantas, profundidade de enraizamento, compactação, formação de crosta .
Densidade aparente, uso da terra, taxa de infiltração, capacidade de água disponível	pH, conteúdo de matéria orgânica, nutrientes disponíveis para as plantas.	Temperatura do solo e do ar, demanda evaporativa, velocidade dos ventos.
Velocidade e volume de enxurradas; volume e intensidade das chuvas, radiação líquida, temperatura do solo.	Erosão hídrica e eólica, voçoroca, erosão, balanço hídrico, enxurrada.	Qualidade da água superficial e subterrânea.
	Salinidade total e tipos de sais, temperatura do solo e do ar, velocidade dos ventos, estação de crescimento.	pH, nutrientes disponíveis para as plantas.

11. Métodos para avaliação de indicadores

O conjunto mínimo de dados reportados por Lamp (1986) e Wagenet et al., (1991), para avaliar a qualidade do solo (Tabela 18) é também aplicável à avaliação do uso sustentável do solo e da água. Os indicadores devem refletir as tendências temporais nas características estudadas sob diferentes sistemas de manejo; os critérios relevantes para escolha de métodos estão listados na Tabela 19. Os métodos analíticos devem considerar a variabilidade espacial (sistemática e randômica); os procedimentos de amostragem adotados devem assegurar a representatividade das características locais e ecorregionais; as medidas devem ser feitas em experimentos de manejo de longo prazo, bem planejados e implementados, e conduzidos na mesma área por pelo menos 10 anos consecutivos, preferivelmente por várias décadas. Alterações em indicadores de solo e água, causadas por estresse ambiental imposto por diferentes tratamentos, somente podem ser quantificadas em experimentos de longo prazo, raros nos trópicos (Lal & Stewart, 1994).

A. Avaliação de indicadores físicos de solo

A maioria das características físicas devem ser medidas *in situ*, ou em amostras indeformadas. Medidas de retenção e transmissão de água e propriedades estruturais são preferencialmente feitas sob condições de campo. Devido à alta variabilidade espacial (Cassel, 1983) e às alterações nas propriedades do solo, conforme o processo de obtenção das amostras, é importante que procedimentos corretos sejam seguidos (Thomas, 1967; Soil Survey Staff, 1984; Bowman et al., 1990; Papendick, 1992). Devem ser feitas, quando necessário, correções apropriadas do conteúdo de cascalho e de material estrutural (Lal, 1979a). Alguns importantes indicadores físicos e os respectivos métodos de avaliação estão listados na Tabela 20.

Tabela 19. Critérios para escolha de métodos para análise de solo e água

Fator	Descrição
Objetividade	Dados obtidos de acordo com os objetivos.
Credibilidade	Exatidão, precisão e confiabilidade.
Relatividade	Análises comparativas entre áreas e ecorregiões baseadas em métodos padronizados.
Eficiência	Custos compatíveis, procedimentos simples e rotineiros.
Simplicidade	Fáceis de usar; equipamentos simples; dados de fácil análise e interpretação.
Efeitos de manejo	Os dados refletem os efeitos de diferentes manejos e uso da terra.
Sensibilidade analítica	Análise interpretativa é importante para a tomada de decisões, especialmente quanto ao uso da terra, sistema de cultivo e insumos.
Variabilidade	Sensibilidade frente à variabilidade espacial.
Complementaridade	Compatibilidade e complementaridade com a base de dados existente.

Tabela 20. Métodos sugeridos para avaliar indicadores físicos do solo

Indicador/ atributo	Método	Referência
Textura	Método da pipeta ou método do hidrômetro, com correção para cascalho	Gee & Bauder, 1986 Lal, 1979a
Cultivo	Índices e processos de cultivo	Singh et al., 1992 Karlen et al., 1990
Estrutura do solo	(i) Porcentagem de Agregados Estáveis em Água > 1 mm e Diâmetro Geométrico Médio (ii) densidade aparente usando amostras indeformadas (iii) permeabilidade ao ar (iv) condutância da crosta (vi) índices estruturais	Kemper & Rosenau, 1986; Edwards & Bremner, 1967 Blake & Hartge, 1986; Manrique & Jones, 1991 Corey, 1986 Falayi & Bouma, 1975 Hanks & Thorp, 1956 Lal, 1991
Capacidade de água disponível	(i) capacidade de campo <i>in situ</i> (ii) ponto de murcha permanente	Klute, 1986 Bruce & Luxmoor, 1986; Klute, 1986
Profundidade de enraizamento	Método dos torrões de solo indeformados	Bohm, 1979
Transmissão de água	(i) condutividade hidráulica saturada em amostras não deformadas (ii) taxa de infiltração (método dos anéis)	Klute & Dirksen, 1986 Klute, 1986 Baver et al., 1972
Resistência do solo	(i) resistência a penetração em teor de umidade conhecido	Blake & Hartge, 1986; Bradford, 1986

1. Textura: após a caracterização inicial, as medidas subsequentes podem ser feitas de 2 a 4 anos, porque a textura do horizonte superficial se altera somente quando a erosão acelerada é o processo degradativo predominante. A erosão remove seletivamente a argila e outras partículas finas, deixando frações grosseiras e material estrutural. As determinações da textura do solo devem ser feitas, preferencialmente, pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986), com a remoção prévia de agentes cimentantes fortemente estruturados, como sesquióxidos, matéria orgânica, materiais calcíferos e silicosos.

2. Compactação (formação de pé de grade): a compactação do solo é quase sempre difícil de quantificar (Karlen & Erbach, 1990). A formação de pé de grade pode ser quantificada pela avaliação de processos, ou computando-se índices de compactação (Singh et al., 1992), divididos em escalas de 0 (ambiente ótimo ou não limitante ao enraizamento) a 1 (restritivo ao enraizamento e não adequado ao crescimento de plantas).

3. Reserva de água no solo: a água disponível, considerada como a diferença entre capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, é expressa com base em volume ou profundidade (Ritchie, 1981; Gupta & Larson, 1979a; Bruce & Luxmoore, 1986; Cassel & Nielsen, 1986; Klute, 1986). A capacidade de campo, limite superior do teor de água disponível, deve ser determinada *in situ*, após o solo saturado ter sido drenado por gravidade, sem evaporação superficial. Caso isto seja impraticável, a capacidade de campo pode ser determinada em laboratório, em amostras indeformadas, usando painéis extratoras de pressão. A capacidade de campo pode variar de 0,006 MPa a 0,01 MPa para solos arenosos, e de 0,03 a 0,05 MPa para solos argilosos. O ponto de murcha permanente pode ser determinado em amostras peneiradas, com potencial de 0,5 a 1,5 MPa, dependendo da textura do solo (Lal, 1979a). A técnica de termalização de neutrons é inadequada para muitos solos, como aqueles com alta concentração

de Fe, B e Mn, com linhas de pedras e solos com argilas expansivas (Lal, 1974; 1979b). O uso de blocos de gesso apresenta problemas em solos ácidos. O método gravimétrico é o mais confiável, embora trabalhoso.

4. Estrutura do solo: é um atributo complexo e difícil de quantificar. Diversas técnicas e métodos conceituais são descritos por Blake & Hartge, (1986) e Kay, (1989). Os aspectos morfológicos da estrutura do solo envolvem a agregação e a distribuição de tamanho dos agregados. As técnicas de medida incluem peneiramento a úmido ou a seco (Kemper & Rosenau, 1986) e os resultados podem ser expressos como percentagem de agregados estáveis em água, com diâmetro maior que 0,5 mm ou 1,0 mm. Os dados também podem ser computados em termos de diâmetro médio ponderado ou diâmetro médio geométrico. Os atributos funcionais da estrutura do solo são melhor avaliados pela determinação da porosidade total, macroporosidade e distribuição de tamanho dos poros. Este último é um importante aspecto da caracterização da estrutura (Olson, 1985; Olson, 1987; Olson & Zobeck, 1989). Macroporosidade, ou porosidade de drenagem, medida com sucção de 0,006 MPa ou 0,01 MPa, é uma medida da capacidade do solo de transmitir água, ou sua susceptibilidade à anaerobiose. A distribuição do tamanho de poros pode ser determinada a partir das características de retenção de umidade (Childs & Collis-George, 1950).

5. Resistência e profundidade de enraizamento: a compactação do solo é medida diretamente pela avaliação de sua densidade (Blake & Hartge, 1986), ou da distribuição de tamanho de partículas (Gupta & Larson, 1979b). A resistência e o adensamento do solo afetam o desenvolvimento das raízes; a resistência pode ser indiretamente avaliada pela medida da resistência à penetração, expressa como kg/cm² ou kPa (Bradford, 1986), sempre relacionada à umidade do solo no momento das medidas; a resistência da crosta

pode também ser avaliada por sua resistência à penetração; a condutividade hidráulica da crosta é um indicador útil relacionado ao crescimento das culturas (Falayi & Bouma, 1975); a densidade aparente é outra medida indireta da compactação e dureza do solo em relação ao crescimento das raízes. A profundidade efetiva de enraizamento é um indicador importante de produtividade do solo, podendo ser estimada a partir de suas características (Groenevelt et al., 1984), ou determinada por diversos métodos (Bohm, 1979). Um método, simples e prático, consiste na obtenção de torrões de solo indeformado e na contagem de raízes nas arestas quebradas naturalmente, sendo os dados expressos em densidade de comprimento de raízes (Taylor & Terrel, 1982).

6. Propriedades de transmissão da água: podem ser determinadas em laboratório, pela medida da condutividade hidráulica saturada (K_s) ou insaturada (K_g), em amostras indeformadas. A determinação também é possível em condições de campo, usando o método do trado (Klute, 1986). Existem diversos modelos para prever a permeabilidade do solo (Child & Collis-George, 1950; Marshall, 1958; Millington & Quirk, 1961; Green & Corey, 1971; McKeague et al., 1982). A velocidade de infiltração é um importante indicador que integra diversas características físicas do solo e representa uma medida de sua capacidade para receber água na interface solo/ar e transmiti-la através do perfil; a taxa de equilíbrio é atingida após uma coluna de água constante ser mantida na superfície do solo por cerca de 3 horas. Um indicador apropriado das características de transmissão de água é a taxa de infiltração, determinada a campo por meio de infiltrômetros de anéis concêntricos ou simuladores de chuva (Lal, 1979b). Os dados de infiltração podem ser analisados por diversos modelos, como os de Philips, Kostikov, Green-Ampt e Horton (Lal, 1979b).

B. Avaliação de indicadores químicos e nutricionais do solo

As referências dos métodos mais usados estão indicados na Tabela 21.

Tabela 21. Referências dos métodos de determinação de indicadores químicos e nutricionais do solo

Indicador/atributo	Referências
pH	McLean (1982)
Carbono orgânico total	Nelson & Sommers (1982)
Carbono orgânico ativo	Gianello & Bremner (1986)
CTC efetiva	IITA, 1975; Page (1982)
Nitrogênio do solo	Gianello & Bremner (1986); Stanford (1982)
Nutrientes disponíveis para as plantas	Thomas (1967)
Condutividade elétrica e sais solúveis totais	U.S. SLS (1954); Rhoades (1982)

1. pH: a reação do solo determina a solubilidade e a disponibilidade de alguns elementos. Baixos valores de pH, em torno de 4,5 a 5,5, indicam a possibilidade de altas concentrações de Al trocável, e pH entre 7,5 a 8,5 é indicativo da presença de CaCO_3 livre no solo. O pH pode ser determinado em água ou em solução de CaCl_2 0,01 M (McLean, 1982).

2. Carbono orgânico: tanto a quantidade quanto a natureza do carbono orgânico desempenham papel chave na qualidade do solo (Bauer & Black, 1982; Larson & Pierce, 1992; Parr et al., 1992).

Embora o carbono orgânico não seja um nutriente da planta, baixos teores no solo (0,5 a 1%) podem afetar a produtividade (Stevenson, 1982; Allison, 1973), em razão de seu efeito na estrutura e na disponibilidade de água para as plantas e por atuar como fonte ou dreno de nutrientes e pelo tamponamento que oferece contra repentinas flutuações nas características do solo. Além do carbono orgânico total, determinado por métodos de combustão seca ou úmida (Gianello & Bremner, 1986), é também importante determinar o carbono ativo

ou carbono da biomassa, que é mais sensível a alterações no manejo do solo. O carbono orgânico ativo varia de 10 a 20% do teor de carbono orgânico total. Apesar de seus efeitos benéficos largamente conhecidos, é difícil aumentar o conteúdo de carbono no solo, especialmente nos trópicos áridos e semi-áridos, onde grandes e freqüentes aplicações de biomassa são necessárias para manter ou propiciar algum aumento.

3. Fatores capacidade e intensidade de nutrientes: as reservas totais de nutrientes (capacidade) e as reservas disponíveis (intensidade) são importantes indicadores da qualidade e produtividade do solo, e devem ser avaliadas para todos os nutrientes essenciais (Page, 1982). A toxicidade devida a alguns elementos químicos é um aspecto importante de qualidade e produtividade em diversos solos dos trópicos úmidos e subúmidos, como latossolos (*Oxisols*) e podzólicos (*Ultisols*). A capacidade de mineralização de N e de fixação de P são importantes indicadores de produtividade.

4. Sais solúveis e condutividade elétrica: alta concentração de sais na zona das raízes é uma limitação severa em muitos solos de regiões semi-áridas e áridas. O conhecimento do estado de salinidade e alcalinidade destes solos é extremamente relevante na avaliação de sua produtividade. A condutividade elétrica da pasta saturada é uma boa medida da concentração total de sais (Rhoades, 1982). É também importante a natureza dos sais (p. ex.: Na vs. Ca e Mg), em especial no que diz respeito à estrutura do solo. A relação de adsorção de sódio (RAS) é um bom indicador do potencial do solo e da alcalinidade efetiva. Existe a necessidade de se determinar os limites críticos para a condutividade elétrica e concentração de sais, limites esses, empíricos e específicos de cada cultura (Gupta & Abrol, 1990). O crescimento e a predominância de espécies de plantas halomórficas podem também ser usados como indicadores do estado da salinidade e alcalinidade.

C. Avaliação da fauna do solo

A fauna do solo desempenha um importante papel na estrutura do solo, na reciclagem de nutrientes e na dinâmica da matéria orgânica (Jenny, 1941; Lee & Wood, 1971; Lal, 1987; Lavelle et al., 1992). A atividade e população de macrofauna deve, preferencialmente, ser determinada por métodos de peneiramento não destrutivo. O uso de produtos químicos para expelir estes organismos, embora rápido, é um método destrutivo e pouco acurado.

D. Avaliação da erosão do solo

Os dados reportados na literatura são obtidos por uma gama de técnicas não padronizadas e, portanto, a precisão e a confiabilidade dos dados são as principais limitações para avaliar a magnitude dos problemas de erosão (Lal, 1994). Técnicas apropriadas de medida da magnitude e da velocidade da erosão hídrica e eólica são descritas por Lal (1994). Alguns métodos de avaliação em diferentes escalas espaciais constam da Tabela 22. A obtenção de dados confiáveis exige a calibração dos equipamentos a campo, e a avaliação cuidadosa após cada chuva. A concentração de sedimentos nas águas de rios e riachos pode ser determinada por técnicas de sensoriamento remoto, mas estas não podem ser aplicadas para medidas de sedimentos de fundo.

A erosão do solo pode ser avaliada por diversos modelos paramétricos e conceituais (Tabela 23). Os modelos de erosão eólica mais usados incluem a Equação de Erosão Eólica (WEQ), a Equação Revisada da Erosão Eólica (RWEQ) e o Sistema de Previsão da Erosão Eólica (WEPS) ou o Modelo de Pesquisa da Erosão Eólica (WERM). As vantagens e desvantagens dos modelos são descritas por Skidmore (1994) e Skidmore et al. (1994). A equação WEQ, embora largamente usada, é empírica e tem aplicações limitadas. Os aspectos dinâmicos da erosão eólica são avaliados pelos modelos WEPS e WERM, baseados em processos. A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE), usada na predição da erosão hídrica, é também um modelo empírico,

desenvolvido para solos e ambientes agroecológicos do oeste dos Estados Unidos e tem aplicação limitada. O modelo original foi revisado (Renard et al., 1994) e modificado para contornar certos problemas. O enfoque conceitual do Projeto de Previsão da Erosão Hídrica (WEPP) torna-o um modelo baseado em processos e mais aplicável para diversas situações.

Tabela 22. Técnicas para avaliar a erosão em diferentes escalas espaciais

Escala	Tamanho	Técnica
Parcelas pequenas	1-2 m ²	Simulação de chuva
Micro parcela	1-10 m ²	Parcela padrão para estudo de enxurrada; técnica de pinos enterrados
Campo	10-100 m ²	Parcela de campo para estudo de enxurrada; pigmento fluorescente; pinos enterrados, sistema multidivisor
Declive (encosta)	0,01-0,5 ha	Calhas, registro de armazenamento de água, amostradores de enxurrada
Bacia hidrográfica	0,5-5 ha	Calhas, registro de armazenamento de água, amostradores de enxurrada
Grandes bacias hidrográficas e fluviais	> 100 ha	Diques, amostragem de sedimentos, sensoriamento remoto

Tabela 23. Modelos preditivos para avaliação de erosão do solo

Processo de erosão	Modelo	Referência
Erosão eólica		
Média anual estimada de erosão do solo	Equação de erosão eólica	Woodruff & Siddoway, 1965
Modelo orientado a processo	(i) sistema de predição da erosão eólica (WEPS)	Skidmore, 1994
	(ii) modelo de pesquisa de erosão eólica	Skidmore et al., 1994
Erosão hídrica		
Modelos paramétricos	(i) Equação Universal de Perdas de Solo (USLE)	Wischmeier & Smith, 1978
Perdas	(ii) Equação Universal de Perdas de Solo Revista (RUSLE) (iii) Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE)	Foster, 1982; Renard et al. 1994; Williams, 1975
Modelos conceituais	(i) Projeto de Predição de Erosão Hídrica (WEPP)	Nearing et al., 1994
	(ii) Modelo Grifith	Rose, 1994
Manejo de bacia hidrográfica	i) ANSWERS	Beasley et al., 1980
Modelos paramétricos de erosão		
Modelos conceituais	Produtividade	
	(i) Índice de Produtividade (PI)	Pierce et al., 1983)
	(ii) Theprom	Biot (1990)
Modelos conceituais	Cálculo do Impacto da Erosão na Produtividade (EPIC)	Williams et al., 1983; 1984
	CREAMS	
Modelo produtividade/ ambiente		Knisel et al. (1981)

Diversas técnicas estão descritas para avaliação do impacto da erosão (Lal, 1987; Pierce & Lal, 1994); técnicas de campo são baseadas em medidas experimentais do desenvolvimento das culturas em parcelas erodidas, das quais se conhece a quantidade exata de solo perdido. Variações dos níveis de erosão podem ser simuladas pela remoção artificial de solo, seguida da avaliação de seu efeito sobre o desenvolvimento e produção das culturas; todavia, técnicas baseadas em erosão simulada freqüentemente produzem resultados imprecisos e artificiais. Há também vários modelos disponíveis para avaliar o impacto da erosão na produtividade (Pierce & Lal, 1994), como por exemplo o Índice de Produtividade (PI), desenvolvido por Pierce et al., 1983: trata-se de um modelo paramétrico, baseado em informações quantitativas das características do perfil do solo a pelo menos um metro de profundidade; as características incluem, entre outras, pH, profundidade de enraizamento, carbono orgânico e volume de água disponível. Entretanto, a aplicação desta técnica relativa e paramétrica pode ser questionável para muitos solos dos trópicos. Diversos modelos dirigidos a processos (EPIC e CREAMS) exigem uma enorme série de dados básicos sobre o solo, clima e parâmetros de desenvolvimento das culturas. O uso de modelos de simulação é viável apenas se os parâmetros adequados são conhecidos. Não se pode pretender que os modelos substituam dados experimentais obtidos a partir de experimentos de campo bem concebidos.

A caracterização inicial das condições antecedentes das áreas experimentais é crucial para avaliar objetivamente as mudanças induzidas por manejo nos indicadores de solo. É importante registrar a história do uso da terra, e efetuar um levantamento topográfico em curvas de nível de 0,5 ou 1 m; mapas detalhados devem ser preparados em escala 1:1500 ou 1:2500. Uma amostragem em grade de 25 m x 25 m deve ser estabelecida para avaliar propriedades (o tamanho da grade pode ser menor para áreas altamente variáveis). Um transecto pode ser usado para terrenos ondulados ou íngremes. A amostragem do solo também pode ser feita com base em unidades de mapeamento. Porém, uma unidade de mapeamento pode conter várias séries de solo, com alta variabilidade espacial em suas propriedades (Cassel & Fryrear, 1990).

A variabilidade pode ser natural ou induzida por manejo (Cassel, 1983). Wilding (1988) listou a variabilidade de diversas propriedades de solo dentro de uma unidade de mapeamento (Tabela 24). Considerando a magnitude da variabilidade, ele agrupou as propriedades em 3 categorias: a) com variações mínimas, que apresentam coeficiente de variação (CV) menor que 15%; b) com variabilidade moderada, CV compreendido entre 16 e 35% e c) com alta variabilidade, CV entre 36 e 70%. A avaliação de mudanças temporais nas propriedades do solo é preferencialmente feita ao nível de *pedon*. O objetivo é amostrar exatamente a mesma área ao longo do tempo, de forma que as mudanças induzidas por manejo nas propriedades ou nos indicadores de sustentabilidade, possam ser quantificadas e as tendências, estabelecidas.

A frequência de monitoramento indicada na Tabela 25 depende da natureza dos indicadores (a velocidade de alteração de vários deles foi relatada por Arnold et al., 1990). A maioria dos indicadores físicos varia em tempo inferior a um mês. A retenção e transmissão de água e as reservas de nutrientes mudam no espaço de um mês a um ano; alguns indicadores físicos (p. ex., temperatura e umidade do solo) podem passar por mudanças diárias, enquanto outros (p. ex., densidade e porosidade) sofrem mudanças sazonais. Por outro lado, as mudanças na estrutura do solo são relativamente lentas, mensuráveis em períodos de um a dois anos. As mudanças na textura do solo são extremamente lentas, usualmente causadas por erosão acelerada da superfície, e são difíceis de observar em períodos menores que três a cinco anos. A menos que a erosão acelerada seja o processo degradativo predominante, as mudanças no teor de matéria orgânica são relativamente lentas e a frequência de monitoramento pode ser de um a dois anos. O carbono da biomassa pode apresentar variação sazonal, assim como a população de minhocas.

Tabela 24. Variabilidade de propriedades do solo dentro de unidades de mapeamento (Wilding, 1988)

Propriedade	Coeficiente de variação (%)	
	Média	Faixa
Densidade	7	5-13
pH	10	5-15
Espessura do horizonte A (cm)	10	8-13
Retenção de água (33 kPa)	18	10-31
Teor total de areia (%)	25	8-46
Teor total de argila (%)	25	10-31
Teor de matéria orgânica	39	20-61
Espessura do solo (cm)	43	25-58

Tabela 25. Frequência sugerida para o monitoramento de indicadores de solo

Indicador	Frequência
Físico	
Umidade	Semanal
Densidade aparente e resistência à penetração	Sazonal
Condutividade hidráulica	Anual
Estrutura; infiltração	um a dois anos
Textura, capacidade de água disponível	três a cinco anos
Químico	
pH	Sazonal
Nitrogênio total; nutrientes disponíveis; CTC	um a dois anos
Biológico	
Atividade de minhocas	Sazonal
Carbono da biomassa e carbono orgânico	um a dois anos
Cultural	
Produtividade; crescimento das raízes	Sazonal
Estado nutricional	um a dois anos
Microclima	
Temperatura do solo	Diária ou sazonal
Temperatura do ar; evaporação	Diária
Quantidade de chuvas	Sazonal
Intensidade de chuvas	No máximo a cada cinco - dez minutos

13. Base conceitual para a definição de níveis críticos de indicadores

Uma vez estabelecido um conjunto mínimo de dados padronizados (base de dados), é importante interpretar as informações em termos do potencial e das limitações dos recursos, e avaliar o uso apropriado da terra e o sistema de manejo do solo e das culturas. O desenvolvimento e a melhoria da base de dados são processos contínuos. A base de dados deve ser interpretada em termos da intenção do uso da terra, o que inclui produção, regulação ambiental, qualidade da água etc. A avaliação das limitações e dos potenciais dos recursos para os diferentes usos é baseada no conhecimento do nível crítico dos indicadores de solo e água, definido como o nível além do qual a produção declina rapidamente. O esquema apresentado na Figura 5 identifica três categorias de níveis críticos, em que o índice C denota uma condição de solo na qual a produção ou outra função econômica começa a declinar, mesmo com a adoção dos sistemas de manejo recomendados. Entretanto, a produção pode ser mantida com adoção e implementação de melhores práticas, e essas podem transformar drasticamente a capacidade de produção. Se técnicas convenientes de manejo não forem adotadas no nível crítico C1, a degradação do solo tende a continuar até o nível C2, no qual a produção atinge o nível subeconômico. Contudo, a adoção de novas técnicas ou mudanças no uso da terra pode aumentar a produção e até mesmo reverter a tendência de degradação. Se o uso tradicional da terra persistir, e a degradação do solo continuar, a qualidade atinge o nível crítico C3, uma situação irreversível, em que a capacidade de produção e a qualidade do solo não podem ser aumentadas sequer com a adoção de sistemas de manejo melhorados e insumos adicionais. No entanto, outros usos da terra podem produzir bens e serviços, mesmo neste nível: árvores e arbustos desenvolvem-se bem até mesmo em solos severamente

erodidos e rasos. São necessárias técnicas especiais de manejo, como aração profunda, suplementação de matéria orgânica e adubação, para o estabelecimento das plantas novas, bem como o uso de irrigação suplementar pelo menos durante a fase inicial de desenvolvimento das plantas. Os níveis críticos de indicadores do solo devem ser definidos em termos de retornos quantificáveis de bens e serviços, tais como a produção e a capacidade de regulação ambiental. Até o momento, entretanto, esses níveis não são conhecidos para a maioria dos solos e ecorregiões dos trópicos e nem mesmo para os países tecnologicamente avançados da América do Norte e Europa Ocidental. Embora algum progresso tenha sido feito na obtenção de estimativas iniciais da extensão regional e global da degradação do solo por diferentes processos (Oldeman, 1992; WRI, 1993), essas são, na melhor das hipóteses, conjecturas qualitativas.

Os níveis críticos devem ser definidos em termos de perdas na produção, ou outras funções econômicas e ambientais do solo. Um exemplo de matriz para avaliar a severidade da degradação é apresentada na Tabela 26. Embora o nível sugerido de perda de produtividade possa diferir entre os diversos solos, ecorregiões e sistemas de uso da terra, a magnitude da perda deve ser padronizada e quantificada. Um exemplo de sistema qualitativo e subjetivo de avaliação da degradação do solo é a matriz mostrada na Tabela 27. A avaliação quantitativa da erosão é freqüentemente baseada em modelos empíricos (ex. USLE e WEQ), e raramente baseada em medidas da taxa de erosão a campo. Similarmente, a extensão e tipos de erosão são usualmente estimados por levantamentos em grande escala, 1:1 000 000 ou 1: 5 000 000, se não maiores. Tais estimativas, embora úteis em despertar a atenção do público para os riscos, potenciais ou percebidos, têm pouca utilidade no planejamento do uso da terra e na definição de opções políticas para a sua restauração. Elas podem também estar incorretas, e conduzir a conclusões errôneas e custosas, e a erros ambientalmente desastrosos. Informações de má qualidade não são substitutas para nenhuma informação.

Tabela 26. Exemplo de matriz de avaliação qualitativa e subjetiva de degradação do solo, desconsiderando a produtividade e as funções ambientais

Classe de degradação	Magnitude da Erosão do solo	
	(ton/ha/ano)	Extensão da área (%)
Nenhuma	0-5	0-5
Leve	5-10	5-10
Moderada	10-20	10-20
Severa	20-100	20-30
Extremamente severa	>100	30-40

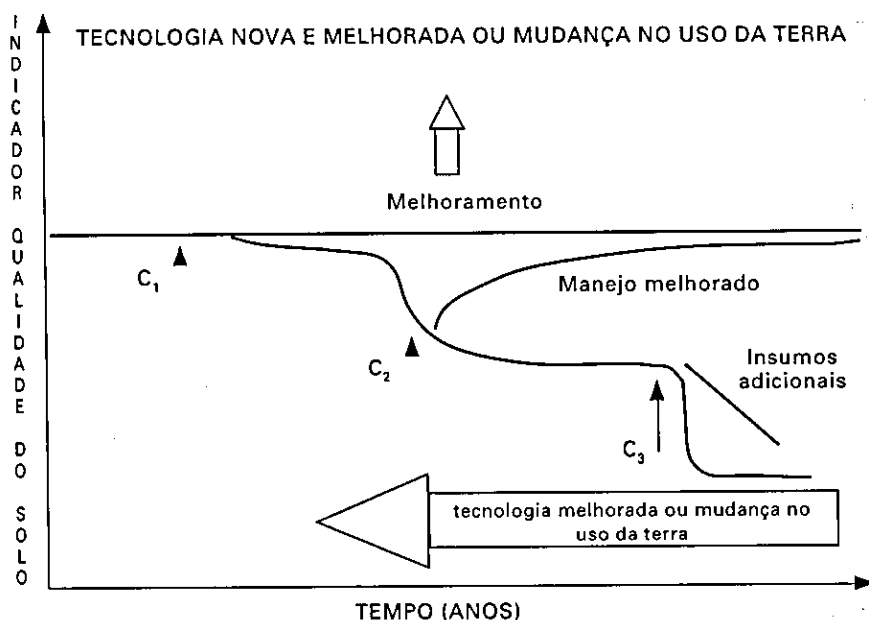


Figura 5. Diferentes tipos de níveis críticos relativos ao uso da terra e sistemas de manejo

Tabela 27. Limites críticos de indicadores de resistência e estrutura do solo

Limitação	Fator de ponderação	Profundidade efetiva de raízes (cm)	Resistência à penetração (mPa)	Densidade aparente(g/cm ³)		Tipo	Estrutura	
				Textura leve	Textura pesada		Agregados estáveis em água (%) (> 1mm)	Diâmetro médio geométrico (mm)
Nenhuma	1	> 150	< 1,0	< 1,3	< 1,2	Forte, em blocos sub-angulares Maciça e grumosa	> 75	> 2,5
Leve	2	100 - 150	1,0 - 1,5	1,3 - 1,4	1,2 - 1,3	Bloco sub-angulares	50 - 75	2 - 2,5
Moderada	3	50 - 100	1,5 - 2,0	1,4 - 1,5	1,3 - 1,6	Moderada, em blocos sub-angulares, maciça	25 - 50	1,0 - 2,0
Severa	4	25 - 50	2,0 - 2,5	1,5 - 1,6	1,4 - 1,5	Fraca, em blocos sub-angulares, maciça	5 - 25	0,5 - 1,0
Extrema	5	< 25	> 2,5	> 1,6	> 1,5	Massiva, grãos simples	< 5	< 0,5

14.

Níveis críticos sugeridos para indicadores chave

Embora seja difícil generalizar os níveis críticos dos indicadores, os quais devem ser estabelecidos a partir das situações específicas de cada localidade, alguns protocolos arbitrários e seus fatores de ponderação para características físicas e hídricas do solo são mostrados nas tabelas 28 a 30.

Tabela 28. Limites críticos para propriedades mecânicas do solo

Limitação	Fator de ponderação	Consistência	Textura	Fragmentos grosseiros na superfície (%)	Resistência à penetração (mPa)
Nenhuma	1	Solta	Franca	< 10	< 1,0
Leve	2	Muito friável	Franco-siltosa, franca, franco-argilo-siltosa	10 - 20	1,0 - 1,5
Moderada	3	Friável	Franco-argilosa, franco-arenosa	20 - 40	1,5 - 2,0
Severa	4	Dura	Argilo-siltosa, argilo-arenosa	40 - 60	2,0 - 2,5
Extrema	5	Extremamente dura	Argila, areia	> 60	> 2,5

Tabela 29. Limites críticos para porosidade e capacidade de água disponível

Limitação	Fator de ponderação	Permeabilidade	Porosidade drenável a 0,006 mPa (%)	Porosidade de retenção de umidade (%)	Porosidade residual (mPa)	Capacidade de água disponível (cm)
Nenhuma	1	Rápida	> 20	> 20	< 15	> 30
Leve	2	Moderadamente rápida	18 - 20	18 - 20	15 - 18	20 - 30
Moderada	3	Moderada	15 - 18	15 - 18	18 - 20	8 - 20
Severa	4	Lenta	10 - 15	10 - 15	20 - 25	2 - 8
Extrema	5	Muito rápida ou Muito lenta	< 10	< 10	> 25	< 2

Tabela 30. Limites críticos para propriedades de transmissão de água

Limitação	Fator de ponderação	Permeabilidade	Taxa de infiltração (cm/h)	Condutividade hidráulica saturada (cm/h)
Nenhuma	1	Rápida	> 5	> 2
Leve	2	Moderada a Rápida	2 - 5	0,2 - 2
Moderada	3	Moderada	1 - 2	0,02 - 0,2
Severa	4	Lenta	1 - 0,5	0,002 - 0,02
Extrema	5	Muito lenta ou excessivamente rápida	< 0,05	> 0,002

Tabela 31. Limites críticos de indicadores químicos do solo

Limitação	Fator de ponderação	PH (1:1 em água)	RAS*	Condutividade Elétrica (ds/m)
Nenhuma	1	6,0 - 7,0	< 10	< 3
Leve	2	5,8 - 6,0 e 7,0 a 7,4	10 - 12	3 - 5
Moderada	3	5,4 - 5,8 e 7,4 - 7,8	12 - 15	3 - 5
Severa	4	5,0 - 5,4 e 7,8 - 8,2	15 - 20	7 - 10
Extrema	5	< 5,0 e > 8,2	> 20	> 10

*RAS = Taxa de adsorção de sódio.

Tabela 32. Limites críticos de Al e Mn em solos ácidos tropicais

Limitação	Fator de ponderação	(% da CTC)	
		Al	Mn
Nenhuma	1	< 20	< 5
Leve	2	20 - 35	5 - 10
Moderada	3	35 - 40	10 - 15
Severa	4	40 - 50	15 - 20
Extrema	5	> 50	> 20

O estabelecimento de valores de ponderação para alguns atributos é difícil, como por exemplo, o conteúdo de argila: teores extremos de argila ou areia podem trazer efeitos adversos à produtividade. Os níveis críticos para textura devem, preferencialmente, ser estabelecidos em associação com outros atributos, como volume de água disponível e velocidade de infiltração. Os níveis de nutrientes nas plantas são difíceis de generalizar e dependem das espécies e da expectativa de rendimento. A tabela 31 mostra os níveis críticos de alguns indicadores químicos de solo.

Concentrações tóxicas de Al, Mn e outros nutrientes também variam entre solos (dependendo da mineralogia das argilas, da CTC e do teor de matéria orgânica) e espécies cultivadas. Algumas espécies tolerantes podem resistir mais que outras a altas concentrações de Al, Mn e à acidez. Isto depende também do teor de Ca, pois em muitos solos, as culturas têm maior resposta à deficiência em Ca que aos excessos de Al e Mn. A tabela 32 mostra os limites críticos de Al e Mn em solos tropicais. É difícil estabelecer níveis críticos para o teor de carbono orgânico do solo. Em geral, seu teor em solos minerais é considerado suficiente se situado entre 5 a 10%, podendo representar uma limitação severa se sua concentração estiver abaixo de 0,5 %. Nesse caso, a estrutura do solo se degrada rapidamente, e a capacidade de retenção de água e nutrientes tende a níveis sub-ótimos. Mais que o teor de carbono orgânico, é o carbono da biomassa ou a fração ativa do carbono orgânico que desempenha um papel importante na regulação das propriedades do solo e processos correlatos. Níveis críticos de carbono da biomassa são mostrados na Tabela 33.

Tabela 33. Níveis críticos do conteúdo do carbono orgânico do solo

Limitação	Fator de Ponderação	Carbono orgânico na camada arável (%)	Carbono da biomassa (% do total)
Nenhuma	1	5 - 10	> 25
Leve	2	3 - 5	20 - 25
Moderada	3	1 - 3	10 - 20
Severa	4	0,5 - 1	5 - 10
Extrema	5	< 0,5	< 5

15. Análise e interpretação dos dados

Diversas abordagens têm sido utilizadas para avaliar a qualidade do solo (Fao, 1983; Vandiepen et al, 1991; Reynold, 1986; Haberlen, 1986). Algumas opções para análise dos dados e sua síntese em um índice operacional estão listadas na Figura 6. Um procedimento para integrar os indicadores físicos, químicos e biológicos em um índice relacionado a componentes de produtividade, meio ambiente e saúde foi proposto em recente conferência sobre qualidade do solo organizada pelo Rodale Institute (Am. J. Alternative Agric. vol. 7, 1992). Outro método para ponderar a qualidade do solo para manejo de culturas foi desenvolvido no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1992), tendo como enfoque, desenvolver um modelo que combinasse o efeito de três variáveis relacionadas à qualidade do solo. O modelo proposto em relação ao manejo da matéria orgânica é mostrado na Equação 11:

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

onde SQR é uma ponderação da qualidade do solo, OM é a quantidade de matéria orgânica que deve ser devolvida ao solo para manter ou aumentar o seu conteúdo e TP é o fator relacionado às operações de campo que favorecem a aeração do solo e a decomposição dos resíduos, tais como preparo do solo, semeadura, e aplicação de fertilizantes. A variável ER é um fator que relaciona o declínio na produtividade à erosão de solo, como predito pelo modelo USLE ou WEQ. O índice SQR monitora a magnitude e a tendência de mudanças na qualidade do solo.

Smith et al. (1993) propuseram outro modelo de análise denominado Indicador Krigagem de Múltiplas Variáveis, o qual integra um conjunto de variáveis contínuas em um índice único, que pode ser

usado para fazer o mapeamento da qualidade do solo em unidades de paisagem. O modelo requer uma avaliação independente de valores limites atribuídos a cada indicador, para diferentes culturas. Os valores são transformados para um sistema binário, atribuindo-se notas zero ou um para cada dado em questão, conforme preencha (1) ou não (0) o valor estabelecido. O conjunto de dados obtidos é usado para traçar um variograma que permite estimar valores em localidades não amostradas, e dessa forma desenvolver mapas de qualidade do solo. A técnica pode ser aplicada em fazendas, bacias hidrográficas ou regiões maiores. Larson & Pierce, (1991), propuseram outra técnica chamada Funções Pedotransfer (PTF). São funções matemáticas que relacionam entre si indicadores e propriedades de solo, para serem usados nas avaliações de qualidade (Bouma, 1989). Larson & Pierce (1991) conduziram um levantamento na literatura para examinar diversas dessas funções (Tabela 34), as quais são, em sua maioria, de natureza estatística ou empírica e, portanto, podem ser usadas apenas para o mesmo tipo de solo ou região.

A combinação dos dados em um índice ponderado cumulativo foi uma abordagem analítica seguida por Mansfield (1979), Muchena (1979) e Lal (1985). Fatores ponderados para dez indicadores relevantes podem ser combinados em um índice cumulativo. Uma vez que os indicadores relevantes para um solo ou determinado uso da terra tenham sido escolhidos, são feitas análises em laboratório ou em campo para determinar o fator de ponderação adequado e obter um índice de avaliação cumulativo (tabela 35), sendo 50 o valor máximo do índice cumulativo para dez fatores. O próximo passo é estabelecer a relação existente entre a sustentabilidade e esse índice. Um esquema de classificação é mostrado na Tabela 36. É provável, ao contrário desse esquema, que a relação entre o índice ponderado cumulativo de avaliação e a sustentabilidade computada a partir de dados experimentais não seja linear. Entre as diversas relações possíveis, cinco são mostradas na Figura 7. O esquema de classificação da Tabela 36 pode

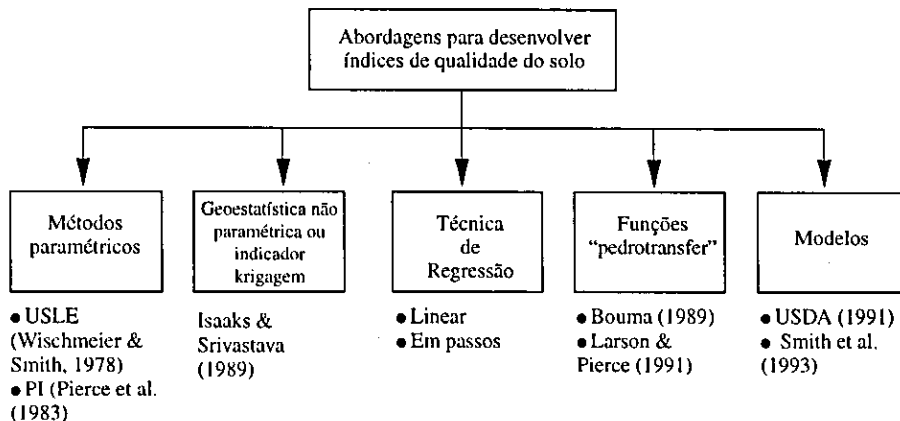


Figura 6. Opções para síntese e análise de dados em um índice operacional.

ser melhor ajustado a partir dos dados empíricos apresentados na Figura 7. Essas relações empíricas podem também diferir entre tipos de solo, regiões e usos da terra. A curva A retrata um declínio gradual na sustentabilidade até o índice cumulativo atingir o valor 30. A curva B não mostra mudanças até o índice cumulativo de 25, além do qual ocorre um acentuado declínio na sustentabilidade. A curva C é um cenário atípico, no qual a sustentabilidade declina linearmente com o aumento do índice cumulativo. A curva D exibe uma função composta, com declínio linear da sustentabilidade até o índice ponderado igual a 25, seguido por um rápido declínio entre 25 e 30. A curva E é um exemplo de declínio logarítmico na sustentabilidade. O esquema indica que os sistemas sustentáveis têm índice cumulativo ponderado inferior a 30.

Tabela 34. Exemplos de funções "Pedotransfer" (PTF) (Larson & Pierce, 1991)

PTF	Relações
Químicos	
Capacidade de adsorção de fosfato (PSC)	$PSC = 0,4 (Al_{ox} + Fe_{ox})$
Capacidade de troca de cátions (CTC)	$CTC = a OC + bC$
Alteração na matéria orgânica	$DC = a + bOR$
Físicos	
Densidade aparente	$D_g = b_0 + b_1 OC + b_2 S_i + b_3 M$
Densidade aparente	Modelo randômico, utilizando distribuição do tamanho de partículas
Densidade aparente	$D_g = f(OC, \text{argila})$
Retenção de água	$q_{10} = b_0 + b_1 C + b_2 S_y$
Retenção de água	$q = b_1 (\%Sa) + b_2 (\%Si) + b_3 (\%Cl) + b_4 (\%OC)$
Rugosidade do terreno devido à aração	$RR = f(\text{morfologia do solo})$
Aumento de porosidade	$P = f(MR, IP, \text{argila}, Si, OC)$
Hidráulicos	
Condutividade hidráulica	$K^s = f(\text{textura})$
Condutividade da crosta	$SC = f(\text{textura})$
Condutividade hidráulica saturada	$D_s = f(\text{morfologia do solo})$
Produtividade	
Produtividade do solo	$PI = f(D_g, AWHC, pH, EC, ARE)$
Profundidade de enraizamento	$RD = f(D_g, WHC, pH)$

DB = Densidade aparente; S_i = percentagem de silte; M = fração mediana de areia; OC = Carbono orgânico; Cl = Argila; $S_y = 1/DB$; PSC = Capacidade de adsorção de fosfato; Al_{ox} = alumínio extraível com oxalato; Fe_{ox} = Ferro extraível com oxalato; OM = Matéria Orgânica; Sa = Areia; M_i = Taxa de umidade; IP = Porosidade inicial; ARE = Aeração; EC = Condutividade elétrica.

Tabela 35. Modelo de somatória de fatores de ponderação para dez indicadores relevantes de solo

Indicador	Fator de ponderação	Limitação
Profundidade das raízes	3	Moderada
Acidez	5	Extremamente baixa
Toxicidade de Al	4	Severa
Capacidade de água disponível	2	Pequena
Textura	1	Nenhuma
Densidade	2	Baixa
Nutrientes	5	Extremamente baixa
Carbono orgânico	3	Moderada
Porcentagem de agregação	1	Nenhuma
Erosão	3	Moderada
Índice cumulativo ponderado	29	

Tabela 36. Sustentabilidade de uso da terra em relação ao índice cumulativo ponderado, baseado em dez indicadores de solo

Sustentabilidade	Índice cumulativo ponderado
Altente sustentável	< 20
Sustentável	20 - 25
Sustentável com alta taxa de insumos	25 - 30
Sustentável com outro uso da terra	30 - 40
Não sustentável	> 40

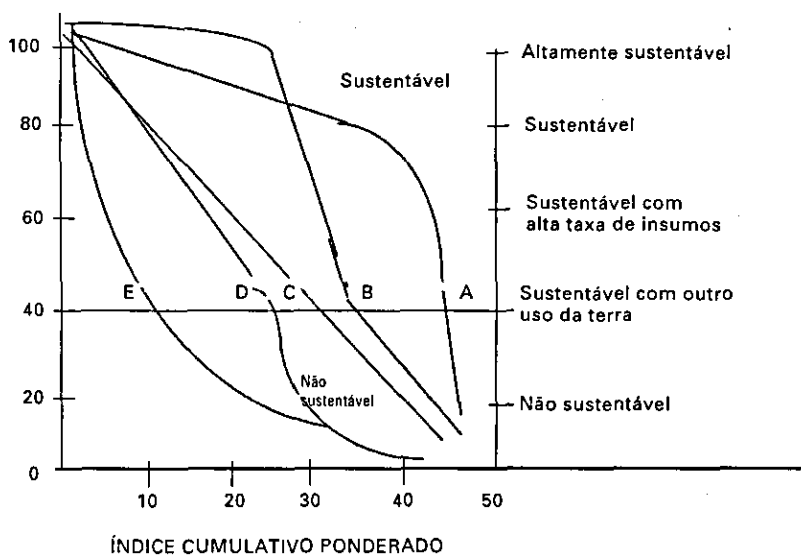


Figura 7. Esquema das possíveis relações entre o índice cumulativo de avaliação e os índices de sustentabilidade.

A lista de checagem consiste na avaliação detalhada de todos os fatores físicos e socioeconômicos da área em estudo, seja no âmbito de fazenda, paisagem ou bacia hidrográfica, devendo incluir parâmetros antrópicos e variáveis institucionais. Uma vez completado o levantamento, a avaliação da sustentabilidade do solo e da água requer que seja seguida uma seqüência de passos, discriminados a seguir, e esquematizados na Figura 8:

I. Estabelecer um programa e definir objetivos, a partir da identificação dos fatores que limitam o alcance das metas concebidas, o que implica no levantamento detalhado dos recursos solo e água. A escolha da escala (temporal, sistêmica ou espacial) é feita nesta fase.

II. Conduzir uma análise objetiva das limitações e identificar os processos de degradação, potenciais ou em curso, e as propriedades que podem ser alteradas por tais processos. Os principais a serem considerados são a erosão, compactação e endurecimento, degradação química, declínio da fertilidade, acidificação, salinização e degradação biológica. Os indicadores de solo afetados por estes processos estão listados na Tabela 37.

III. Reavaliar os indicadores afetados pelos processos modificadores do solo frente ao uso da terra e aos sistemas de manejo.

IV. Avaliar perdas reais e potenciais na produtividade devido a mudanças na qualidade dos indicadores de solo, o que é feito com base no conhecimento dos limites críticos e da sua relação funcional com a produtividade, esta obtida a partir de experimentos específicos ou levantamento bibliográfico.

Tabela 37. Alguns indicadores de sustentabilidade influenciados por processos degradativos do solo

Processos	Indicadores de solos afetados
Erosão acelerada	Carbono orgânico do solo, profundidade do solo, capacidade de água disponível, textura, capacidade de nutrientes.
Compactação	Densidade aparente, porosidade e distribuição do tamanho de poros, resistência do solo, taxa de infiltração, condutividade hidráulica.
Degradação química	Depleção dos nutrientes, redução da CTC.
Acidificação	Diminuição do pH, diminuição da saturação de bases, aumento na acidez total e na concentração de Al.
Salinização	Aumento da condutividade elétrica e sais solúveis totais, alteração da cor do solo.
Alcalinização	Aumento da RAS, alteração da cor do solo devido a solubilização de carbono, diminuição da infiltração.
Degradação biológica	Redução no conteúdo de matéria orgânica, diminuição da biodiversidade do solo (por exemplo, população de minhocas), declínio do C da biomassa.

V. Se o efeito das alterações nos indicadores de solo sobre a produtividade e a qualidade do ambiente for drástico, mudanças no uso e manejo do solo serão necessárias. Então, os passos de I a IV devem ser repetidos para reavaliar os objetivos, analisar as limitações, etc.

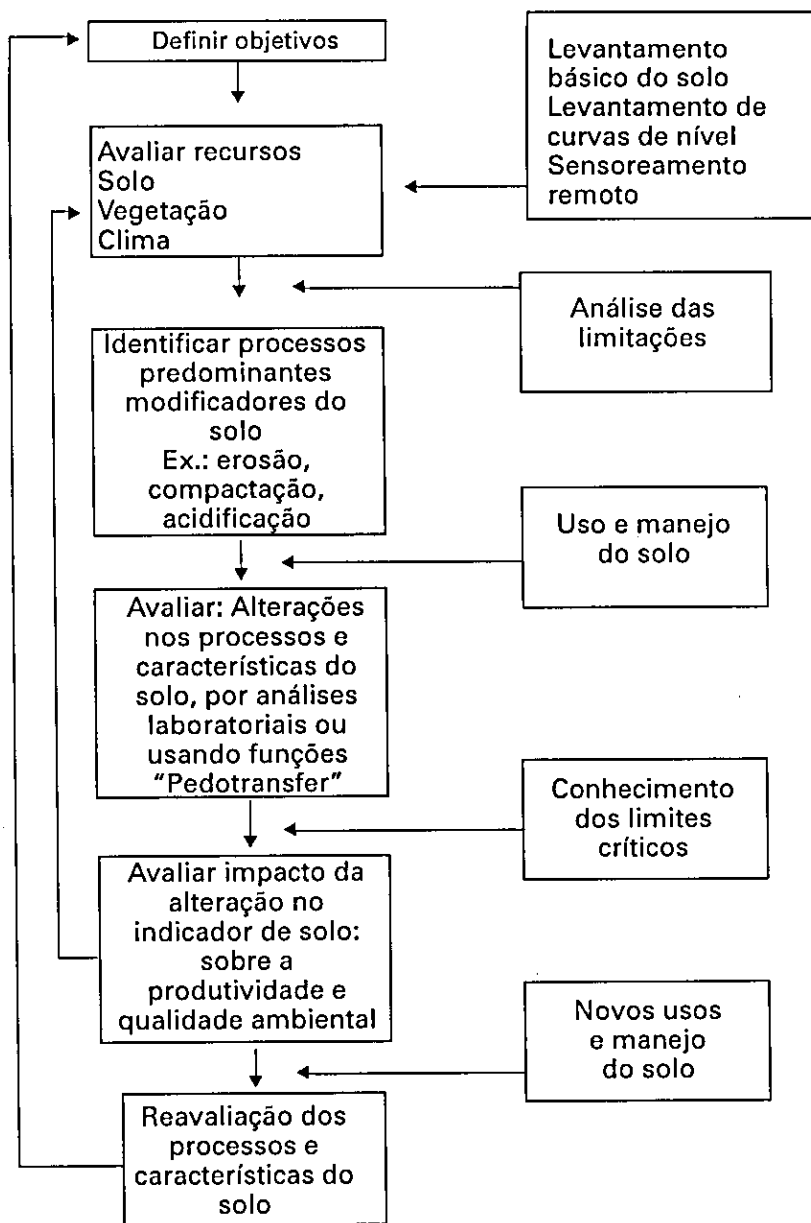


Figura 8. Seqüência de passos na avaliação de sustentabilidade dos recursos de solo e água.

VI. A partir do novo uso da terra, reavaliar os processos degradativos predominantes e os indicadores modificados por eles. Esta fase requer uma nova avaliação do potencial e das limitações dos recursos solo e água.

17. Prioridades de pesquisa e desenvolvimento

Embora a necessidade de se desenvolver sistemas sustentáveis de manejo do solo e da água nunca tenha sido tão premente, pouco se conhece sobre as relações quantitativas entre indicadores de solo e produtividade. As bases de dados para melhorar o entendimento acerca da magnitude da degradação do solo e as correspondentes relações de causa e efeito são limitadas, especialmente no que se refere a indicadores físicos e hidrológicos do solo. Conseqüentemente, existem diversos assuntos prioritários para a pesquisa:

1. Procedimentos analíticos: métodos simples e confiáveis são necessários para quantificar indicadores físicos e hidrológicos, principalmente para solos tropicais. As técnicas analíticas devem ser desenvolvidas para uso a campo, baseadas em instrumental mecânico, de preferência ao eletrônico.

2. Processos e propriedades limitantes: informações sobre propriedades e processos que limitam a produtividade são fundamentais para identificar o uso apropriado do solo.

3. Processos interativos: processos degradativos e restauradores são freqüentemente inter-relacionados, por exemplo: o declínio na estrutura do solo pode causar compactação, o aumento na compactação acelera a enxurrada, maior enxurrada acentua a erosão e agrava a seca. É particularmente importante determinar as relações entre os diversos processos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como as interações entre as propriedades físicas, químicas e biológicas que regulam tais processos.

4. Limites críticos: pouco se conhece sobre os limites críticos dos indicadores do solo em relação à produtividade e às funções reguladoras ambientais. Sabe-se que eles variam entre tipos

de solo, usos da terra, culturas, e tipos de manejo, podendo variar, ainda, conforme os objetivos, e necessitam ser identificados com respeito aos itens: i) escolha do uso da terra; ii) decisão sobre os insumos necessários para manter um nível esperado de produtividade; iii) evitar ou minimizar riscos de degradação; iv) reverter tendências de degradação. Por exemplo, é importante determinar: a quantidade e qualidade da matéria orgânica necessária para manter a estrutura do solo; a capacidade de água disponível para minimizar riscos de estiagem; níveis tóxicos de Al ou Mn em relação ao crescimento das raízes; nível tolerável de perda de solo; nível limite de temperatura do solo para germinação das sementes e estabelecimento de sementei-ras; taxa de difusão de oxigênio para aeração adequada; densidade e resistência do solo que limitam o desenvolvimento das raízes de diferentes culturas, diâmetro peso médio e coesão dos agregados, para minimizar desagregação e formação de crosta; resistência da crosta que limita a emergência das plantas; biodiversidade e atividade das minhocas, que regulam a macroporosidade e a mineralização dos resíduos orgânicos. O entendimento dos limites críticos é também essencial na escolha da estratégia apropriada para a recuperação de solo.

5. Resiliência do solo: a quantificação da resiliência do solo é importante para avaliar o uso sustentável dos recursos do solo e da água. Solos resilientes podem resistir melhor ao uso intensivo ou inadequado que solos não resilientes. Processos e propriedades que governam a resiliência devem ser identificados e seus limites críticos estabelecidos.

6. Coeficiente de sustentabilidade: é importante quantificar a sustentabilidade com respeito às propriedades mais limitantes dos solos, por exemplo, lençol freático sem recarga e solo com horizonte A raso. Embora os princípios básicos possam ser conhecidos, coeficientes de sustentabilidade e processos e propriedades limitantes diferem entre solos e regiões agroecológicas. O desen-

volvimento, validação e adaptação desses coeficientes são importantes para transformar conceitos vagos e qualitativos de sustentabilidade em variáveis quantitativas mensuráveis.

7. Indicadores de qualidade do solo: similarmente aos coeficientes de sustentabilidade, é necessário desenvolver indicadores de qualidade do solo, bem como seus limites críticos. MacDonald et al. (1993) consideram dois tipos de qualidade de solo: **a) qualidade inerente**, relacionada à capacidade de realizar funções críticas que não mudam com o tempo, por exemplo, a composição elementar total; **b) qualidade dinâmica** ou instável, relacionada às funções que dependem do tempo (e do manejo) do solo, por exemplo, os fatores biológicos.

8. Conjunto mínimo de dados: varia conforme os objetivos, características do solo, uso da terra, sistemas de manejo e a escala de avaliação. Com referência a escala espacial, a série mínima depende da extensão da área avaliada, por exemplo, bacias hidrográficas, regiões, fronteiras nacionais ou políticas.

9. Padrões de controle de qualidade: dados acurados e confiáveis devem ser comparados a padrões de referência estabelecidos para técnicas de campo e laboratório. Esses padrões devem ser generalizados e desenvolvidos preferencialmente por associações profissionais, como as sociedades de ciência do solo.

10. Modelagem: embora não substituam dados experimentais de boa qualidade, os modelos são ferramentas úteis para identificar lacunas de conhecimento e extrapolar informações para solos e condições ambientais similares. É necessário que se desenvolvam modelos, conceituais ou baseados em processos, para avaliar a sustentabilidade dos recursos solo e água para diferentes usos da terra e sistemas de manejo. Modelos conceituais são também necessários à definição de indicadores de qualidade do solo relacionados à produtividade e às funções de regulação ambiental.

18. Referências Bibliográficas

- ACTON, D.F. **A program to assess and monitor soil quality in Canada.** Ottawa: Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture, Canada, 1993. 94p. (Contribution, 93).
- ALLEN, T.F.H.; STARR T.B. **Hierarchy:** perspectives for ecological complexity. Chicago: University of Chicago Press, 1982. 310 p.
- ALLISON, F.E. **Soil organic matter and its role in crop production.** Amsterdam: Elsevier, 1973.
- AMERICAN JOURNAL OF ALTERNATIVE AGRICULTURE. Special issue on soil quality. Greenbelt, v.7, n.1/2, 1992. 88p.
- ARNOLD, R.W.; ZABOLES, I.; TARGULIAN, V.C., ed. **Global soil change:** report of IIASA-ISSS-UNEP task force on the role of soil in global change. Luxemburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 1990.
- AUNE, J.B.; LAL, R. The tropical soil productivity calculator: a model for assessing effects of soil management on productivity. In: LAL, R.; STEWART, B.A., ed. **Sustainable management of soils.** Chelsea: Lewis, s.d. In press.
- BAUER, A.; BLACK, A.L. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.248-254, 1982.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics.** 4.ed. New York: John Wiley, 1972.
- BEASLEY, D.B.; MONKE, E.J.; HUGGINS, L.F. ANSWERS: a model for watershed planning. **Transactions of the ASAE**, v.23, p.839-844, 1980.
- BIOT, Y. THEPROM: an erosion productivity model. In: BOARDMAN, J.; FOSTER, I.D.L.; DEARING, J.A., ed. **Soil erosion on agricultural land.** London: John Wiley, 1990. p.465-479.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis.** 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.363-375. (Agronomy Monographs, 9).
- BOHM, W. Ecological studies. **Analysis and Synthesis**, v. 33, p.39-41, 1979.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, v.9, p.177-213, 1989.
- BOUWER, H. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis.** Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.25-844. (Agronomy Monographs, 9).

- BOWMAN, R.A.; REEDER, J.D.; SCHUMAN, G.E. Evaluation of selected soil physical, chemical and biological parameters as indicators of soil productivity. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL QUALITY IN SEMIARID AGRICULTURE, 1989, Saskatoon. **Proceedings...** Saskatoon: University of Saskatchewan, 1990. p.64-70.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p. 463-478. (Agronomy Monographs, 9).
- BRADFORD, J.M. Permeability. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA/SSSA, 1982. pt.1, p.425-441. (Agronomy Monographs, 9).
- BREWER, R.; SLEEMAN, J.R. Soil structure and fabric: their definition and description. **Journal of Soil Science**, v.11, p.172-185, 1960.
- BRUCE, R.R.; LUXMOOR, R.J. Water retention: field methods. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.663-686. (Agronomy Monographs, 9).
- BRUTSAERT, W. Some methods of calculating unsaturated permeability. **Transactions of the ASAE**, v.10, p.400-404, 1967.
- CASSEL, D.K.; FRYREAR, D.W. Evaluation of productivity changes due to accelerated erosion. In: LARSON, W.E.; FOSTER, G.R.; ALLMARAS, R.R.; SMITH, C.M., ed. **Research issues in soil erosion/productivity**. St. Paul: University of Minnesota, 1990. p.41-54.
- CASSEL, D.K., Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.196-201, 1983.
- CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.901-926. (Agronomy Monographs, 9).
- CHILDS, E.C.; COLLIS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A, v.201, p.392-405, 1950.
- COREY, A.T. Air permeability. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.1121-1136. (Agronomy Monographs, 9).
- EDWARDS, A.P.; BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.18, p.64-73, 1967.
- FALAYI, O.; BOUMA, J. Relationship between the hydraulic conductivity of surface crusts and soil management in a Typic Hapludalf. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.39, n.5, p.957-963, 1975.
- FAO (Rome). *A framework for land evaluation*. Rome: FAO, 1976. (Soil Bulletin, 32).
- FAO (Rome). **Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture**. Rome: FAO, 1983. (Soil Bulletin, 52).

- FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEX, D.I., ed. **Hydrologic modeling of small watershed**. St. Joseph: ASAE, 1982. p.297-380.
- GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.383-411. (Agronomy Monographs, 9).
- GIANELLO, C.; BREMNER, J.M. A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.17, n.2, p.195-214, 1986.
- GILLILAND, D.C. **Experiences in statistics**. Dubuque: Kendall/Hunt Publications, 1990. 104p.
- GREEN, R.E.; COREY, J.C. Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods. **Soil Science Society of America Journal**, v.35, p. 3-8, 1971.
- GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, D.C. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, v.34, n.2, p.101-114, 1984.
- GUPTA, R.K.; ABROL, I.P. Salt-affected soils: their reclamation and management for crop production. In: LAL, R.; STEWART, B., ed. **Soil degradation**. Madison: SSSA, 1990. p.223-288. (Advances in Soil Science, 11).
- GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics for particle-size distribution, organic matter percent and bulk density. **Water Resources Research**, v.15, p.1633-1635, 1979a.
- GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. A model for predicting packing density of soils using particle-size distribution. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.758-764, 1979b.
- HABERLEN, J. A soil health index. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.47, p.6, 1986.
- HANKS, R.J.; THORP, F.C. Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate and crust strength. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.20, p.307-310, 1956.
- HERDT, R.W. Measuring sustainability using long-term experiments. In: ROTHAMSTED EXPERIMENT STATION CONFERENCE, Rothamsted, 1993. **Proceedings...** Rothamsted, 1993.
- HIEBSCH, C.K.; MCCOLLUM, R.E. Area x time equivalency ratio: a method for evaluating the productivity of intercrops. **Agronomy Journal**, v.79, n.1, p.15-22, 1987.
- IITA. **Methods of soil analysis**. Ibadan: IITA, 1975.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied geoestatics**. New York: Oxford University Press, 1989.

- JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill, 1941. 281 p.
- KARLEN, D.L.; ERBACH, D.C. Soil tilth: a fundamental basis for sustainable agricultural growth. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL RESOURCES MANAGEMENT FOR A SUSTAINABLE AGRICULTURE, 1990, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: Indian Society of Agronomy, 1990. v.2, p.87-92.
- KAY, B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, v.12, p.1-52, 1989.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.425-442. (Agronomy Monographs, 9).
- KING, A.W.; DeANGELIS, D.L.; POST, W.M. **The seasonal exchange of CO₂ between the atmosphere and the terrestrial biosphere**: extrapolation from site-specific models to regional models. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1987. (ORNL/TM-10570).
- KINIRY, L.N.; SCRIVNER, C.L.; KEENER, M.E. **A soil productivity index based upon predicted water depletion and root growth**. Columbia: Missouri Agricultural Experiment Station, 1983. (Research Bulletin, 1051).
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.635-662. (Agronomy Monographs, 9).
- KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory measurements. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p.687-734. (Agronomy Monographs, 9).
- KNISEL, W.G.; FOSTER, G.R. CREAMS: A system for evaluating best management practices. In: **Economics, ethics, ecology**: roots of productive conservation. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1981. p.177-194.
- LAL, R. The effect of soil texture and density on the neutron and density probe calibration for some tropical soils. **Soil Science**, v.117, p.183-190, 1974.
- LAL, R. Physical characteristics of soils of the tropics: determination and management. In: LAL, R.; GREENLAND, D.J., ed. **Soil physical properties and crop production in the tropics**. London: John Willey, 1979a. p.7-44.
- LAL, R. Concentration and size of gravel in relation to neutron moisture meter and density probe calibration. **Soil Science**, v.127, p.41-50, 1979b.
- LAL, R. A soil suitability guide for different tillage systems in the tropics. **Soil & Tillage Research**, v.5, n.2, p.179-196, 1985.
- LAL, R. Effects of soil erosion on crop productivity. **CRC Critical Reviews in Plant Science**, v.5, n.4, p.303-367, 1987.

- LAL, R. Soil structure and sustainability. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.1, p.67-92, 1991.
- LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. **Soil & Tillage Research**, v.27, p.1-8, 1993.
- LAL, R. **Soil erosion research methods**. 2.ed. Ankeny: Soil & Water Conservation Society, 1994.
- LAL, R.; MILLER, F.P. Soil quality and its management in humid sub-tropical and tropical environments. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONFERENCE, 16., 1993, Massey, New Zealand. **Proceedings...** Massey, 1993.
- LAL, R.; STEWART, B.A., ed. **Sustainable management of soils**. Chelsea: Lewis Publishers, 1994.
- LAMP, J. Minimum data sets and basic procedures for global assessments. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SOIL SCIENCE, 13., 1986, Hamburg. **Transactions...** Hamburg: ISSS, 1986. v.5, p.238-245.
- LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: **Evaluation for sustainable land management in the developing world**: technical papers. Bangkok: International Board for Soil Research and Management, 1992. v.2. (IBSRAM Proceedings, 12).
- LAVELLE, P.; SPAIN, A.V.; BLANCHART, E.; MARTIN, A.; MARTIN, S. Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In: LAL, R.; SANCHES, P.A., ed. **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: SSSA, 1992. p.57-185. (SSSA Special Publication, 29).
- LEE, K.E.; WOOD, T.G. **Termites and soil**. London: Academic Press, 1971.
- MacDONALD, K.B.; WANG, F.; FRASER, W.; JARVIS, I. GIS based system to assess soil quality. In: ACTON, D.F, ed. **A program to assess and monitor soil quality in Canada**. Ottawa: Research Branch, Agriculture Canada, 1993.
- MANRIQUE, L.A.; JONES, C.A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, p.476-481, 1991.
- MANSFIELD, J.E. Land capability for annual rainfed arable crops in northern Nigeria based on soil physical limitation. In: LAL, R.; GREENLAND, D.J., ed. **Soil physical properties and crop production in the tropics**. New York: J. Wiley, 1979. p.407-426.
- MARSHALL, T.J. A relation between permeability and size distribution of pores. **Journal of Soil Science**, v.9, p.1-8, 1958.
- McCOY, E.; KLADIVKO, E.; BOAST, C. Macropore flow. In: LAL, R.; STEWART, B.A., ed. **Soil processes and water quality**. Chelsea: Lewis Publishers, 1993.

- McKEAGUE, J.A.; WANG, C.; TAPP, G.C. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil morphology. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, n.6, p.1239-1244, 1982.
- McLEAN, E.O. Soil pH and lime requirement. In: PAGE, A.L., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1982. pt.2, p.199-224. (Agronomy Monographs, 9).
- MILLINGTON, R.J.; QUIRK, J.P. Permeability of porous solids. **Transactions of the Faraday Society**, v.57, p.1200-1206, 1961.
- MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. New York: John Wiley, 1985. 520p.
- MUCHENA, F.N. Use of soil physical characteristics for land evaluation. In: LAL, R.; GREENLAND, D.J., ed. **Soil physical properties and crop production in the tropics**. New York: John Wiley, 1979. p.427-440.
- NEARING, M.A.; LANE, L.J.; LOPES, V.L. Modeling soil erosion. In: LAL, R., ed. **Soil erosion research methods**. 2.ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1982. pt.2, p. 539-594. (Agronomy Monographs, 9).
- O'NEILL, R.V.; DeANGELIS, D.L.; WAIDE, J.B.; ALLEN T.F.H. **A hierarchical concept of ecosystems**. Princeton: Princeton University Press, 1986. 283 p.
- OAKLEY, G. The statistics of resource and environmental appraisal; Australia 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, 1991. p. 49-53.
- OKIGBO, B.N. **Cropping systems and related research in Africa**. Addis Abeba: AAASA, 1978. 81p. (AAASA Occasional Publications. Series OT-1).
- OLDEMAN, L.R. **Global extent of soil degradation**. Wageningen: ISRIC, 1992. p.19-36. (ISRIC Biannual Report, 1991-92).
- OLSON, K.R. Characterization of pore distribution within soils by mercury intrusion porosimetry and water release methods. **Soil Science**, v.139, p. 400-404, 1985.
- OLSON, K.R. Method to measure soil pores outside the range of Hg intrusion porosimeter. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, n.1, p.132-135, 1987.
- OLSON, K.R.; ZOBECK, T.M. Improved mercury-displacement method to measure the density of soil aggregates. **Soil Science**, v.147, n.1, p.71-75, 1989.
- PAGE, A.L., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1982. pt.2. (Agronomy Monographs, 9).

- PAPENDICK, R.I. Maintaining the soil physical condition. In: SYMPOSIUM ON SOIL RESILIENCE AND LAND USE, 1992, Budapest. **Proceedings...** Budapest, 1992
- PARR, J.F.; PAPENDICK, R.I.; HORMICK, S.B.; MEYER, R.E. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. **American Journal of Alternative Agriculture**, v.7, n.1/2, p.5-11, 1992.
- PIERCE, F.J.; LAL, R. Monitoring soil erosion's impact on crop productivity. In: LAL, R., ed. **Soil erosion research methods**. 2.ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994.
- PIERCE, F.J.; LARSON, W.E.; DOWDY, R.H.; GRAHAM, W.A.P. Productivity of soils: assessing long-term changes due to erosion. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.38, p.39-44, 1983.
- RENARD, K.G.; LAFLIN, J.M.; MCCOOL, D.K. The revised Universal Soil Loss Equation. In: LAL, R., ed. **Soil erosion research methods**. 2.ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994.
- RHOADES, J.D. Soluble salts. In: PAGE, A.L., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: ASA/SSSA, 1982. pt.2, p.167-169. (Agronomy Monographs, 9).
- RITCHIE, J.T.; SINGH, U.; GOODWIN, D.C.; HUNT, L. **A users guide to CERES**: training manual. Muscle Shoals: IFDC, 1989.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. **Plant and Soil**, v.58, n.1, p.327-338, 1981.
- ROSE, C.W. Research on soil erosion processes and basis for soil conservation particles. In: LAL, R., ed. **Soil erosion research methods**. 2.ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994.
- RYAN, T.P. **Statistical methods for quality control**. New York: John Wiley, 1989. 446 p.
- SINGH, K.K.; COLVIN, T.S.; ERBACK, D.C.; MUGHAL, A.Q. Tilth index: an approach to quantifying soil tilth. **Transactions of the ASAE**, v.35, p.1-9, 1992.
- SKIDMORE, E.L. Wind erosion. In: LAL, R., ed. **Soil erosion research methods**. 2.ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994.
- SKIDMORE, E.L.; HAGEN, L.J.; ARMBUST, D.V.; DURAR, A.A.; FRYEAR, D.W.; POTTER, K.N.; WAGNER, L.E.; ZOBECK, T.M. Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion. In: LAL, R., ed. **Soil erosion research methods**. 2.ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994.
- SMITH, J.L.; HALVORSON, J.J.; PAPENDICK, R.I. Estimating soil quality using multivariate indicator kriging. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.743-749, 1993.
- SOIL QUALITY STANDARDS SYMPOSIUM, 1990, San Antonio, Texas. **Proceedings....** Washington D.C: USDA Forest Service, 1991. 80p.

- SOIL SURVEY STAFF. **Procedures for collecting soil samplers and methods of analysis for soil survey.** Washington, D.C.: SCS-USDA/Government Printing Office, 1984. (Soil Survey Investigations. Report, 1).
- STANFORD, G. Assessment of soil nitrogen availability. In: STEVENSON, F.J., ed. **Nitrogen in agricultural soils.** Madison: ASA/SSSA, 1982. 651p. (Agronomy Monographs, 22).
- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry:** genesis, composition reactions. New York: John Wiley, 1982. 443p.
- STORIE, E.R. **Storie index rating:** appendix D. Berkeley: University of California Division of Agricultural Sciences, 1976. (Special Publication, 3203).
- SWIFT, M.J.; WOOMER, P. Organic matter and sustainability of agricultural systems. In: MULONGOY, K.; MERCER, R., ed. **Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture.** London: John Wiley, 1993. p.3-18.
- TAYLOR, H.M.; TERRELL, E.E. **CRC handbook of agricultural productivity.** Boca Raton: CRC Press, 1982.
- THOMAS, G.W. Problems encountered in soil testing methods. In: SOIL testing and plant Analysis. Madison: Soil Science Society of America, 1967. pt.1, p.37-54. (SSSA Special Publications, 2).
- U.S. SLS. **Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils.** Washington: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service/Government Printing Office, 1954. (Handbook, 60).
- USDA. Proceedings of the Soil Quality Standards Symposium. San Antonio, Texas, 1990. Washington D.C.: USDA Forest Service, 1991. 80p.
- VANDIEPEN, C.A.; VANKUELEN, H.; WOLF, J.; BERKHOUT, J.A.A. **Land evaluation:** from intuition to qualification. New York: Springer-Verlag, 1991. (Advances in Soil Science, 15).
- WAGENET, R.J.; BOUMA, J.; GROSSMAN, R.B. Minimum data sets for use of soil survey information in soil interpretative models. In: MAUSBACH, M.I.; WILDING, L.P., ed. **Spatial variabilities of soils and land forms.** Madison: SSSA, 1991. p.161-182. (SSSA Special Publication, 28).
- WALKER, J.; JONES, B. What is meant by indicators and the decision behind those chosen for environmental monitoring and assessment program of the U.S. EPA. In: HAMBLIN, A., ed. **Environmental indicators for sustainable agriculture:** Report on a National Workshop. Canberra: Department of Primary Industry and Energy, Bureau of Rural Resource, 1991. p.44-49.
- WILDING, L.P. Improving our understanding of the composition of the soil-landscape. In: INTERNATIONAL INTERACTIVE WORKSHOP ON SOIL RESOURCES: their inventory, analysis and interpretation for use in the 1990's, 1988, St. Paul. **Proceedings...** St. Paul: University of Minnesota, 1988. p.13-39.

- WILLEY, R.W.; OSIRU, D.S.O. Studies on mixtures of maize and beans with particular reference to plant population. ***Journal of Agricultural Science***, Cambridge, v.79, p.519-529, 1972.
- WILLIAMS, J.R. Sediment yield prediction with Universal Soil Loss Equation using runoff-energy factor. In: ***Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources***. Washington: USDA, 1975. p.244-252. (ARS 40).
- WILLIAMS, J.R.; JONES, C.A.; DYKE, P.T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. ***Transactions of the ASAE***, v.27, n.1, p.129-144, 1984.
- WILLIAMS, J.R.; RENARD, K.G.; DYKE, P.T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. ***Journal of Soil and Water Conservation***, v.38, n.5, p.381-383, 1983.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. ***Predicting rainfall erosion losses***. Washington, D.C.: USDA, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537).
- WOODRUFF, N.P.; SIDDOWAY, F.H. A wind erosion equation. ***Soil Science Society of America Proceedings***, v.29, p.602-608, 1965.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE. ***Towards sustainable development***: a guide to global environment. Washington: WRI, 1993. 385 p



Meio Ambiente

CGTE
3603

