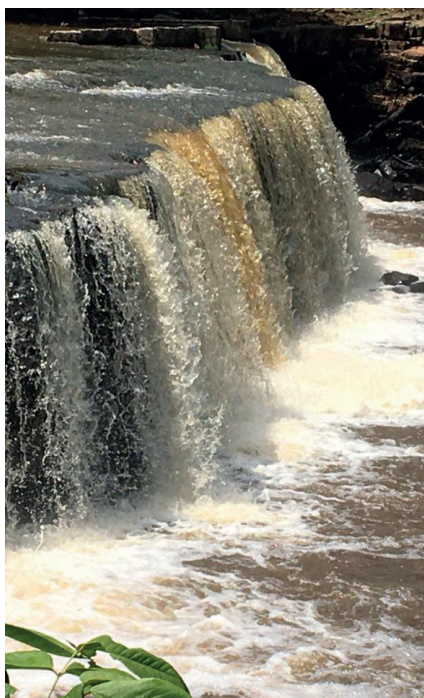


**Conceitos de fertilidade do solo e manejo
adequado para as regiões tropicais**
2ª edição



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Territorial
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
35**

Conceitos de fertilidade do solo e manejo
adequado para as regiões tropicais
2ª edição

Carlos Cesar Ronquim

Embrapa Territorial
Campinas, SP
2020

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Territorial
Av. Soldado Passarinho, nº 303
Fazenda Chapadão
13070-115, Campinas, SP
Fone: (19) 3211.6200
www.embrapa.br/territorial
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Territorial

Presidente
Luciola Alves Magalhães

Secretário-executivo
André Luiz dos Santos Furtado

Membros
Bibiana Teixeira de Almeida, Carlos Alberto de Carvalho, Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues, José Dilcio Rocha, Suzi Carneiro, Vera Viana dos Santos Brandão, Ângelo Mansur Mendes, Carlos Fernando Quartaroli, Marcelo Fernando Fonseca e Paulo Augusto Vianna Barroso

Supervisão editorial
Suzi Carneiro e Bibiana Teixeira de Almeida

Revisão de texto
Bibiana Teixeira de Almeida

Normalização bibliográfica
Vera Viana dos Santos Brandão

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica e tratamento das ilustrações
Suzi Carneiro

Ilustração da capa
Suzi Carneiro, imagens de Carlos Cesar Ronquim

1ª edição (2010): On-line
2ª edição (2020): versão on-line

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Territorial

Ronquim, Carlos Cesar.

Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais / Carlos Cesar Ronquim. - 2.ed. - Campinas: Embrapa Territorial, 2020.

34 p.: il. ; (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Territoria, ISSN 1806-3322; 35).

1. Adubação. 2. Agricultura ecológica. 3. Correção do solo. 4. Sustentabilidade. I. Título. II. Série.

CDD 631.4913

Sumário

Contextualização.....	7
Nutrientes minerais do solo essenciais para as plantas.....	7
Capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases (V%).....	10
Reação do solo.....	14
Expressão e interpretação da reação do solo.....	15
Correção do solo pela calagem.....	16
Equilíbrio na absorção de nutrientes.....	19
Utilização do gesso agrícola.....	21
O alumínio no solo.....	22
Importância da matéria orgânica no solo sob condições tropicais.....	23
Manutenção da fertilidade e produtividade do solo sob condições tropicais.....	26
Fertilidade do solo e o uso de geotecnologias.....	33
Referências.....	34

Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais

Carlos Cesar Ronquim¹

Resumo – A produção agrícola mundial precisará aumentar 70% em relação aos níveis atuais para atender, em 2050, o crescimento da demanda de alimentos resultante de aumento da população, rendimentos crescentes e mudança para dietas ricas em proteínas (FAO, 2017). Essa produção demandará mais de 120 milhões de hectares de terra e, para ocorrer de forma sustentável, dependerá de intensificação agropecuária e aumento da produtividade das áreas já cultivadas. Ante as peculiaridades da agricultura nas regiões tropicais, torna-se necessário conhecer detalhadamente as características e propriedades químicas e físicas dos solos, objetivando seu manejo adequado, o uso mais apropriado de insumos e produções mais rentáveis. Avaliar a fertilidade química dos solos é de suma importância para definir quantidades e tipos de fertilizantes, corretivos e manejo geral que devem ser aplicados ao solo visando à manutenção ou à recuperação de sua produtividade. O objetivo desta publicação é apresentar os principais conceitos da fertilidade dos solos, relacioná-los às formas de manejo mais adequadas para as regiões tropicais e constituir, assim, um texto básico para a compreensão da relação entre conceitos de fertilidade do solo e produtividade agropecuária.

Termos para indexação: adubação, agricultura ecológica, correção do solo, sustentabilidade.

¹ Carlos Cesar Ronquim, Engenheiro-agrônomo, Doutor em Ecologia e Recursos Naturais, pesquisador da Embrapa Territorial, Campinas, SP

Fertility concepts and adequate management for soils in tropical regions

Abstract – Global agricultural production will have to increase by 70% until 2050 to provide for the increasing food supply needed for a growing population, with growing revenues and a shifting, protein-based diet (FAO, 2017). This production will demand over 120 million hectares of agricultural lands, and must rely on sustainable agricultural intensification and productivity increase in areas which are already used for agricultural purposes. Singularities of tropical agriculture require detailed knowledge of chemical and physical properties of the soils, with the aim of properly using supplies and of adequately maintaining soils, to render more profitable productions. Thus, evaluating the chemical fertility of soils is essential to define adequate amounts and types of fertilizers, corrective dressings and management practices to be used, in order to maintain or recover soil productivity. The purpose of this publication is to introduce the main concepts involved in soil fertility, to relate them to the most adequate management practices for tropical regions, and thus offer an elementary resource for understanding the correlations between soil fertility concepts and agricultural productivity.

Index terms: fertilization, ecological agriculture, soil amendments, sustainability.

Contextualização

A evolução da tecnologia de produção nos solos tropicais e o aumento de rendimento das culturas na última década ensejaram a reedição deste Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, buscando alinhá-lo ao contínuo processo de aprimoramento da produtividade agropecuária, principalmente em terras brasileiras. Esta publicação apresenta os principais conceitos relacionados a fertilidade do solo e orienta sobre as formas de manejo mais adequadas para solos das regiões tropicais, por meio de práticas que busquem, além do aumento da produtividade, a sustentabilidade dos sistemas de produção. Originalmente publicado em 2010, este Boletim foi reeditado e teve seu conteúdo revisado também em razão de seu consumo, indicado pelo alto número de downloads nas plataformas da Embrapa, pelo público geral, que é constituído principalmente por produtores rurais, pesquisadores e estudantes ligados aos setores agropecuário e florestal. Esta edição também terá uma versão publicada em inglês, buscando ampliar ainda mais o seu universo de leitores e oferecendo uma possibilidade adicional para consulta e aprendizado sobre o correto manejo dos solos tropicais.

Nutrientes minerais do solo essenciais para as plantas

Os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), também chamados de nutrientes principais, são absorvidos pela planta em maior proporção que os micronutrientes boro (B), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), cloro (Cl) e manganês (Mn), os chamados elementos-traço. Ambos, macro e micronutrientes, são constituintes dos minerais e da matéria orgânica do substrato onde a planta cresce e também são encontrados dissolvidos no solo. Outros nutrientes – selênio (Se), silício (Si), cobalto (Co), sódio (Na), alumínio (Al), vanádio (V) e níquel (Ni) – são considerados elementos benéficos, pois estimulam o crescimento, mas não são essenciais ou são essenciais para determinadas espécies de plantas ou sob determinadas condições específicas.

Um ou vários nutrientes podem estar quase ausentes no solo ou estar presentes, mas em uma forma que as raízes não conseguem absorver. Por

um lado, para tornar elementos presentes disponíveis, o solo deve ser bem manejado. Por outro lado, quando os nutrientes estão ausentes, é preciso repô-los. O conteúdo médio dos elementos minerais no solo e na fitomassa de plantas terrestres é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Conteúdo médio dos elementos minerais (em g/kg de matéria seca)* no solo e na fitomassa de plantas terrestres, e necessidade média dos elementos minerais segundo Larcher (2004), com base em vários autores.

Elemento	Concentração média no solo	Limites de concentração na planta	Necessidades
Si	330	0,2–10	
Al	70	0,04–0,5	
Fe	40	0,002–0,7	aprox. 0,1
Ca	15	0,4–15	3–15
K	14	1–70	5–20
Mg	5	0,7–9	1–3
Na	5	0,02–1,5	
N	2	12–75	15–25
Mn	1	0,003–1	0,03–0,05
P	0,8	0,1–10	1,5–3
S	0,7	0,6–9	2–3
Sr	0,25	0,003–0,4	
F	0,2	até 0,02	
Rb	0,15	até 0,05	
Cl	< 0,1	0,2–10	> 0,1
Zn	0,09	0,001–0,4	0,01–0,05
Ni	0,05	até 0,005	
Cu	0,03	0,004–0,02	0,005–0,01
Pb	0,03	até 0,02	
B	0,02	0,008–0,2	0,01–0,04
Co	0,008	até 0,005	
Mo	0,003	até 0,001	< 0,0002

*Para expressar os valores em porcentagem (%) na matéria seca, deve-se dividir por 10 os dados apresentados.

A reposição dos nutrientes é feita usando fertilizantes químicos minerais, matéria orgânica, minerais retirados de jazidas ou do ar (no caso da fixação biológica do nitrogênio). A matéria orgânica contém praticamente todos os macro e micronutrientes e, além disso, confere melhor estrutura ao terreno, aumentando sua fertilidade. Os fertilizantes minerais, ao contrário da matéria orgânica, apresentam alta concentração de nutrientes altamente solúveis, os quais podem ser absorvidos rapidamente pelas plantas ou lixiviados² com mais facilidade.

Os fertilizantes minerais comercializados para a adubação das culturas podem ser simples (contêm um ou mais macroelementos) ou compostos (mistura de adubos simples). Os fertilizantes compostos são conhecidos por suas fórmulas (por exemplo, 4-14-8, 10-10-10, 20-5-20). Esses números indicam a porcentagem de nitrogênio, fósforo e potássio (N-P-K, respectivamente) no fertilizante químico. O importante no manejo dos nutrientes é que eles precisam estar em equilíbrio no solo: a adição de um deles sem que sejam consideradas a situação dos outros e as características da cultura pode levar a fracassos na colheita. Nas regiões tropicais, a matéria orgânica em quantidades suficientes no solo é fator decisivo para a manutenção do equilíbrio dos nutrientes no solo.

Além dos macro e micronutrientes absorvidos do solo, as plantas absorvem carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O). Por um lado, esses elementos não podem ser considerados nutrientes verdadeiramente minerais, uma vez que são obtidos primariamente da água e do dióxido de carbono. Por outro lado, são os constituintes básicos de todas as moléculas orgânicas. Sem eles simplesmente não haveria organismos vivos. O nitrogênio atmosférico também pode ser incorporado às plantas por meio da ação de microrganismos que vivem em simbiose com elas.

Liebig (1803-1873), um químico alemão, afirmou que a maior parte do C nas plantas vem do dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e o H e O provêm da água, e que as plantas absorvem tudo indiscriminadamente do solo, mas excretam de suas raízes aqueles materiais que não são essenciais (Liebig, 1972).

² Lixiviação: processo de remoção de substâncias solúveis do solo por meio da água que o drena

É de Liebig também a "lei do fator mínimo", segundo a qual a substância mineral em menor concentração relativa determina o limite para crescimento e rendimento. No entanto, o rendimento não é limitado somente por uma substância mineral. Para que a planta tenha metabolismo balanceado, alta produção de matéria seca e desenvolvimento desimpedido, não basta que os nutrientes principais e os elementos-traço estejam disponíveis em quantidades suficientes, eles também devem ser absorvidos em proporções balanceadas.

Em solos das zonas tropicais com poder tampão³ reduzido, a adição de fertilizantes pode ocasionar facilmente um desequilíbrio. Essa condição pode ser evitada com a manutenção de um nível adequado de matéria orgânica no solo. A matéria orgânica aumenta o poder tampão do solo e diminui os perigos de desequilíbrios minerais causados por adubação arbitrária.

Capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases (V%)

Em razão da superfície eletricamente carregada que apresentam as argilas coloidais⁴, as substâncias húmicas⁵ e os sesquióxidos de ferro e alumínio⁶ (principais componentes da fração mineral dos solos sob condições tropicais), os íons e moléculas polarizadas são atraídos e ligam-se a esses componentes de forma reversível.

As argilas minerais, as substâncias húmicas e os óxidos de ferro e alumínio apresentam determinada superfície de troca e são os principais coloides responsáveis pela capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos sob condições tropicais (Tabela 2). Os coloides argilosos são frações menores que 0,001mm ou 1 μ . Os coloides orgânicos constituem-se em

³ Poder tampão: capacidade de resistência do solo a mudanças bruscas de pH. Exige maiores doses de calcário para atingir os valores desejados de saturação por bases (V%) ou pH. Solos mais ricos em matéria orgânica e/ou com maior CTC apresentam maior tamponamento.

⁴ Coloides: partículas do solo de reduzido tamanho (entre 10⁻⁴ e 10⁻⁷ cm). Apresentam cargas superficiais que podem reter nutrientes (íons) de forma trocável.

⁵ Substâncias húmicas: substância com caráter coloidal que agregam o solo. São produzidas pela decomposição da palha, em condições aeróbias, por bactérias e fungos. Têm poder agregante.

⁶ Sesquióxidos de Fe e de Al: fazem parte da fração coloidal do solo. São materiais mal cristalizados, porém não amorfos.

húmus; são produtos da decomposição da matéria orgânica, transformados biologicamente. Em razão do maior número de cargas negativas do que positivas desses coloides, a adsorção é principalmente de cátions. No entanto, há nesses coloides alguns sítios com cargas positivas e que podem atrair ânions (principalmente nos óxidos de ferro e alumínio).

A capacidade de troca de cátions (CTC) de um solo, de uma argila ou dos húmus da matéria orgânica representa a quantidade total de cátions

Tabela 2. Capacidade de troca de cátions (CTC) de alguns coloides do solo sob condições tropicais. Adaptada de Mello et al. (1983).

Coloide	CTC (mmol _c /dm ³)
Substâncias húmicas	1.500 – 5.000
Vermiculita*	1.000 – 1.500
Montmorilonita*	500 – 1.000
Alofana*	250 – 700
Ilita*	100 – 500
Caulinita*	50 – 150
Óxidos de Fe e Al	20 – 50

*Argilas minerais.

em condição permutável ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{NH}_4^{+} + \text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$) retidos na superfície desses materiais. A CTC depende da quantidade e do tipo de argila e de matéria orgânica presentes. Um solo com alto teor de argila pode reter mais cátions trocáveis que um solo com baixo teor de argila. A CTC também aumenta com o aumento no teor de matéria orgânica. A CTC do solo, além de ser influenciada pela espécie e quantidade de argila e matéria orgânica e pela superfície específica, também é fortemente alterada pelo pH do meio. Esse efeito decorre principalmente da dissociação dos radicais orgânicos ou sesquióxidos de ferro e alumínio, além da desobstrução de cargas da matéria orgânica ocupadas por Al^{3+} , Fe^{2+} e Mn^{+} .

Os resultados da CTC nas análises de rotina para avaliação da fertilidade do solo, inclusive nas análises de terras de agricultores, são expressas em centimols de carga por decímetro cúbico de solo (cmol_c/dm³) ou milimols de carga por decímetro cúbico de solo (mmol_c/dm³), que equivale a 10 cmol_c/dm³.

A capacidade de troca iônica dos solos representa, portanto, a graduação da capacidade de liberação de vários nutrientes, favorecendo a manutenção da fertilidade por um período prolongado e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos da aplicação de fertilizantes.

As cargas negativas dos solos são divididas em cargas permanentes e cargas dependentes do pH. As cargas permanentes existem nas estruturas dos minerais e, por essa razão, estão sempre operantes. Já as cargas dependentes do pH podem ser efetivas ou não, dependendo do pH do meio.

Um solo é considerado bom para a nutrição das plantas quando a maior parte da CTC do solo está ocupada por cátions essenciais, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Porém, se grande parte da CTC está ocupada por cátions potencialmente tóxicos, como H^+ e Al^{3+} , o solo é considerado pobre (Tabela 3).

A maioria dos solos tropicais ácidos apresenta CTC com dominância de Al (Al^{3+}). Um valor baixo de CTC indica que o solo tem pequena capacidade

Tabela 3. Capacidade de troca de cátions (CTC) e suas implicações práticas. Adaptado de Potash & Phosphate Institute (1995).

CTC elevada	CTC baixa
Alta porcentagem de argila e, ou, alto teor de M.O.	Baixa porcentagem de argila ou baixo teor de M.O.
Maior quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH	Menor quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH
Maior capacidade de retenção de nutrientes a uma certa profundidade	Nitrogênio e potássio lixiviam mais
Maior capacidade de retenção de umidade	Menor capacidade de retenção de umidade

para reter cátions em forma trocável. Nesse caso, não devem ser feitas adubações e calagens em grandes quantidades de uma só vez, mas sim de forma parcelada, para evitar maiores perdas por lixiviação.

A CTC pode ser expressa como “CTC total” quando considerar todos os cátions permutáveis do solo ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{NH}_4^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$). No entanto, o H^+ só é retirado da superfície de adsorção por reação direta com hidroxilas (OH^-), originando água ($\text{H}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$). Quando a CTC é expressa sem considerar o íon H^+ , a denominação é “CTC efetiva”. Um solo

pode apresentar alto valor de CTC total (por exemplo, $100 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3$), mas uma parcela significativa das cargas negativas do solo (por exemplo, 60%) pode estar adsorvendo íons H^+ . Neste caso, a CTC efetiva será de apenas $40 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3$.

Muitos solos da região tropical apresentam também cargas positivas, embora predominem as cargas negativas na grande maioria. Mesmo em solos que apresentam um teor considerável de cargas elétricas positivas, a presença da matéria orgânica, cuja quase totalidade é formada por cargas negativas e dependentes do pH, leva a um balanço final de superioridade de cargas negativas nas camadas superiores do solo. Não existe um mecanismo totalmente definido para explicar a retenção de ânions pelo solo. Os sesquióxidos de ferro e alumínio adsorvem alguns ânions por meio da geração de cargas positivas. A troca ou adsorção iônica na forma aniônica pode ocorrer, por exemplo, com: NO_3^- , PO_4^{4-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- . Mas, em geral, essa retenção não é significativa acima de pH 6,0.

A soma de bases trocáveis (SB) de um solo, argila ou húmus representa a soma dos teores de cátions permutáveis, exceto H^+ e Al^{3+} ($\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$) com valores expressos em $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ou $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$.

A SB dá uma indicação do número de cargas negativas dos colóides que está ocupado por bases. A SB, em comparação com CTC efetiva e Al trocável, permite calcular a porcentagem de saturação de alumínio e a porcentagem de saturação de bases dessa CTC. Em comparação com a CTC a pH 7,0, permite avaliar a porcentagem de saturação por bases (V%) dessa CTC.

Saturação por bases (V%, Equação 1) é o nome dado à soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions. Esse parâmetro reflete, em termos percentuais, quantos dos pontos de troca de cátions potencial do complexo coloidal do solo estão ocupados por bases.

$$V(\%) = 100 * \text{SB} \div \text{CTC}$$

ou

$$V(\%) = 100 \times (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+} \quad (1)$$

$$V(\%) = 100 * \text{SB} \div \text{CTC}$$

Na fórmula é utilizado o valor da “CTC total”.

Excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, a V% é utilizada até como complemento na nomenclatura dos solos, que podem ser divididos de acordo com a saturação por bases em:

- solos eutróficos (férteis), V% \geq 50%, que apresentam altos valores de bases – especialmente cálcio, que influi favoravelmente no crescimento radicular.
- solos distróficos (pouco férteis), V% $<$ 50%. Alguns solos distróficos podem ser muito pobres em Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e apresentar teor de alumínio trocável muito elevado, chegando a apresentar saturação por alumínio (m% – % de saturação por Al) superior a 50%; e nesse caso são classificados como solos álicos (muito pobres): Al trocável \geq 3 $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ e m% \geq 50%.

Um índice V% baixo significa que há pequenas quantidades de cátions, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ saturando as cargas negativas dos coloides, e que a maioria delas está sendo neutralizada por H^+ e Al^{3+} . O solo, nesse caso, provavelmente será ácido, podendo até conter alumínio em nível tóxico para as plantas. Essa situação pode ser comum para grandes áreas tropicais. A maioria das culturas apresenta boa produtividade quando no solo é obtido valor V% entre 50% e 80% e valor de pH entre 6,0 e 6,5.

A porcentagem de saturação por alumínio, ou m% (Equação 2), expressa a fração da CTC efetiva ocupada pelo Al trocável (acidez trocável). Em termos práticos, reflete a porcentagem de cargas negativas do solo que está ocupada por Al trocável. É uma forma de expressar a toxidez de alumínio.

$$m\% = 100 \times \frac{\text{Al}^{3+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Al}^{3+}} \quad (2)$$

O valor é expresso em $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ou $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$.

Reação do solo

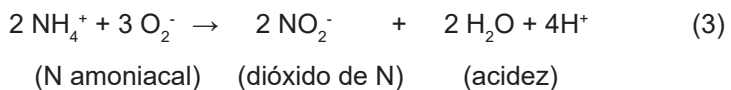
Reação do solo é o grau de acidez ou de alcalinidade de um solo. A reação do solo está ligada à sua fertilidade, porque várias condições importantes – tais como estrutura, solubilidade de minerais, disponibilidade

de nutrientes⁷, atividade de microrganismos e absorção de íons pela planta – são influenciadas pela reação do solo.

A reação do solo depende da concentração de íons H⁺ na solução do solo (acidez momentânea) e da concentração de íons H⁺ adsorvidos em substâncias de troca (acidez potencial). Solos ácidos são comuns nas regiões sob condições tropicais, onde a grandeza da precipitação pluviométrica é tal que os elementos alcalinos, notadamente o Ca²⁺ e o Mg²⁺, são lixiviados das camadas superiores pelas águas contendo CO₂ e substituídos nos coloides pelos íons H⁺.

A acidificação dos solos é um processo químico que ocorre naturalmente. Todos os solos "envelhecem" ou sofrem intemperismo, e a acidificação é parte desse envelhecimento natural. O Brasil, por estar sob clima tropical, no qual a ação de chuvas e altas temperaturas são intensas o ano inteiro, apresenta solos mais velhos e, por isso, mais ácidos.

Um solo pode tornar-se mais ácido à medida que é cultivado. Assim, íons básicos como Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ são removidos, geralmente por absorção pelas culturas, e podem ser substituídos por Al³⁺. A acidificação de solos cultivados também pode ocorrer por meio de adubação, especialmente usando adubos nitrogenados. Um exemplo é mostrado na Equação 3.



Expressão e interpretação da reação do solo

O pH (potencial hidrogeniônico) indica a quantidade de íons hidrogênio (H⁺) que existe no solo. Logo, um solo é ácido quando apresenta muitos íons H⁺ e poucos íons cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e potássio (K⁺) adsorvidos em seu complexo coloidal de troca.

⁷ Disponibilidade de nutrientes: nutrientes que podem ser absorvidos pelas raízes das plantas. Fração do teor total do nutriente que está em solução no solo ou em condições de passar rapidamente para a solução.

O pH fornece indícios das condições químicas gerais do solo. Solos com acidez elevada (baixos valores de pH) geralmente apresentam: pobreza em bases (cálcio e magnésio, principalmente); elevado teor de alumínio; excesso de manganês; alta fixação de fósforo nos colóides do solo; tendência de lixiviação de potássio; e deficiência de alguns micronutrientes. O pH do solo é o indicador de uma situação biológico-físico-química e, como tal, seria enganoso considerar somente os seus efeitos químicos diretos sobre as raízes.

Correção do solo pela calagem

A correção, ou calagem⁸, no solo tropical, deve influir sobre a soma de bases (SB), conseqüentemente elevando a disponibilidade de nutrientes e aumentando o complexo de troca⁹ para as plantas e o valor da CTC efetiva. A correção pela calagem também satura o complexo de troca com cálcio e magnésio e eleva o pH até um nível em que o Al se torne praticamente indisponível para as culturas.

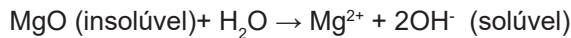
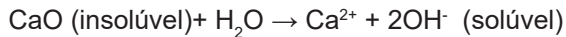
Para corrigir a acidez do solo, deve-se utilizar um elemento que libere ânion e forme um ácido fraco com o hidrogênio, e que forneça cálcio ou cálcio e magnésio para a planta. Os materiais empregados na correção da acidez do solo tropical (calcários) são encontrados na natureza em forma de rocha, que é moída e peneirada para ser aplicada ao solo. O calcário aplicado ao solo forma os íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- (por solubilização e dissociação). Este último reage com a água e forma íons hidroxila (OH^-), água e dióxido de carbono (CO_2). As hidroxilas reagem com os íons Al^{3+} e H^+ adsorvidos e forma hidróxido de alumínio insolúvel (etapa de neutralização) e água (etapa de imobilização do alumínio tóxico), liberando as cargas antes ocupadas por esses elementos. Tais cargas são, então, ocupadas pelos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} . Essas reações são exemplificadas a seguir.

- Solubilização e dissociação do calcário:

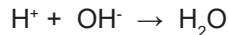
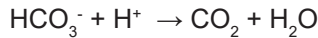


⁸ Calagem: prática de aplicação de material corretivo (calcário) da acidez do solo.

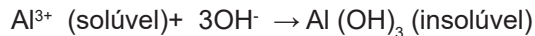
⁹ Complexo de trocas: cargas do solo utilizadas nos processos de troca iônica.



- Neutralização de ácidos no solo:



- Insolubilização do alumínio tóxico trocável no solo:



Após a aplicação do calcário ocorre, portanto, a neutralização do alumínio trocável, aumentando a saturação por bases (V%). Com a neutralização de parte do hidrogênio adsorvido, ocorre elevação do pH do solo.

Para que a reação ocorra, o calcário deve ser bem misturado ao substrato e ficar em contato com todas as partículas. O solo no qual será lançado o calcário deve estar úmido, para solubilizá-lo. O calcário deve ser aplicado com tempo suficiente para reagir com o solo. A maioria dos calcários comercializados exige um período mínimo de três meses para reagir completamente.

A calagem proporciona diversos benefícios, como: aumento do pH e até melhoria de propriedades físicas de alguns solos, neutralização do alumínio e manganês tóxicos, aumento dos teores de cálcio e magnésio, aumento da disponibilidade de fósforo e molibdênio, aumento da atividade de microrganismos.

O critério mais seguro para recomendar a dose de calcário é aquele em que se procura elevar a porcentagem de saturação em bases (V%) a um valor adequado para a cultura nos solos tropicais. A quantidade de calcário é calculada (Equação 4) para aumentar a porcentagem de cátions que condicionam os valores de CTC, geralmente para 70% (Sul e Sudeste do Brasil) ou 50% (no Cerrado brasileiro).

$$NC = T (V_2 - V_1) \div PNRT \div 10 * p \quad (4)$$

NC = necessidade de cal, em tonelada de calcário por hectare.

T = CTC = capacidade de troca catiônica ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$).

V_2 = % de saturação em bases desejada (entre 50 e 70, dependendo da cultura).

V_1 = % de saturação em bases encontrada pela análise de solo.

PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário (fornecido pelo distribuidor do calcário). Variável em função dos teores de CaO e MgO e da granulometria do produto. Como a CTC foi utilizada em $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$, o valor de PRNT deve ser dividido por 10 (como está na fórmula).

p = fator de profundidade de incorporação do calcário (1 para 0 – 20 cm ou 1,5 para 0 – 30 cm).

A determinação de pH em água foi, durante muito tempo, o método padrão nas análises voltadas à finalidade de fertilidade. No entanto, quando as amostras são colhidas úmidas (o que é comum), há risco de aumento na concentração de determinados sais durante o tempo de transporte, armazenamento e preparo da amostra antes da análise. Quando isso acontece, a determinação do pH é afetada. Para evitar esse problema, em muitos locais a leitura de pH foi feita usando uma solução salina diluída (CaCl_2), por permitir leituras mais estáveis. Esse método reduz ou evita a variação sazonal (na época mais seca, um mesmo solo pode apresentar pH em água mais baixo que na época chuvosa) e, ainda, reduz o efeito das aplicações de fertilizantes fortemente salinos nas leituras de pH. A interpretação adotada para valores de pH em CaCl_2 é apresentada na Tabela 4.

Entretanto, para o agricultor de regiões carentes em laboratórios de análise química de solo, a determinação do pH em água é de grande valia, pois representa um método simples, prático e econômico.

Tabela 4. Limites de interpretação de classes para a acidez do solo. Baseado em Tomé Júnior (1997).

Acidez	pH em solução de CaCl ₂
Acidez muito alta	< 4,3
Acidez alta	4,4 – 5,0
Acidez média	5,1 – 5,5
Acidez baixa	5,6 – 6,0
Acidez muito baixa	6,1 – 7,0
Neutro	7,0
Alcalino	> 7,0

Equilíbrio na absorção de nutrientes

Os nutrientes no solo estão interligados e apresentam estritas proporções uns em relação aos outros. Cada excesso de um nutriente é relativo às quantidades dos outros elementos encontrados no solo, e a deficiência é sempre considerada para o elemento que se apresenta no nível mais baixo no momento (Tabela 5).

Tabela 5. Principais relações envolvendo adições de macronutrientes em excesso no solo que podem provocar a inibição de micronutrientes e fósforo. Adaptado de Bergmann (1973).

Nutriente em excesso	Principal deficiência induzida
NH ₄	Cu
NO ₃	Mo
P	Zn
K	B
Ca	Mn
Mg	Cu
S	P

As interações entre nutrientes podem ser negativas (inibição) ou positivas (sinergismo). Na inibição, a presença de um elemento diminui a absorção de outro elemento. No sinergismo, a presença de um elemento favorece a absorção de outro elemento, proporcionando efeito benéfico para a planta (Tabela 6).

Tabela 6. Principais relações dos efeitos de um íon sobre a absorção de outro. Adaptado de Malavolta et al. (1989).

Íon	Inibição
Mg ²⁺ , Ca ²⁺	K ⁺
H ₂ PO ₄ ⁻	Al ³⁺
K ⁺ , Ca ²⁺	Al ³⁺
H ₂ BO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺
K ⁺	Ca ²⁺ (alta concentração)
SO ₄ ²⁻	SeO ₄ ²⁻
SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
Zn ²⁺	Mg ²⁺
Zn ²⁺	Ca ²⁺
Zn ²⁺	H ₂ BO ₃ ⁻
Fe ²⁺	Mn ²⁺
Zn ²⁺	H ₂ PO ₄ ⁻
Cu ²⁺	MoO ₄ ²⁻
Íon	Sinergismo
K ⁺	Ca ²⁺ (baixa concentração)
MoO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻

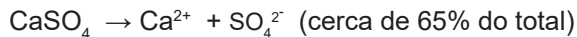
Como a solução do solo apresenta uma gama bastante heterogênea de íons, a presença de um pode modificar a velocidade de absorção de outro. Portanto, a manutenção de teores equilibrados desses cátions no solo por meio de calagem e de adubação adequadas é um princípio básico para evitar a indução de deficiência de alguns deles nas culturas por esses processos.

Utilização do gesso agrícola

Quando é feita a calagem, o calcário geralmente não desce com facilidade no perfil do solo. Resulta daí que a acidez é corrigida somente na superfície e não em profundidade. Assim, as raízes desenvolvem-se com dificuldade nas camadas situadas abaixo daquela à qual o calcário foi incorporado. Como consequência, a planta é menos capaz de absorver os nutrientes do solo.

A utilização do gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) controla esse problema, pois, graças ao íon acompanhante, SO_4^{2-} , o Ca^{2+} do gesso torna-se capaz de descer pelo perfil. Dessa descida resultam: maior participação do Ca^{2+} e menor do Al^{3+} no complexo de troca, neutralização do excesso de alumínio, maior desenvolvimento do sistema radicular em camadas mais profundas e conseqüente aumento na resistência à seca. Diferentemente do calcário, o gesso agrícola não altera o pH do solo. As reações são apresentadas a seguir, de forma simplificada.

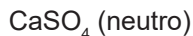
- Dissociação parcial do gesso na superfície



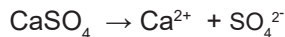
- Solubilização



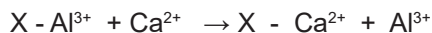
- Lixiviação do gesso solúvel



- Dissociação em profundidade



- Neutralização do Al tóxico em profundidade



A aplicação de gesso em solos tropicais é recomendável nas seguintes condições: ocorrência, nas camadas abaixo de 20 cm, de teores de cálcio menores que 5 mmol/dm^3 e/ou saturação por alumínio (m%) superior a 40%.

A quantidade de gesso que deve ser aplicada é dada pela fórmula mostrada na Equação 5.

$$NG=(4 \text{ a } 6)*\text{teor de argila} \quad (5)$$

NG = necessidade de gesso (kg/ha).

Teor no solo de argila expresso em g/kg.

O alumínio no solo

O solo apresenta tanto mais alumínio quanto maior for o teor em argila caulinitica, uma vez que o alumínio é parte integrante e predominante dessa argila mineral 1:1¹⁰. Quando a argila se decompõe, ocorre liberação do Al⁺³ das camadas octaédricas. O Al⁺³ assim produzido pode permanecer na superfície em forma trocável (deslocando H⁺ dos sítios de adsorção do solo) ou passar para a solução do solo. Se o alumínio for absorvido, pode alterar a fisiologia e a morfologia da planta cultivada.

O alumínio no solo é considerado o inimigo número um de todas as culturas. No entanto, para algumas espécies de plantas nativas arbóreas de cerrado, como o cinzeiro (*Vochysia tucanorum* Mart.), ou mesmo cultivadas, como a erva-mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil.), que estão adaptadas a solos ácidos e com elevada saturação por Al³⁺, o Al estimula o crescimento radicular e tem efeito benéfico ao desenvolvimento da planta.

O óxido de alumínio é um agente que contribui de maneira eficaz na estrutura do solo tropical, sendo, portanto, altamente benéfico. Se o alumínio trocável não ultrapassar determinada porcentagem dos cátions na CTC efetiva (dependendo da textura do solo) – 40% dos cátions –, possivelmente não será maléfico às plantas (Primavesi, 2006).

Enquanto os cristais de argila estiverem intactos, haverá pouca possibilidade de aparecer Al trocável até níveis tóxicos. Quando, porém, ocorrerem condições anaeróbias no solo, por causa de sua compactação, e o valor de pH decrescer ou subir muito, a argila será intemperizada, aumentando

¹⁰ Argila 1:1: argila do tipo duas camadas. Sua estrutura é em lâminas compostas de duas camadas de tetraedros de silício e uma central de octaedro de alumínio. Exemplos são a caulinita e haloisita. São argilas de carga superficial (capacidade de troca de cátions) baixa e dependente do pH. São as mais comuns em solos tropicais.

a liberação de alumínio (Primavesi, 2006). Por isso é importante fazer o manejo, para que o solo não se torne compactado ao longo dos cultivos. No entanto, em solos sob clima quente e úmido, como nas condições tropicais, há rápida remoção das bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$) e do silício dos minerais e permanecem as argilas mais simples (caulinita) e óxidos de ferro e de alumínio. Esse processo intenso e prolongado de intemperismo libera íons Al^{3+} , aumentando o valor m% dos solos sob condições tropicais.

A interpretação dos valores de Al (alto, médio, baixo) é útil (Tabela 7), mas a interpretação de H + Al depende dos valores da CTC, os quais variam de solo para solo. Um valor alto de teor de alumínio em um solo arenoso pode ser desprezível em um argiloso. Para se avaliar corretamente a toxidez por alumínio, deve ser calculada a saturação por Al (m%) (Equação 6).

$$\text{m\%} = [\text{mmol}_c(\text{Al})/\text{dm}^3 \times 100] / [\text{mmol}_c(\text{C.T.C. efetiva})/\text{dm}^3] \quad (6)$$

Tabela 7. Interpretação dos valores de saturação de alumínio no solo (m%), segundo Osaki (1991).

m%	Classificação
< 5	Muito baixo (não prejudicial)
05–10	Baixo (pouco prejudicial)
10,1–20	Médio (medianamente prejudicial)
20,1–45	Alto (prejudicial)
> 45	Muito alto (altamente prejudicial)

Importância da matéria orgânica no solo sob condições tropicais

Em oposição aos solos sob matas, solos agrícolas sob condições tropicais têm predomínio de bactérias aeróbias com atividade intensa, e a acumulação de húmus é difícil. A produção dirigida e periódica de substâncias agregantes intermediárias da decomposição completa da matéria orgânica¹¹ é, portanto, o único meio de manter a produtividade desses solos (Primavesi, 2006).

¹¹ Matéria orgânica do solo: toda substância morta no solo que provenha de resíduos animais e vegetais em diversos estágios de decomposição. Desempenha papel importante no solo, melhorando suas condições físicas e químicas e adicionando a ele importantes propriedades físico-químicas, como a capacidade de troca de cátions.

Após alguns anos de cultivo, o teor de matéria orgânica estabiliza-se em torno de 25 a 30 g por dm^3 em solos argilosos e em valores mais baixos em solos de textura média ou arenosa. Assim, quando se apresenta rico em matéria orgânica, um solo agrícola provavelmente está localizado em região de clima frio ou de grande altitude, ou apresenta excesso de água (deficiência de O_2) ou é extremamente pobre em nutrientes. Essas três situações inibem a plena atividade dos microrganismos decompositores, e a matéria orgânica se acumula.

A caulinita e os óxidos de ferro e alumínio, importantes componentes da fração mineral dos solos sob condições tropicais, podem contribuir pouco para a capacidade de troca de cátions, mas a matéria orgânica pode representar mais de 80% do valor total da CTC. Porém, as cargas negativas da matéria orgânica são provenientes da dissociação de íons H^+ de radicais carboxílicos e fenólicos e, portanto, serão efetivas somente em valores elevados de pH (quando os íons H^+ poderão ser neutralizados por hidroxilas).

Um solo rico em matéria orgânica apresenta altos valores de CTC total, mas, se for ácido, pode apresentar baixos valores de CTC efetiva. Se houver condições favoráveis à sobrevivência de bactérias e fungos, formam-se ácidos húmicos. Esses ácidos têm papel importante na formação de grumos e macroporos responsáveis por tornar a terra fofa e facilitar a entrada de ar e água no solo.

A matéria orgânica não é, essencialmente, um adubo em forma orgânica, mas um condicionador biofísico do solo que recupera sua porosidade. Além disso, por apresentar baixa densidade em relação aos minerais, reduz a densidade aparente¹² do solo.

Quando humificada, a matéria orgânica traz mais benefícios, aumentando a capacidade de troca de cátions do solo e o seu poder tampão (importante para substratos quimicamente adubados).

Entre os diversos tipos de substâncias orgânicas, somente o húmus consegue influir nas propriedades químicas do solo, embora a palha, durante sua decomposição, tenha influência maior sobre a física do solo. Porém, o

¹² Densidade aparente: corresponde à massa do solo seco por unidade de volume aparente, ou seja, o volume do solo ao natural, incluindo o espaço poroso. Um valor superior a $1,4 \text{ kg/m}^3$ geralmente indica adensamento ou compactação do solo, a não ser que se trate de um solo argiloso.

efeito da matéria orgânica depende de seu manejo adequado e, para isso, é preciso que a matéria orgânica seja aplicada superficialmente e nunca enterrada.

É possível determinar a contribuição da matéria orgânica e da fração mineral na CTC do solo. A matéria orgânica, apesar de ocorrer em teores significativamente mais baixos que a fração argila, foi a principal responsável pela CTC, e contribuiu com 56% a 82% do total de cargas elétricas negativas (Tabela 8). Esses dados ressaltam a importância do manejo adequado da matéria orgânica quando a meta é aumentar a capacidade de retenção de cátions no solo.

O cultivo do solo com adições frequentes de matéria orgânica é a forma mais racional e ecológica de manter ou aumentar a fertilidade do solo tropical, embora esta técnica seja muitas vezes inviável econômica e tecnicamente em grandes áreas. Em pequenas áreas é plenamente realizável, e, ao contrário do que normalmente acontece no cultivo tradicional dos solos tropicais, com

Tabela 8. Capacidade de troca de cátions (CTC) de amostras de solos, total e da matéria orgânica (M.O.). Adaptado de Raji et al. (1996).

Solos	Profundidade (cm)	Teor de argila (g/kg)	Teor de M.O. (g/kg)	CTC		
				TOTAL (cmol _c /dm ³)	M.O. (cmol _c /dm ³)	% da CTC devido a M.O.
A	0 – 65	50	8	3,2	2,2	69
B	0 – 15	60	6	3,3	2,1	64
C	0 – 14	120	25	10	8,2	82
D	0 – 16	190	24	7,4	6	81
E	0 – 12	130	14	3,7	2,7	73
F	0 – 15	640	45	24,4	15	62
G	0 – 18	590	45	28,9	16,1	56
H	0 – 17	240	12	3,9	2,9	74

o passar do tempo as condições físicas, biológicas e as condições químicas melhoram significativamente (Tabela 9).

Manutenção da fertilidade e produtividade do solo sob condições tropicais

A fertilidade do solo é apenas um entre vários fatores que determinam a

Tabela 9. Influência da matéria orgânica nas características químicas de um Latossolo (A) da região de São Carlos, SP, e o mesmo substrato após seis anos (B) de cultivos consecutivos com hortaliças, sob estufa agrícola e fertilizado periodicamente com material orgânico: cinzas, estrume de gado, bagaço de cana decomposto por microrganismos fermentadores inoculados, cinza de madeira e palha de arroz utilizada como cobertura morta. Dados não publicados do autor.

Solo	P _{resina} (mg dm ⁻³)	M.O. (g dm ⁻³)	pH (CaCl ₂)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al (mmol _c dm ⁻³)	T= SB	CTC	V (%)
A	7	19	4,6	0,5	10	4	28	14	43	34
B	322	62	6,9	5,9	352	23	12	81	393	97

magnitude do rendimento da cultura e interferem na produtividade agrícola. A fertilidade do solo pode advir de causas naturais ou ser criada pela adição de nutrientes aos solos durante o cultivo. Outro ponto importante é que mesmo que seja fértil quando nativo, um solo pode, sob manejo inadequado, transformar-se em solo de baixa fertilidade.

É a partir das experiências de Liebig (1803–1873) que a fertilidade do solo passou a ser tratada como o estoque de nutrientes nele contido e a determinar a necessidade ou não de adição de produtos químicos, com incorporação dos principais elementos necessários ao desenvolvimento das plantas instaladas.

Um solo fértil é aquele que contém, em quantidades suficientes e balanceadas, todos os nutrientes essenciais em forma assimilável. Esse solo deve estar razoavelmente livre de materiais tóxicos e apresentar propriedades físicas e químicas que atendam a demanda dos vegetais. Um solo produtivo é aquele que, sendo fértil, deve estar localizado em uma zona climática capaz de proporcionar suficiente umidade, nutrientes e estrutura para o desenvolvimento das raízes e da planta nele cultivada.

A perda de fertilidade é agravada se o solo for manejado, sob condições tropicais, como se fosse um solo de clima temperado mais pobre em nutrientes e situado em clima mais quente (Tabela 10). As plantas reagem diferentemente em clima tropical e, para uma alta produção de biomassa, exigem que também o solo seja manejado diferentemente do solo sob clima temperado.

O solo tropical é muito pobre em minerais em comparação ao solo de clima temperado. Em contrapartida, o solo tropical é muito mais profundo e rico em vida, e apresenta quantidade e diversidade muito maiores de microrganismos.

Tabela 10. Características físicas e químicas relativas de solos cultivados sob condições tropicais e condições temperadas. Adaptado de Primavesi (2006).

Solo TROPICAL	Solo TEMPERADO
Mais profundo	Mais raso
Mais intemperizado	Menos intemperizado
Predomina argila caulinita	Predomina argila montmorilonita e smectita
Complexo de troca – 10 a 70 mmol _c /dm ³	Complexo de troca – 500 a 2200 mmol _c /dm ³
Agregação por Al ³⁺ e Fe ³⁺ oxidados	Agregação por Ca ²⁺
Riqueza mineral baixa	Riqueza mineral elevada
Correção do solo - pH 5,6 – 5,8 e saturação da CTC de 25 a 40%	Correção do solo - pH 6,8 – 7,0 e saturação da CTC até 80%
Baixa capacidade de troca de cátions (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺)	Elevada capacidade de troca de cátions (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺)
Mais pobre em sílica e mais rico em Fe e Al (óxidos)	Mais rico em sílica e menos em Fe e Al
Pouca fixação de K e NH ₄	Elevada capacidade de fixar K e NH ₄
Grande capacidade de imobilizar P	Baixa capacidade de imobilizar P
Maior capacidade de trocar ânions SO ₄ ²⁻ PO ₄ ²⁻ NO ₃ ⁻ Cl ⁻	Menor capacidade de trocar ânions SO ₄ ²⁻ PO ₄ ²⁻ NO ₃ ⁻ Cl ⁻
Mais ácido	Menos ácido
Friável	Pegajoso
Possui estrutura mais grumosa em estado nativo	Possui estrutura menos grumosa

Continua...

Tabela 10. Continuação.

Solo TROPICAL	Solo TEMPERADO
Decompõe rapidamente a M.O. e raramente acumula húmus	Decompõe a M.O. lentamente, podendo acumular húmus e humina
Possui microvida ativa, necessita de “limitação” – cultivo mínimo	Possui microvida pouco ativa, necessita de “mobilização” profunda
15 – 20 milhões g ⁻¹ microrganismos ativos até 15,0 cm de solo	2 milhões g ⁻¹ microrganismos ativos até 25,0 cm de solo
Sofre facilmente erosão por causa de chuvas torrenciais	Raramente ocorre erosão, devido a chuvas fracas
Sofre facilmente aquecimento, necessitando proteção da insolação	Muito frio, necessitando ser aquecido por insolação direta
Temperatura ótima 25°C	Temperatura ótima 12°C
Solo deve ficar protegido do calor e do impacto da chuva	Solo deve ser limpo para captar calor
Evaporação da água somente pela vegetação	Evaporação especialmente pelo aquecimento direto do solo
Baixa capacidade de retenção de água	Alta capacidade de retenção de água

A eficiente e elevada reciclagem de folhas e galhos gerada pela biomassa vegetal nutre a vida do solo, a qual o agrega, permitindo a entrada de ar, água e a expansão das raízes que, em solos sob condições ótimas de pluviosidade – como ocorre no bioma Amazônia –, proporcionam o surgimento de uma vegetação florestal exuberante e de enorme produtividade, talvez a maior por área terrestre do mundo.

Em algumas regiões com pluviosidade em torno de 2.300 mm anuais, como no estado do Amapá, ocorrem árvores com tamanho superior a 70 m – em 2019 foi encontrado um exemplar da espécie *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho) de quase 90 m. Com manejo adequado, usando uma tecnologia acertada para os solos em climas tropicais e que beneficie a biodiversidade, as áreas agricultáveis podem apresentar produção semelhante à de florestas nativas primárias e os solos não entrarão em decadência, mas se recuperarão.

O solo tropical é um ecossistema diferente. Por natureza, apresenta agregação muito boa, graças à riqueza de sesquióxidos de ferro e alumínio e à presença de matéria orgânica. Quando é cultivado e perde a matéria orgânica, este solo tem seus valores de CTC igualmente reduzidos. A

aplicação de calcário desobstrui e gera novas cargas, que são ocupadas por Ca e Mg e outros nutrientes adicionados pela fertilização mineral. No entanto, o uso agrícola prolongado, com revolvimento e exposição do solo a chuva e luz solar, cria condições favoráveis à degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, à destruição da bioestrutura¹³, reduzindo drasticamente o potencial produtivo do solo.

A manutenção da fertilidade do solo sob condições tropicais deve priorizar a conservação da bioestrutura, pois esses solos apresentam mais agregados (em razão da riqueza em sesquióxidos), são mais granulados e mais profundos que os solos temperados. Esta última característica pode compensar a baixa capacidade de reabastecimento da solução do solo tropical com nutrientes. Seu complexo de troca é reduzido e baseado em argila caulínítica 1:1, com baixa capacidade de troca, e o solo sob condições temperadas apresenta argilas montmoriloníticas 2:1¹⁴, com capacidade de troca mais elevada.

Dessa forma, as técnicas de cultivo a serem empregadas em solos sob condições tropicais devem ser diferentes das empregadas em solos sob condições temperadas. Na agricultura praticada em condições tropicais, a adoção de sistemas conservacionistas tem demonstrado potencial para reverter o processo de degradação química, física e biológica dos solos ácidos tropicais. O plantio direto¹⁵, por exemplo, é uma técnica completa que pretende conservar a estrutura grumosa do solo em sua superfície. A principal consequência da adoção do sistema de plantio direto em relação ao convencional é o aumento do teor de matéria orgânica do solo (devido ao ambiente menos oxidativo e ao menor contato dos resíduos vegetais com o solo), o não revolvimento e a proteção da superfície do solo contra o impacto das chuvas e a insolação.

¹³ Bioestrutura: sistema de grumos e poros produzidos pela microvida em presença de matéria orgânica e água.

¹⁴ Argila 2:1: argila de três camadas. Sua estrutura é em lâminas compostas de duas camadas de tetraedros de silício e uma central de octaedro de alumínio. Exemplos são a montmorilonita, illita e vermiculita. Têm carga superficial elevada e fixa (não dependente de pH). São comuns em solos pouco intemperizados.

¹⁵ Plantio direto: compreende um conjunto de técnicas integradas que visa melhorar as condições ambientais (água - solo - clima) para explorar da melhor forma possível o potencial genético de produção das culturas. Respeitando-se três requisitos mínimos - não revolvimento do solo, rotação de culturas e uso de culturas de cobertura para formação de palhada, associada ao manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas.

A adoção do sistema plantio direto (SPD) pelos produtores brasileiros, a partir da década de 1970, é considerada um marco no que se refere à conservação e à preservação dos solos no País, que enfrentava sérios problemas de perda de solo por erosão. Essa adoção vem crescendo exponencialmente e atualmente ocupa aproximadamente 35 milhões de hectares em todas as regiões brasileiras. Os EUA também já cultivam 35 milhões de hectares em SPD, a Argentina, 27 milhões de hectares, a Austrália, 17 milhões de hectares, e o Canadá, 16 milhões de hectares. Em todo o mundo, há mais de 100 milhões de hectares cultivados usando o SPD.

O plantio direto diminui o risco da produção agrícola ao aumentar a eficiência do uso da água, principalmente durante ocasiões de veranico, facilitando a infiltração da água da chuva e dificultando a evaporação pela formação da cobertura vegetal morta no solo. Além disso, a manutenção da palha na superfície do solo, somada à ausência de revolvimento do solo, ajudam a reduzir a emissão de CO₂ para a atmosfera, elevam parcialmente o teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, sequestram carbono no solo. O SPD foi o sistema que mais aumentou o estoque de carbono em relação ao solo sob vegetação nativa do Cerrado (Tabela 11).

Outra importante característica do plantio direto é o menor uso de maquinário agrícola. No sistema convencional, o uso inadequado ou excessivo de implementos pulveriza e desestabiliza os agregados do solo, resultando em aumento da macroporosidade temporária na camada mobilizada e em compactação ou adensamento do solo imediatamente abaixo dessa camada, devido ao excesso de tráfego de máquinas e equipamentos, o que diminui o crescimento radicular e a condutividade hidráulica nessa camada, aumentando os riscos de erosão.

A macroporosidade temporária proporcionada pelo preparo convencional do solo é rapidamente perdida, pela acomodação das partículas de solo desagregadas em virtude das chuvas, diminuindo conseqüentemente as trocas gasosas (oxigênio) e o crescimento das raízes das plantas.

Outra técnica incorporada e difundida na agricultura tropical brasileira é o cultivo mínimo. Essa técnica consiste em um preparo mínimo do solo e é empregada principalmente em culturas que permanecem no mesmo local por vários anos sem que haja movimentação do solo, tais como cultivos

Tabela 11. Estoques de carbono (C), taxas de acúmulo e perdas na camada de 1,0 m de profundidade no solo sob Cerrado e sob outros usos e manejo da terra. Adaptado de Carvalho et al., (2010).

Sistema de uso	Estoque de C no solo (Mg*/ha)	Variação em relação ao cerrado nativo		
		Estoque de C no solo (Mg/ha)	Tempo (Anos)	Taxa de acúmulo ou perda (Mg/ha/ano)
Cerrado	133	–	–	–
Eucalipto	148	+15	12	+1,25
Pastagem cultivada	150	+17	18	+0,94
Grade pesada	125	-8	12	-0,67
Arado de disco	128	-5	15	-0,33
Plantio direto	155	+22	15	+1,47

*Mg (megagramas) (1 Mg = 10⁶ g) = 1 tonelada.

semiperenes, de cana-de-açúcar, ou cultivos perenes, como citros e café, ou, ainda, reflorestamentos, como plantios de eucalipto.

Situado entre o sistema de cultivo convencional e o sistema plantio direto, no cultivo mínimo o uso de máquinas agrícolas sobre o solo é mínimo, com menor revolvimento, desagregação e compactação do solo, proporcionando melhor conservação do mesmo.

Os efeitos nocivos da desagregação e compactação geram redução da macroporosidade e da condutividade hidráulica do solo, aumento da densidade do solo e da resistência à penetração; além de redução dos lucros devido aos gastos com combustível e manutenção de máquinas e implementos agrícolas.

O cultivo mínimo é uma prática que visa diminuir ao máximo o número de gradagens, arações, ou escarificações que mobilizam e pulverizam o solo e substituir esses implementos de preparo periódico do solo por outros mais conservadores da estrutura, com revolvimento nulo ou mínimo do solo.

Alguns desses implementos mais conservadores da integridade do solo são: o subsolador, que faz a subsolagem antes do plantio e promove a ruptura de camadas compactadas, facilitando a penetração das raízes das

culturas, além de facilitar a infiltração da água para camadas mais profundas do solo; as roçadeiras, que cortam, picam e pulverizam a massa vegetativa existentes nas entrelinhas das culturas, fazendo com que a biomassa morta promova o aporte de matéria orgânica e aumente a umidade da superfície do solo; equipamentos que promovem a aplicação de adubos e corretivos do solo a lança na superfície, sem revolver o solo; além de outros menos convencionais, como o rolo-faca, que pica a biomassa vegetal sobre o solo.

O uso de sistemas de integração que incorporam atividades de produção agrícola, pecuária e florestal, em dimensão espacial e/ou temporal, buscando efeitos sinérgicos entre esses componentes, é outra forma de produção sustentável tropical de destaque nos últimos anos.

Os sistemas de integração vêm apresentando expansão, especialmente para produção de grãos, madeira e bovinos de corte e leite, e são conhecidos por sistemas de integração lavoura–pecuária–floresta (ILPF). A utilização desses sistemas, quando é possível a sua adoção, passa a ser de grande importância para a recuperação de áreas degradadas, tanto de pastagens como de lavouras. As integrações podem variar e envolver apenas integração lavoura–pecuária (ILP), integração pecuária–floresta (IPF) ou integração lavoura–floresta (ILF).

Esses sistemas garantem diversificação e a manutenção do solo sempre vegetado, proporcionando controle da erosão e aumento da produtividade, além de reduzir a pressão pela abertura de novas áreas naturais. A introdução dos sistemas de ILPF agrega maior eficiência no uso da terra e gera outros benefícios ao solo e ao ambiente, tais como:

- Maior controle da erosão, devido ao aumento da cobertura do solo pela palhada proporcionada pelos restos das lavouras e das pastagens rotacionadas.
- Melhoria de condições microclimáticas, pela contribuição do componente arbóreo: redução da amplitude térmica, aumento da umidade relativa do ar, diminuição da intensidade dos ventos e melhoria do bem-estar animal, em decorrência do maior conforto térmico.
- Aumento da matéria orgânica do solo por meio de serapilheira e raízes mortas das árvores, forrageiras e culturas, o que estimula o desenvolvimento e a biodiversidade da biota do solo, melhora a

fertilidade do solo, aumenta a porosidade do solo e, conseqüentemente, a infiltração de água.

- Recuperação de nutrientes lixiviados ou drenados para camadas mais profundas do solo, especialmente por meio das raízes de árvores e forrageiras.
- Mitigação do efeito estufa, pelo sequestro de carbono, especialmente pelo componente florestal.
- Diversificação do sistema de produção e, conseqüentemente, redução dos custos de produção, bem como diminuição do risco inerente à agropecuária, especialmente por variações climáticas e oscilações de mercado.

Além dos benefícios para o solo e meio ambiente, os sistemas de integração com a participação do componente arbóreo são capazes de agregar valor à carne, pois nesse sistema de integração, o metano (CH_4) emitido pelo rebanho pode ser neutralizado pelo acúmulo de carbono (absorvido na forma de CO_2) na biomassa do componente arbóreo.

Em 2020 a Embrapa desenvolveu e lançou no mercado o conceito “Carne Carbono Neutro” (CCN), que é representado por um selo alusivo à produção de bovinos de corte sob sistemas de integração. O principal objetivo do selo CCN é atestar que os bovinos que deram origem à carne tiveram suas emissões de metano entérico compensadas pelo crescimento das árvores no sistema durante o processo de produção. Além disso, objetiva garantir, pela sombra promovida pelo componente arbóreo, que os animais se desenvolvam em ambiente termicamente confortável, com mais elevado grau de bem-estar. Estima-se que já existam quase 15 milhões de hectares de área cultivada com algum tipo de sistemas de integração no Brasil.

Fertilidade do solo e o uso de geotecnologias

A investigação da variabilidade espacial dos cultivos é feita, em sua maioria, a partir de amostragens, geralmente manuais e laboriosas, que acabam inviabilizando o adequado retorno das práticas. Atualmente vêm sendo desenvolvidas tecnologias que buscam obter índices de vegetação coletados por sensores remotos e relacioná-los com atributos químicos e

físicos do solo e parâmetros biofísicos das plantas. A partir de mapas de produtividade e atributos do solo, são inferidos os fatores de produção que estão limitando a produtividade espacialmente. Com essas informações em mãos é possível manejar locais específicos (zonas de manejo) de acordo com suas características (topografia, compactação do solo, condutividade elétrica, disponibilidade de água, fertilidade, etc.) e potencialmente obter ganhos de lucratividade e redução do impacto ambiental por meio de aplicações mais específicas de fertilizantes e pesticidas, irrigação e plantio, conforme o potencial produtivo de cada região.

Referências

- BERGMANN, W. **Plant diagnosis and plant analysis**. Jena: VEB Fischer, 1973.
- CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELO, C. R. de CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010.
- FAO. **The future of food and agriculture: trends and challenges**. FAO, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>. Acesso: 07 maio 2020.
- LARCHER, W. **Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups**. 4. ed. New York: Springer, 2004. 513 p.
- LIEBIG, J. von. **The natural laws of husbandry**. New York: Arno Press, 1972. 387 p. Reimpresso da edição de 1863.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201 p.
- MELLO, F. de A.; BRASIL SOBRINHO, M. de O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; COBRA NETO, A.; KIEHL, J. de C. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1983. 400 p.
- OSAKI, F. **Calagem e adubação**. Campinas: Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola, 1991. 503 p.
- POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE (Atlanta, Ga.). **International Soil Fertility Manual**. Atlanta, GA: Potash & Phosphate Institute, 1995.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 18. ed. São Paulo: Nobel, 2006. 549 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 274 p.

Embrapa

Territorial

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

CGPE