



Tópicos em manejo e fertilidade do solo com ênfase no Meio-Norte do Brasil

Editores técnicos
Luiz Fernando Carvalho Leite
Francisco das Chagas Oliveira

Embrapa

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Tópicos em manejo e fertilidade do solo com ênfase no Meio-Norte do Brasil

Editores Técnicos
*Luiz Fernando Carvalho Leite
Francisco das Chagas Oliveira
Ademir Sérgio Ferreira Araújo*

Embrapa Meio-Norte
Teresina, PI
2006

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Meio-Norte

Av. Duque de Caxias, 5.650, Bairro Buenos Aires

Caixa Postal: 01

CEP: 64006-220 Teresina, PI

Fone: (86) 3225-1141

Fax: (86) 3225-1142

Home page: www.cpamn.embrapa.br

E-mail: sac@cpamn.embrapa.br

Supervisor editorial: Lígia Maria Rolim Bandeira

Revisor de texto: Francisco de Assis David da Silva/Lígia Maria Rolim Bandeira

Normalização bibliográfica: Orlane da Silva Maia

Editoração eletrônica: Erlândio Santos de Resende

1ª edição

1ª impressão (2006): 500 exemplares

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 Meio-Norte

Tópicos em manejo e fertilidade do solo com ênfase no Meio-Norte do Brasil / editores-técnicos, Luiz Fernando Carvalho Leite, Francisco das Chagas Oliveira, Ademir Sérgio Ferreira Araújo. - 1. ed. - Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2006.

218 p. : il. ; 23 cm.

ISBN 85-88388-11-1

1. Manejo do solo. 2. Fertilidade do solo. I. Leite, Luiz Fernando Carvalho. II. Oliveira, Francisco das Chagas. III. Araújo, Ademir Sérgio Ferreira. IV. Embrapa Meio-Norte.

CDD 631.422 (21. ed.)

© Embrapa 2006

Autores

Ademir Sérgio Araújo

Engenheiro Agrônomo, D.Sc. em Agronomia
Universidade Federal do Piauí – UFPI
Centro de Ciências Agrárias
asfaruaj@yahoo.com.br

Eulália Maria Sousa Carvalho

Engenheira Agrônoma, M.Sc. em Microbiologia Agrícola
Universidade Federal do Piauí – UFPI
Campus “Ministro Petrônio Portela”, Teresina, PI
eulaliac@bol.com.br

Francisco das Chagas Oliveira

Engenheiro Agrônomo, M.Sc. em Fitotecnia
Embrapa Meio-Norte
Caixa Postal 01, CEP: 64006-220, Teresina, PI
oliveira@cpamn.embrapa.br

Francisco de Brito Melo

Engenheiro Agrônomo, M.Sc. em Solos e Nutrição de Plantas
Embrapa Meio-Norte
Caixa Postal 01, CEP 64006-220, Teresina, PI
brito@cpamn.embrapa.br

José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior

Engenheiro Agrônomo, D.Sc. em Fitotecnia
Embrapa Meio-Norte
Caixa Postal 01, CEP 64006-220, Teresina, PI
oscar@cpamn.embrapa.br

Jussara Silva Dantas

Engenheira Agrônoma, M.Sc. em Manejo e Conservação do Solo e Água
Bolsista/Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 01, CEP 64006-220, Teresina, PI
jussara@cpamn.embrapa.br

Luiz Fernando Carvalho Leite

Engenheiro Agrônomo, D.Sc. em Solos e Nutrição de Plantas
Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 01, CEP 64006-220, Teresina, PI
luizf@cpamn.embrapa.br

Milton José Cardoso

Engenheiro Agrônomo, D.Sc. em Fitotecnia
Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 01, CEP 64006-220, Teresina, PI
milton@cpamn.embrapa.br

Regina Teresa Rosim Monteiro

Bióloga, Ph.D. em Microbiologia e Bioquímica
Universidade São Paulo – USP
CEP: 13400-970 - Piracicaba, SP
monteiro@cena.usp.br

Rosa Maria Cardoso Mota de Alcantara

Engenheira Agrônoma, M.Sc. em Solos e Nutrição de Plantas
Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 01, CEP 64006-220, Teresina, PI
rmaria@cpamn.embrapa.br

Apresentação

A região Meio-Norte, compreendida pelos estados do Piauí e Maranhão, possui grande diversidade de recursos naturais, em razão da sua localização geográfica na confluência entre a Caatinga, a Floresta Amazônica e os Cerrados. São quatro tipos climáticos no estado e várias formações vegetais constituídas por, Florestas, Cerrados, Caatingas, Floresta Ciliar de Carnaúba, Manguezal, Restinga, Dunas, Campos de Vázea, Complexo Campo Maior e Formação Rupestres. O solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo, e os recursos hídricos são compostos por água superficiais e subsuperficiais em abundância.

Com todas essas potencialidades e a partir de uma compreensão holística dos agroecossistemas, que seja capaz de atender, de maneira integrada, o uso de recursos renováveis localmente acessíveis, torna-se de fundamental importância o conhecimento acerca do manejo adequado do solo e das culturas, que são considerados essenciais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas da região Meio-Norte.

Este livro, lançado pela Embrapa Meio-Norte, é a primeira contribuição para o aumento do conhecimento do manejo e da fertilidade do solo com enfoque no Meio-Norte brasileiro. São informações acumuladas por vários pesquisadores e agora disponibilizadas para técnicos e produtores da região e que certamente serão fundamentais para o manejo sustentável do solo.

Valdemício Ferreira de Sousa
Chefe-Geral da Embrapa Meio-Norte

Prefácio

Este livro resultou da junção de conhecimentos acumulados, por vários especialistas, sobre o tema “Manejo Sustentável do Solo” e está associado a uma grande preocupação com o avanço do processo de degradação ambiental que ocorre na região Meio-Norte do Brasil, especialmente em áreas de Cerrados.

Esta publicação está estruturada em seis capítulos seqüenciados de forma a facilitar o entendimento do manejo do solo. No primeiro capítulo, **“Características físicas e morfológicas e classes de solos de ocorrência nos Cerrados do Meio-Norte e suas potencialidades agrícolas”** o autor Francisco de Brito Melo relaciona as classes de solos brasileiras com especial referência àquelas presentes no Meio-Norte, com seus potenciais e limitações.

No segundo capítulo, **“Fertilidade e adubação em solos do Meio-Norte do Brasil”**, os autores Rosa Maria Mota e Milton José Cardoso enfocam conceitos fundamentais de fertilidade dos solos e apresentam resultados de pesquisa com adubação e calagem para as diversas espécies cultivadas nas áreas de cerrados do Meio-Norte.

No terceiro capítulo, **“Manejo da matéria orgânica em solos dos Cerrados do Meio-Norte do Brasil”**, o autor Luiz Fernando Leite aborda um tema extremamente atual e importante, como o seqüestro de carbono, e apresenta resultados de pesquisa com matéria orgânica em sistemas de manejo convencionais ou conservacionistas utilizados em áreas de cerrados do Piauí e do Maranhão.

No quarto e quinto capítulos, **“Processos microbiológicos e bioquímicos em sistema plantio direto”** e **“Fixação biológica do nitrogênio nas culturas da soja e do feijão-caupi”**, dos autores Ademir Araújo, Jussara Dantas, Regina Teresa Rosim Monteiro, Luiz Fernando Carvalho Leite, Eulália Maria Sousa Carvalho e Rosa Maria Mota de Alcântara, são abordados temas relativamente pouco pesquisados como a dinâmica de microrganismos no solo, especialmente para sistema de plantio direto e o processo de fixação biológica do N para culturas de importância econômica para o Meio-Norte, como a soja e o feijão-caupi.

No sexto capítulo, **“Manejo sustentável do solo em agroecossistemas de base ecológica na região Meio-Norte do Brasil”**, os autores Francisco das Chagas Oliveira, Luiz Fernando Carvalho Leite e José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior enfocam as principais práticas agrícolas utilizadas, por produtores familiares, em agroecossistemas na região Meio-Norte e seus efeitos sobre a qualidade do solo.

A nossa expectativa é que este livro possa ser uma importante ferramenta para otimizar os conhecimentos de estudantes, técnicos e pesquisadores acerca do manejo adequado do solo e que isso seja fundamental para o crescimento sustentável da produção agrícola na região Meio-Norte do Brasil.

Editores

*Luiz Fernando Carvalho Leite
Francisco das Chagas Oliveira
Ademir Sérgio Ferreira de Araújo*

Sumário

Capítulo I

Características físicas e morfológicas e classes de solos de ocorrência nos Cerrados do Meio-Norte e suas potencialidades agrícolas	17
A composição geral do solo	19
Propriedades física e morfológica do solo	21
A textura do solo	21
Algumas características das frações, areia, argila e silte	22
A classificação textural	23
Preparação da amostra	24
Separação das frações	25
Estrutura do solo	27
Tipos de estrutura	28
Consistência do solo	30
Porosidade	31
Métodos de determinação	32
Densidade do solo	33
Densidade de partículas	34
Horizontes diagnósticos	35
Classes de solos do Brasil (Embrapa, 2006)	47
Argissolos	47
Cambissolos	48
Chernossolos	49
Espodossolos	49
Gleissolos	50
Latosolos	51
Luvissolos	51
Neossolos	52
Nitossolos	53

Organossolos	53
Planossolos	54
Plintossolos	55
Vertissolos	55
Classes de solos da região Meio-Norte do Brasil	
e suas potencialidades agrícolas	56
Latossolos	56
Argissolos Vermelho-Amarelos	57
Plintossolos	57
Neossolos litólicos	58
Neossolos quartzarênicos	58
Referências	59
Anexo	63

Capítulo II

Fertilidade e adubação em solos do Meio-Norte do Brasil

65

Amostragem do solo, unidades utilizadas em análises químicas e transformações	67
Amostragem do solo	67
<i>Equipamentos utilizados na amostragem</i>	67
<i>Época de amostragem</i>	68
<i>Frequência da amostragem</i>	68
<i>Amostragem em sistema de plantio direto</i>	69
Unidades utilizadas em análises químicas e transformações	71
<i>Unidades utilizadas em análises</i>	71
Transformação de unidades	72
Acidez e salinidade de solos	72
Acidez	72
<i>Origem da acidez dos solos</i>	73
<i>Componentes da acidez dos solos</i>	74
<i>Reação no solo</i>	75
<i>Conceitos básicos sobre CTC</i>	76
Salinidade	79
<i>Razões de salinização</i>	80
<i>Processo de salinização</i>	80

Dinâmica e disponibilidade de nutrientes	81
Nitrogênio	81
<i>Ciclo e formas do nitrogênio no solo</i>	81
<i>Transformação do nitrogênio no solo</i>	82
Fósforo	83
<i>Formas e dinâmica do fósforo no solo</i>	83
Potássio	85
<i>Formas e dinâmica do potássio no solo</i>	86
Cálcio	88
<i>Formas e dinâmica do cálcio no solo</i>	88
Magnésio	90
<i>Formas e dinâmica do magnésio no solo</i>	90
Enxofre	91
<i>Formas e dinâmica do enxofre no solo</i>	92
Micronutrientes no solo	93
<i>Formas e dinâmica dos micronutrientes no solo</i>	93
Correção e adubação do solo	96
Calagem	96
Corretivos de acidez do solo	97
Métodos utilizados para a determinação da necessidade de calcário	98
Gessagem	99
Adubação mineral	99
Referências	105

Capítulo III

Manejo da matéria orgânica em solos dos Cerrados do Meio-Norte do Brasil	109
Conceitos e funções da matéria orgânica do solo	111
Compartimentos da matéria orgânica do solo	113
Fatores que regulam a dinâmica da matéria orgânica no solo ..	118
A modificação do ambiente solo	120
Manipulação da quantidade e qualidade dos aportes orgânicos	133
Manipulação da fauna do solo	136
Considerações finais	137
Referências	137

Capítulo IV

Processos microbiológicos e bioquímicos em sistema de plantio direto	141
Introdução	143
O sistema plantio direto	144
Processos microbiológicos e bioquímicos no sistema plantio direto	145
Decomposição do carbono	146
Atividade da biomassa microbiana do solo	149
Produção e secreção de enzimas no solo	151
Ciclagem de nutrientes	152
Fixação biológica do nitrogênio (FBN)	156
Degradação de pesticidas	158
Micorrizas	160
Considerações finais	161
Referências	162

Capítulo V

Fixação biológica do nitrogênio nas culturas da soja e do feijão-caupi	165
Fixação biológica do nitrogênio	167
Processo de formação dos nódulos	169
Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja	172
Seleção de estirpes de <i>Bradyrhizolmium</i> e genótipos mais eficientes na FBN na região dos Cerrados	173
Ontogenia da nodulação e fixação biológica do N_2 na cultura da soja	175
Fixação biológica do nitrogênio na cultura do feijão-caupi	
Seleção de estirpes e genótipos mais eficientes na FBN do feijão-caupi	177
Ontogenia da nodulação e fixação biológica do N_2 na cultura do feijão-caupi	179

Fatores que afetam a fixação biológica do nitrogênio	179
Temperatura e umidade	179
Acidez do solo	180
Disponibilidade de nutrientes no solo	181
Adição de resíduos urbanos e industriais no solo	183
Aplicação de pesticidas	184
Associação com micorrizas	186
Inoculação de leguminosas	187
Aquisição e utilização do inoculante	188
Considerações finais	189
Referências	189

Capítulo VI

Manejo sustentável do solo em agroecossistemas de base ecológica na região Meio-Norte do Brasil	195
Introdução	197
Agricultura familiar e uso do solo na região Meio-Norte ...	198
Sistemas de produção sustentáveis para a agricultura familiar	200
Consórcios em sistemas de produção	200
Sistemas de produção vegetal e animal integrados	203
<i>Avaliação do manejo da fertilidade</i>	<i>205</i>
Sistemas agroflorestais (SAF)	208
<i>Manejo da fertilidade do solo</i>	<i>210</i>
Plantio direto na palha da carnaúba	215
Considerações finais	217
Referências	217

Capítulo I

Características físicas e morfológicas e classes de solos de ocorrência nos Cerrados do Meio-Norte e suas potencialidades agrícolas

Francisco de Brito Melo

A composição geral do solo

O solo é constituído de um sistema composto de três fases: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é formada pela matéria inorgânica e matéria orgânica. Esses dois componentes formam a matriz do solo. A parte mineral ou inorgânica é constituída de partículas unitárias, de tamanhos extremamente variáveis resultantes da decomposição das rochas que deram origem ao solo (intemperismo). Essas partículas se compõem de fragmentos de rochas e de minerais primários, geralmente de tamanhos maiores, e de minerais secundários com menores dimensões. Os minerais primários são derivados das rochas por simples fragmentação; quartzo, apatita, zirconita e mica muscovita são exemplos de minerais primários resistentes à decomposição, enquanto os calcários, biotita, plagioclásios e piroxênios mostram-se pouco resistentes; os minerais secundários que são sintetizados no próprio local, como a caulinita, montmorilonita e concreções ferruginosas, são produtos da intemperização de outros minerais. Os minerais primários e os agregados ou concreções maiores do que 0,02 mm podem ser considerados como sendo a reserva mineral em potencial dos solos, uma vez que podem ceder lenta ou rapidamente, pelo efeito da intemperização, elementos químicos considerados nutrientes às plantas. Os minerais que compõem a fração argila, de dimensões inferiores a 0,002 mm, constituem reserva do solo quase em condições de pronta disponibilidade.

Os componentes orgânicos são representados pelos resíduos vegetais e animais, frescos ou nos mais variados estados de decomposição. A quantidade de aporte orgânico ao solo dependerá de diversos fatores, tais como, a composição química dos resíduos vegetais, as condições climáticas e algumas propriedades do solo (textura, pH). Na decomposição da matéria orgânica (MO) certos constituintes são volatilizados, alguns são utilizados pelos microrganismos na elaboração do protoplasma e outros são gradualmente transformados em uma substância de

coloração escura, de consistência amanteigada, tendo propriedades químicas e físico-químicas características (húmus). O componente líquido do solo é constituído pela solução do solo ou água do solo.

O solo é a principal fonte de água para as plantas, recebendo das chuvas e excepcionalmente da irrigação. Porém, nem toda água que chega ao solo é armazenada e se torna disponível às plantas. Parte dessa água das chuvas percola pelo perfil, alcançando as camadas mais profundas, tornando-se inacessível às raízes das plantas. A que permanece na superfície, nas camadas superiores, pode perder-se para a atmosfera por evaporação ou transpiração. A água do solo contém sais solúveis em dissolução, daí receber também a denominação de solução do solo. Os íons normalmente encontrados na solução são H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al^{+3} , SO_4^{-2} , PO_4^{-2} e NO_3^- . Existe uma grande interação entre os solutos da solução do solo e a fração sólida do solo. São fenômenos físico-químicos de superfície, que ocorrem na interface líquido-sólido. A fração sólida é o reservatório natural da maioria dos solutos. Por processos físico-químicos, elementos podem passar da fração sólida para a solução do solo e vice-versa. Esses processos dependem de produtos de solubilidade, temperatura, substância considerada, pH e umidade do solo. A água, pelo fato de sua molécula ser assimétrica, apresenta-se como dipolo elétrico e também interage com as partículas sólidas do solo e com os próprios solutos. Da mesma forma, ela é adsorvida pelas superfícies sólidas e hidrata íons e moléculas. Além desses fenômenos, a água sofre ainda a influência de fenômenos de capilaridade, tensão superficial e ângulo de contato por encontrar-se em meio poroso com poros de dimensões capilares.

A fase gasosa do solo é constituída de ar com composição alterada em relação à composição do ar da atmosfera que é praticamente constante. Essa diferença é em razão da ação biológica que ocorre no solo e, como o movimento de ar através dos poros é lento, não há tempo de equilíbrio com o ar da atmosfera. A composição do ar varia de situação para situação em diferentes

solos e varia bastante com a profundidade. Geralmente, o ar do solo contém teores menores de O_2 e maiores de CO_2 em relação à atmosfera. Isso ocorre em virtude da atividade biológica dos sistemas radiculares das plantas e dos microrganismos. Alterações também são encontradas em relação aos gases que contêm nitrogênio como NH_3 , N_2O , e N_2 , que podem ser produtos de atividades biológicas.

A seguir, apresentam-se as propriedades físicas e morfológicas do solo, importantes no auxílio da determinação, não só da capacidade de suprimentos de nutrientes dos sólidos do solo, como também do fornecimento de água e ar, tão essenciais à vida vegetal.

Propriedades físicas e morfológicas do solo

A textura do solo

A parte sólida do solo é constituída por material inorgânico e orgânico, geralmente intimamente ligados. Em certos solos, o material inorgânico sólido é constituído por partículas grosseiras, dando-lhes o aspecto cascalhento ou arenoso; em outros, predominam as partículas minerais coloidais dando ao solo características argilosas. A argila, a MO, o calcário e os sesquióxidos de ferro e alumínio funcionam como agentes cimentantes, agregando as demais partículas.

A textura do solo é estudada pela análise granulométrica, a qual permite classificar os componentes sólidos em classes de acordo com seus diâmetros. Para uma mesma classe, há um limite superior e um inferior conforme a escala adotada. As partículas de uma mesma classe de diâmetro apresentam estrutura e composição química diferentes, variando em tamanho e forma, podendo ser cristalinas ou amorfas. As partículas do solo são: areia, silte e argila. Assim, a textura do solo pode ser definida como sendo a proporção relativa dos diferentes grupos de partículas primárias nele existentes.

Apesar de a classificação dos grupos de partículas ser arbitrária, ela segue determinados princípios básicos especialmente quanto à capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica, movimento capilar, mineralogia e propriedades químicas, como a CTC. Com base nisso, estabeleceu-se o limite principal de separação de partículas como sendo 0,002 mm. Esse ponto separa aparentemente física e quimicamente o material de maior atividade (argila) do material grosseiro, considerado inerte. Existe uma grande correlação entre quantidade de partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm e CTC, a água não disponível e a superfície específica, respeitadas as variações na mineralogia e MO.

Algumas características das frações areia, argila e silte

A fração areia, diferentemente da fração argila, não possui plasticidade. Apresenta reduzida capacidade de retenção de água e, por causa do grande espaçamento entre as partículas granulométricas, é rápida a passagem de ar e água, o que facilita a drenagem de ar e água. A área externa é a característica mais influenciada pelo pequeno tamanho e pela fina subdivisão do silte e especialmente da argila. Um grão de argila coloidal fina possui cerca de dez mil vezes mais área externa do que um grão de areia. A superfície específica (área por unidade de peso) da área coloidal varia entre 10 e 100 g m². Para as menores partículas de silte e areia fina, esses dados são de 1 e 0,1 g m². Uma vez que as adsorções de água, nutrientes e gases, assim como a atração de partículas entre si, constituem fenômenos de área, é evidente a importância da superfície específica elevada. Em geral, as partículas de argila têm a forma de placa e, quando expostas à umidade, apresentam grande plasticidade. Quando molhada, a argila tende a ficar viscosa e presta-se a moldagem. As partículas de silte possuem alguma plasticidade, coesão e adsorção, porém, em grau menor do que a argila. A presença de silte e argila em solo lhe assegura textura fina e movimentação lenta de ar e água. Tal solo é altamente plástico, tornando-se viscoso quando molhado em demasia e duro

quando seco. São normalmente elevados os coeficientes de expansão por umedecimento e de contração por secagem dos solos siltosos e argilosos em razão da elevada capacidade de retenção de água.

A classificação textural

Os resultados da análise textural são geralmente utilizados na classificação textural do solo, uma vez que os solos são formados por diferentes combinações das frações areia, silte e argila. Essas diferentes combinações são agrupadas e denominadas classes texturais, seguindo, em geral, um diagrama triangular. No Brasil, utiliza-se normalmente a classificação do USDA, adaptada pela SBCS, que utiliza o triângulo equilátero a partir das frações areia (2-0,05 mm), silte (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002) (Fig. 1), distribuídos os solos em 13 classes texturais, em vez das 12 classes propostas pelo USDA.

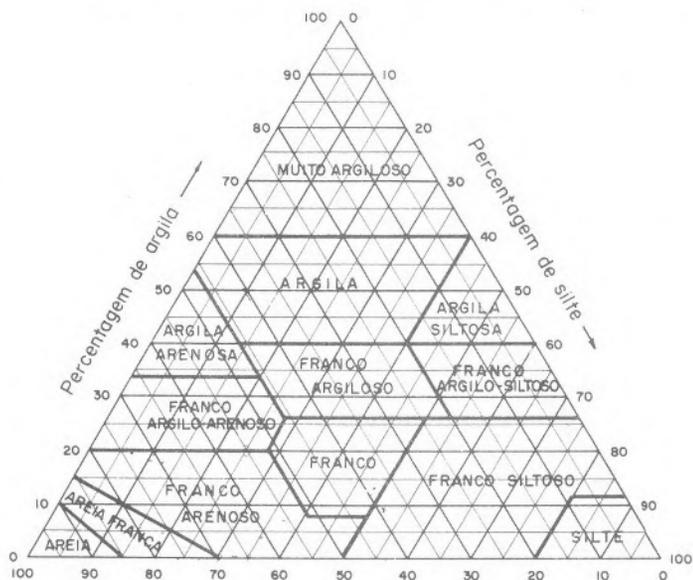


Fig. 1. Triângulo de definição das classes de textura.

Preparação da amostra

Para o conhecimento da textura do solo, com a determinação quantitativa das frações areia, silte e argila, a amostra de solo deve ser preparada de forma que o resultado seja correto. Essa preparação envolve, principalmente as fases de pré-tratamento e de dispersão da amostra de solo em uma suspensão aquosa.

Pré-tratamento: tem por objetivo principal facilitar a quebra de pequenos agregados do solo, permitindo a individualização das partículas primárias de areia, silte e argila. Muitos solos apresentam esses agregados estabilizados por agentes cimentantes principalmente a MO, óxidos de ferro e carbonatos. Essas substâncias são removidas por meio de tratamentos químicos que devem ser cuidadosos, pois podem provocar a dissolução ou destruição de alguns minerais do solo. A seguir alguns comentários acerca dessas remoções: Remoção de MO: é o primeiro tratamento promovido na amostra de solo. Deve ser feito em solos com $MO > 5\%$. A necessidade e dificuldade de eliminar a MO dependerá da finalidade do uso dos dados, da natureza e concentração da MO na amostra, do pH do solo e da presença associada de carbonatos livres, óxidos e sais solúveis; remoção de óxidos de ferro: mais utilizado em clima temperado, onde os solos apresentam baixos conteúdos desses óxidos, considerados impurezas. No Brasil, essa remoção não é necessária, uma vez que esses óxidos são amplamente distribuídos; remoção de carbonatos: feita a partir de tratamentos ácidos, como HCl 10%; remoção de sais solúveis: os sais solúveis consistem em grande parte dos cátions Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e dos ânions Cl^- e SO_4^{2-} . Em menores quantidades, aparecem o bicarbonato, o carbonato e o nitrato. Em quantidades elevadas, esses sais podem provocar floculação do solo, dificultando a análise textural. A maneira mais comum de se eliminar os sais de uma amostra de solo é por meio da sua lavagem e lixiviação. Para isso, normalmente se utiliza água destilada, com filtragem ou centrifugação. Assim, pode-se inferir que a fase de pré-tratamento não é empregada intensamente para solos brasileiros, uma vez que apresentam geralmente baixos teores de MO e carbonatos e conteúdos muito elevados de óxidos de ferro, não justificando sua eliminação.

A dispersão: os métodos usuais de análise textural requerem que a dispersão das partículas do solo em solução aquosa se dê pela combinação de tratamentos químicos e físicos. A eficiência da dispersão química depende da habilidade em criar e manter forças repulsivas atuando entre as partículas do solo. A simples eliminação dos efeitos de agentes cimentantes e a hidratação das partículas de argila não garantem uma dispersão adequada. As partículas individualizadas na suspensão aquosa podem-se aproximar novamente e flocular durante a análise textural, alterando os resultados. É importante para garantir uma dispersão máxima e a manutenção dessa dispersão, que se interfira no potencial na superfície das partículas. Ele deve ser mantido acima de determinado nível, tornando a suspensão estável. Isso é conseguido com a substituição dos íons H, Ca e Mg, fortemente adsorvidos ao complexo de troca das argilas por cátions monovalentes muito hidratados, especialmente Na ou Li. As cargas positivas das bordas dos minerais devem ser anuladas ou invertidas, evitando-se as atrações entre os minerais argilosos. Consegue-se isso com a adsorção de ânions OH⁻ ou ânions de fosfatos complexos, como o hexametáfosfato de sódio que aumenta as cargas negativas nos planos e inverte as cargas negativas nas bordas, promovendo partículas altamente carregadas negativamente que irão se repelir continuamente, mantendo a dispersão estável.

Separação das frações

A separação das frações granulométricas, individualizadas pelas dispersões química e física, pode ser efetuada por diferentes métodos: peneiramento, para separar partículas entre 2,0 e 0,05 mm de diâmetro; sedimentação gravitacional, apropriado para partículas menores do que 0,05 mm, e centrifugação, para separação de partículas menores do que 0,001. Pela importância, apenas os dois primeiros serão discutidos.

Peneiramento: a separação de partículas de amostras do solo por meio de peneiras apresenta limitações, tornando-se

adequado apenas para partículas maiores do que 0,05 mm. É importante considerar que a probabilidade de uma partícula passar através de uma peneira qualquer, em um dado tempo de agitação, irá depender da natureza das partículas e de característica da própria peneira. Uma partícula muito irregular que só passa pela malha da peneira se estiver orientada num certo sentido terá pequena probabilidade de passar pela peneira. Além disso, as aberturas das peneiras são em geral irregulares quanto ao tamanho, fazendo que o peneiramento seja longo, para que todas as partículas tenham chances de encontrar abertura maior que seu tamanho. Somente assim, a operação de peneiramento seria completa.

Sedimentação: é o método mais utilizado para se determinar a textura das partículas do solo dispersas; depende da proporção em que as partículas caem em um fluido viscoso e da medida dessa proporção. Desde que a partícula esteja em movimento, há uma força proporcional à velocidade que resiste ao movimento. Stokes analisou a resistência dessa partícula e elaborou a conhecida Lei de Stokes. A aplicação da Lei de Stokes a uma partícula que se move com velocidade uniforme (v) em um fluido de viscosidade uniforme toma para sedimentação a seguinte forma:

O método da pipeta: é um método de sedimentação que se baseia na velocidade de queda das partículas que compõem o solo. Fixa-se o tempo para o deslocamento vertical na suspensão do solo com água, após a adição de um dispersante químico. Pipeta-se um volume da suspensão para determinação da argila que seca em estufa, é pesada. As frações grosseiras (areia fina e areia grossa) são separadas por tamisação, secas em estufa e pesadas para obtenção dos respectivos percentuais. O silte corresponde ao complemento dos percentuais para 100%. É obtido por diferença.

O método do densímetro: baseia-se na sedimentação das partículas que compõem o solo. Após a adição de um dispersante químico, fixa-se um tempo único para determinação da densidade da suspensão que se admite ser a concentração total da argila. As frações grosseiras são separadas por tamisação e pesadas. O silte é obtido por diferença.

Estrutura do solo

Refere-se à agregação das partículas primárias do solo em unidades compostas ou agrupamentos de partículas primárias, que são separadas de agregados adjacentes por superfícies de fraca resistência.

Os principais fatores que influem na gênese dos agregados são: a argila, a MO e os sesquióxidos de Fe e Al, todos agentes cimentantes das partículas; os cátions adsorvidos e o manejo do solo também influem no processo de estruturação. Para haver formação de agregados, são necessárias duas condições: a primeira, que uma força mecânica qualquer provoque a aproximação das partículas do solo; esse movimento pode ser causado pelo crescimento das raízes, fenômenos de expansão e contração do solo, provocados pelo umedecimento e secagem ou pela floculação. A segunda condição é que, após o contato das partículas, haja um agente cimentante para consolidar essa união, originando agregado.

Os minerais de argila são poderosos agentes cimentantes, ligando as partículas do solo e originando agregados estáveis à ação da água. A ação cimentante da argila, associada a cátions, pode ser explicada pela teoria de Russel, segundo a qual as partículas de argila aderentes a grãos de areia formariam os agregados por se ligarem umas às outras por meio de moléculas dipolares do líquido de dispersão, sendo orientadas de acordo com suas cargas em direção aos cátions trocáveis que se encontram dissociados, resultando uma cadeia. Para que a argila tenha ação cimentante, ela deve ter dimensão inferior a 1 micro e ter elevada capacidade de troca, condições que dão ao colóide alta superfície específica e grande atividade coloidal.

A MO e os minerais de argila são os dois agentes cimentantes que mais contribuem para agregação do solo. Há uma interação entre os colóides orgânicos e inorgânicos do solo, formando complexos que favorecem a estruturação (argilo-orgânicos). Os mecanismos de formação desses complexos podem ser atribuídos à união dos polímeros orgânicos às

superfícies argilosas por meio de pontes catiônicas, pontes de H, força de Van der Waals e complexos de óxidos e húmus. A incorporação de MO ao solo provoca uma intensa atividade de microrganismos, os quais também agem como cimentantes das partículas pelos seus micélios, como os fungos e actinomicetos, ou pelas substâncias viscosas produzidas, como acontece com as bactérias. Dos produtos resultantes da síntese microbiana, os polissacarídeos são os mais importantes como cimentantes. Dos produtos resultantes da decomposição da matéria orgânica, componentes do húmus, são mais ativos os materiais coloidais contendo poliuronídeos, proteínas e substâncias do tipo lignina.

O terceiro agente cimentante são os sesquióxidos de ferro e alumínio na forma coloidal. Nos solos de clima tropical, ricos em óxidos de Fe, como os Latossolos, uma vez precipitados e desidratados, dificilmente se reidratam e entram em suspensão, fato que dá aos agregados elevada estabilidade.

A classificação da estrutura do solo baseia-se em aspectos morfológicos, podendo-se considerar a existência de uma macroestrutura e de uma microestrutura. Em geral, os estudos de solo que exigem a descrição do perfil levam em conta a macroestrutura. Os limites de separação entre esses dois grupos são arbitrários, podendo-se considerar como regra a possibilidade ou não de a estrutura ser vista a olho nu. A macroestrutura é classificada a partir das características morfológicas dos agregados individualizados, baseando-se em três aspectos básicos: o tipo de estrutura, determinado pela forma dos agregados; a classe da estrutura, determinada pelo tamanho dos agregados, e o grau da estrutura, determinado pela facilidade ou dificuldade de distinção dos agregados.

Tipos de estrutura

Laminar: agregados semelhantes a lâminas em que uma dimensão, a vertical, é muito menor que as outras duas. Há o predomínio do plano horizontal. Normalmente ocorrem nos horizontes A_2 de muitos podzólicos.

Prismática: agregados semelhantes a prisma em que uma dimensão, a vertical, é muito maior que as outras duas. Predomina a linha vertical, apresentando faces verticais bem- definidas e vértices angulares. Existem dois subtipos possíveis: o prismático propriamente dito, quando o topo ou cabeça dos agregados é de quinas vivas, encontrado em muitos solos com B textural, e o colunar, quando os topos dos agregados se encontram arredondados, sem quinas, quase sempre encontrado no horizonte B solonetzico (B textural com alto teor de Na).

Blocos: agregados semelhantes a blocos poliédricos ou esferoidais em que não há predomínio de nenhuma das três dimensões. Apresentam superfícies planas ou curtas formadas pelas faces dos torrões ou pedrs que as circundam. Há dois subtipos: se as faces são planas, com a maioria dos vértices contendo ângulos vivos, tem-se estrutura em blocos angulares; se existe uma mistura de faces arredondadas planas, com muitos vértices arredondados, tem-se estrutura em blocos subangulares. Normalmente encontrados em horizontes B dos solos com B textural (Argissolos).

Esferoidal: não há direção preferencial; os agregados têm mais ou menos as mesmas dimensões em todos os eixos. Há dois subtipos: granular, encontrado no horizonte A, rico em MO, e nos Latossolos, e a grumosa, encontrada no horizonte A chernozênico de alguns solos. A diferença entre os dois subtipos é que a última é mais porosa, tendo maior quantidade de microporos.

Classes de estrutura: determinadas em razão do tamanho ou das dimensões dos agregados. Existem cinco classes de estrutura: muito pequena, pequena, média, grande e muito grande. Os limites entre as diversas classes variam de acordo com o tipo de estrutura, podendo ir de 1 mm até 100 mm. A classe de estrutura é obtida pela medição dos agregados individualizados ou pela comparação destes com padrões de referência.

Graus de estrutura: referem-se às condições de coesão dentro e fora dos agregados, tendo relação com a resistência

que o material do solo apresenta à individualização dos agregados. São os seguintes graus:

Sem estrutura: é a condição na qual não se observa agregação ou arranjo ordenado de partículas. É também chamada massiva ou maciça quando coerente e de grãos simples quando não coerente.

Fraca: não observável em exposições de solo, pouco resistente à pressão, partindo-se em uma mistura com poucos aglomerados estruturais inteiros, muito quebrados e grande porção de terra desfeita.

Moderada: aglomerados bem-formados, moderadamente resistentes à fragmentação, partindo-se em muitas estruturas inteiras, algumas quebradas e pouco material não agregado.

Forte: estruturas bem-formadas, com pedriscos resistentes à deformação e observáveis no perfil, separando-se uns dos outros pela remoção de terra a qual se desfaz quase que inteiramente em material estruturado.

Consistência do solo

É a manifestação das forças físicas de coesão (atração das partículas entre si) e a adesão (atração das partículas por um outro corpo) sob várias condições de umidade, envolvendo o comportamento em razão da gravidade, da pressão, do empuxo e da tração; é a tendência da massa do solo de aderir a outros corpos e as sensações do tato do observador que manipula a amostra de solo.

Natureza das forças:

A adesão se refere à atração da fase líquida à superfície da fase sólida. As moléculas de água pela atuação dessa força podem aderir à superfície de partículas de solo e/ou a objetos que estejam em contato com o solo, como máquinas agrícolas. Coesão é a

união de partículas adjacentes em decorrência da presença de moléculas da fase líquida na forma de pontes ou filmes de água. Essa união ocorre em virtude da atuação de forças de atração mútua resultantes de processos físico-químicos como força de Van der Waals, atração eletrostática entre cargas negativas dos colóides argilosos e cargas positivas nas bordas das argilas, união das partículas por meio de ponte de cátions, efeito cimentante da MO, óxidos de ferro e carbonatos e tensão superficial de curvatura dos meniscos nas interfaces ar-água, sempre presente em argilas saturadas. A coesão é diretamente proporcional à tensão superficial e inversamente proporcional à distância entre partículas. Assim, solos arenosos têm baixa coesão entre suas partículas e os argilosos, alta coesão. A adesão ocorrerá quando o conteúdo de água for superior à coesão máxima. Se o teor de água do solo for aumentando, haverá um momento em que as películas de revestimento das partículas sólidas não mais se atraem: é o estado de aderência. Diz-se que a terra está pegajosa e tem a propriedade de aderir aos instrumentos agrícolas. Quando a terra empasta nos implementos, significa que seu teor de água é maior do que o da coesão máxima, tendo alcançado a aderência máxima. A força de adesão do solo aos implementos agrícolas se dá por meio de filmes de água que envolvem suas partículas e o molhamento do objeto que estiver em seu contato. Quanto menor forem as partículas minerais do solo, maior será a força de aderência. Assim, solos argilosos com grande número de partículas coloidais, tendo películas de água com elevadas tensões superficiais, possuem maior força de adesão que os solos arenosos, com partículas grosseiras.

Porosidade

O arranjo ou a geometria das partículas do solo determinam a quantidade e a natureza dos poros existentes. Como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, os poros diferem quanto à forma, comprimento, largura, entre outras características. A porosidade depende principalmente da textura e da estrutura do solo.

Porosidade de um solo é o volume de vazios ou o espaço do solo não ocupado pela matrix (conjunto dos componentes orgânicos e inorgânicos). Se um solo estiver saturado com água, sua porosidade estará tomada pela água. Inversamente, se o solo estiver completamente seco, terá seus poros ocupados pelo ar.

O conhecimento da porosidade total de um solo não constitui informação muito importante para caracterizar suas propriedades. É necessário saber qual a distribuição do tamanho de seus poros. Há dois tipos de poros: os macroporos e os microporos, maiores e menores do que 0,05 mm de diâmetro, respectivamente. Assim, um solo argiloso (muitas partículas < 0,002 mm) apresenta grande microporosidade e um solo arenoso (muitas partículas > 0,05 mm) apresenta grande macroporosidade.

Métodos de determinação

Os solos que têm menor porosidade são os arenosos. Como suas partículas são predominantemente grandes, a tendência é formar a disposição piramidal que tem menor espaço de vazios. Nas terras de textura fina, as partículas não se arranjam de maneira tão compactada; além disso, a argila coloidal contribui para formar agregados que aumentam a porosidade. Na prática, raras vezes se encontram solos de textura grosseira com porosidade total inferior a 30% ou solos de textura fina com volume total de poros superior a 60%. Somente solos ricos em MO apresentam porosidade entre 60% e 80%. A MO, além de dificultar o arranjo piramidal das partículas, é por si mesma um material poroso. No estudo de armazenamento e movimentação da água do solo e no estudo da aeração, é importante conhecer a distribuição dos poros. A microporosidade é a principal responsável pela retenção de água, enquanto a macroporosidade deixa a água gravitacional escorrer com certa rapidez, passando os vazios a ser ocupados pelo ar, isto é a água é retida com mais força nos poros menores; nos poros maiores, a própria gravidade remove a água; nos menores, a água não é tão disponível para as plantas. Nos microporos,

predomina a retenção de água por adsorção; em contrapartida, sua infiltração e arejamento (trocas gasosas) diminuem. Solos com textura grosseira têm maior proporção de macroporos, sendo bem-drenados e bem-arejados. Solos com textura fina têm drenagem e aeração inferiores aos arenosos, porém, a porosidade total é maior; no estado de saturação, contêm mais água do que os de textura grosseira. Cálculo $Pt = 100 - (Ds/Dp \times 100)$.

Densidade do solo

Retirando-se uma amostra de solo de um horizonte superior de solo sob mata, rico em MO, e comparando-se com igual porção de qualquer dos outros horizontes inferiores, pode-se notar que o solo sob superfície é mais leve. Essa observação pode ser comprovada pela densidade do solo. A densidade do solo pode ser definida como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 110 °C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros. Geralmente aumenta com a profundidade do perfil, pois as pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as subjacentes provocam o fenômeno da compactação, reduzindo a porosidade. A movimentação do material fino dos horizontes superiores para os inferiores, por eluviação, também concorre para reduzir os espaços porosos e aumentar a densidade do solo. Por definição, tem-se: $Ds = m/v$ em $g\ cm^{-3}$. Supondo que se retirou de um solo um cubo de terra com 10 cm de aresta e que seu peso seja 1.330 g, tem-se $Ds = 1.330/1.000 = 1,33\ g\ cm^{-3}$.

A densidade do solo (ds) depende da natureza, das dimensões e da forma como se acham dispostas as partículas do solo. A fase líquida também afeta o volume, fazendo variar a densidade do solo. Nos solos minerais, os valores de ds oscilam de 1,1 a 1,6 $g\ cm^{-3}$. Nos solos orgânicos, a densidade está entre 0,6 e 0,8 $g\ cm^{-3}$. A densidade do solo é um valor variável para um mesmo solo, alterando-se de acordo com a estruturação. O manejo inadequado do solo pode provocar a compactação, alterando a estrutura e conseqüentemente a densidade do solo.

A determinação da densidade do solo dos horizontes de um perfil desde a superfície até a camada de rocha permite avaliar certas propriedades do solo como drenagem, porosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e à água, capacidade máxima do solo para água, e possibilitar recomendações para determinadas culturas como as produtoras de raízes e tubérculos, que preferem solos pouco densos.

Para diminuição do valor da densidade do solo, recomenda-se a aplicação de MO por meio de adubos verdes, esterco animal e outras fontes. A aração do solo seguida de gradagem com o teor de umidade ótimo contribui para formação de agregados e conseqüentemente para diminuir a densidade do solo.

Densidade de partículas

A densidade de partículas refere-se ao volume de sólidos de uma amostra de terra sem considerar a porosidade. Por definição, entende-se como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas. É conhecido que a densidade do solo varia com seu teor de água, uma vez que o volume da amostra seca difere levemente da molhada. Entretanto, a densidade de partículas de um solo, ou seco ou molhado, é sempre a mesma, desde que se subtraia da massa da amostra o peso da água contida (KIEHL, 1979). Embora se observem diferenças apreciáveis na densidade dos solos minerais específicos, os dados variam para a maioria deles numa faixa limitada de 2,60 a 2,75 g cm⁻³. Isso porque quartzo, feldspato e silicatos coloidais, com densidades compreendidas nessa faixa compõem a maior parcela dos solos minerais (BRADY, 1989).

Na determinação da densidade de partículas, é necessário o valor da massa da amostra e depois o volume dos sólidos presentes. A massa é obtida por simples pesagem em balança analítica. Quanto ao volume, pode ser obtido pelo método do balão volumétrico (BRADY, 1989).

Horizontes diagnósticos

O solo é a coleção de corpos naturais na superfície da terra, constituída de matéria mineral e/ou orgânica inconsolidada na superfície da terra, que serve como meio natural para o crescimento e desenvolvimento de plantas. Ele é resultante da ação combinada dos fatores de formação: clima, relevo, material de origem, tempo e organismos, e dos processos pedogenéticos: adição, perda, transportes seletivos e transformações, e representado pelo contínuo na paisagem interrompido apenas por aforamentos rochosos, águas espessas e geleiras.

Ao analisar o perfil do solo formado, o pedólogo pode separá-lo em seções mais ou menos paralelas à superfície do terreno, denominadas horizontes ou camadas, dependendo de guardarem ou não relações genéticas entre si. Essas seções são imprescindíveis para quantificar com precisão vários atributos do solo, importantes para a sua classificação e para permitir avaliação quanto ao comportamento agrícola. São oito os horizontes e/ou camadas do solo: O, H, A, E, B, C, F e R. O: horizonte ou camada superficial de constituição orgânica pouco ou nada decomposta; H: horizonte ou camada superficial ou não, de constituição orgânica, composta de resíduos orgânicos acumulados ou em acumulação sob prolongada estagnação de água; A: horizonte mineral, superficial ou em seqüência aos horizontes O ou H, resultante de atividade biológica intensa; E: horizonte mineral subjacente ao horizonte A. Apresenta como característica principal a concentração relativa de areia e silte, com conseqüente descoloramento, em razão da perda de argila, óxidos de ferro e Al e MO; B: horizonte mineral subjacente aos horizontes A, E ou H comparativamente bastante afetado por transformações pedogenéticas em que pouco ou nada resta da estrutura da rocha original; C: horizonte ou camada mineral sob solum relativamente pouco afetado pelo processos pedogenéticos; F: horizonte ou camada de material mineral consolidado sob os horizontes A, E ou B, rico em óxidos de Fe e Al e pobre em MO, proveniente do endurecimento irreversível da plintita; R: camada mineral de material consolidado, constituindo substrato rochoso contínuo.

Há a necessidade, portanto, de classificar os horizontes em pedogenéticos e diagnósticos. O horizonte pedogenético corresponde a cada uma das seções do solo resultantes dos processos de pedogênese, as quais, por isso, guardam relações genéticas entre si. O horizonte diagnóstico corresponde a uma seção do solo que apresenta determinados atributos selecionados, cuja amplitude de manifestação é determinada arbitrariamente, havendo, por isso, sensíveis diferenças de critérios entre os vários sistemas de classificação existentes. Em seguida, serão apresentados os principais horizontes diagnósticos.

Horizonte hístico: é um tipo de horizonte definido pela constituição orgânica resultante de acumulações de resíduos vegetais depositados superficialmente, ainda que no presente possa encontrar-se recoberto por horizontes ou depósitos minerais e mesmo camadas orgânicas mais recentes. Apresenta coloração escura e é constituído de camadas superficiais espessas em solos orgânicos ou de espessura maior ou igual a 20 cm quando sobrejacente a material mineral. Mesmo após o revolvimento da parte superficial do solo (aração), os teores de MO, após mesclagem com materiais minerais, mantêm-se elevados. Esse horizonte compreende materiais depositados nos solos em condições de excesso de água (horizonte H), por longos períodos ou por todo o ano, ainda que no presente tenham sido artificialmente drenados, e materiais nos quais não se observa influência recente de ambiente de saturação por água (turfeiras e horizonte O). Pode ser diagnóstico em vários níveis categóricos, como na definição dos organossolos (ordem).

Horizonte A chernozêmico: é um horizonte mineral superficial, relativamente espesso, com estrutura moderada a forte, de forma que não seja simultaneamente maciço e de consistência dura ou mais coeso quando seco, cor escura, com alta saturação por bases (>65%), teor de C orgânico superior a 0,6%. É o único horizonte superficial usado como diagnóstico no primeiro nível categórico, identificando a classe dos Chernossolos. Esse horizonte apresenta excelentes propriedades físicas e químicas,

típicas de solos bastante férteis. Sua estruturação do tipo granular moderada a fortemente desenvolvida e sua consistência seca são fatores que facilitam o preparo do solo. De outro lado, quando a textura é argilosa ou muito argilosa, apresenta em geral elevada plasticidade e pegajosidade e isso pôde representar alguma limitação para o preparo do solo.

Horizonte A proeminente: apresenta todos os requisitos do A chernozêmico, exceto a saturação por bases, inferior a 65%. Difere do horizonte A húmico por não satisfazer a conjugação de espessura e teor de carbono requerida por esse horizonte. É diagnóstico na ordem dos Gleissolos, discriminando os Gleissolos Melânicos dos outros Gleissolos. Como o próprio nome indica, o horizonte A proeminente, em virtude da sua cor escura, destaca-se do horizonte que lhe segue, sendo facilmente identificado. Do ponto de vista físico, o A proeminente é semelhante ao A chernozêmico, porém, quimicamente é muito diferente, pois sua saturação por bases é inferior a 65%. Em geral, a presença de horizonte A proeminente com valores inferiores a 50% relaciona-se a solos que são pouco providos de bases trocáveis (distróficos) e/ou que apresentam teores tóxicos de alumínio nos horizontes subjacentes.

Horizonte A húmico: é um horizonte mineral superficial de cor escura, com valor e croma 4.0 ou menor, e V% inferior a 65%. Esse horizonte, quando de espessura relativamente pequena, apresenta comportamento bastante semelhante ao do horizonte A proeminente. Em igualdade de condições de textura e espessura, contudo, é de esperar que o horizonte A húmico, em consequência de sua maior CTC resultante do teor mais elevado de MO, requeira maior quantidade de corretivos para neutralizar a acidez.

Horizonte A antrópico: é um horizonte formado ou modificado pelo uso contínuo do solo pelo homem, como lugar de residência ou cultivo por períodos prolongados, com adições de material orgânico em mistura ou não com material mineral, ocorrendo, às vezes, fragmentos de cerâmica e restos de ossos e conchas. Esse horizonte assemelha-se aos horizontes A chernozêmico ou

A húmico, já que a saturação por bases é variável e geralmente difere destes por apresentar teor de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico mais elevado que na parte inferior do solum, em geral superior a 250 mg/kg de solo. O horizonte A antrópico ocorre em áreas de pequena expressão espacial (2-3 ha), geralmente não assimiláveis em mapas pedológicos com escala de 1:10.000, tendo interesse localizado.

Horizonte A fraco: horizonte mineral superficial fracamente desenvolvido, seja pelo reduzido teor de colóides minerais ou orgânicos, seja por condições externas de clima e vegetação, como as que ocorrem na zona semi-árida com vegetação de caatinga hiperxerófila. O horizonte fraco tem as seguintes características: cor do solo com valor maior ou igual a 4 quando úmido e maior ou igual a 6 quando seco; estrutura em grão simples, maciça ou com fraco desenvolvimento; teor de C orgânico < 0,6%. Na região semi-árida, em razão da baixa densidade de vegetação, há reduzida adição de MO à superfície do solo, e a elevada temperatura promove uma perda rápida da mesma, resultando em solos com horizonte superficial claro e baixos teores de C. Solos bem a moderadamente drenados, com horizonte superficial de textura areia, apresentam condições favoráveis à formação do horizonte A fraco. Assim, em regiões menos secas que o Semi-Árido, nordestino pode-se encontrar, mesmo que em menor frequência, esse horizonte em Neossolos Quartzarênicos. O horizonte A fraco é pobre em MO e, sendo em geral de textura arenosa, apresenta baixa capacidade de retenção de cátions, além de pequena coesão e adesão, sendo fáceis, portanto, de ser preparados para o plantio. Porém, essas características aumentam a susceptibilidade à erosão.

Horizonte A moderado: são incluídos horizontes superficiais que não se enquadram no conjunto das definições dos demais horizontes diagnósticos superficiais. Em geral, o horizonte A moderado difere dos horizontes chernozêmico, proeminente e húmico pela espessura e/ou cor e do A fraco pelo teor de cot e estrutura, não apresentando ainda requisitos para caracterizar o horizonte hístico ou o A antrópico. É o horizonte superficial mais

comum entre os solos brasileiros, ocorrendo desde solos mal-drenados situados em planícies aluviais até solos excessivamente drenados, arenosos das partes altas. Apresenta variação significativa em propriedades químicas e físicas, o que imprime caráter bastante variável.

Subsuperficiais: esses horizontes estão situados abaixo do horizonte A. Algumas vezes, podem coexistir com o horizonte A ou situar-se na superfície, em razão da remoção por erosão das camadas superficiais.

Horizonte B espódico: "Ortstein", horizonte subsuperficial que apresenta acumulação iluvial de MO e compostos de alumínio, com presença ou não de ferro iluvial. Apresenta espessura mínima de 2,5 cm e uma ou mais das seguintes características: acentuada diferença de cor com o horizonte suprajacente A ou E; cimentação por MO e alumínio, com ou sem ferro em 50% ou mais do horizonte e textura arenosa ou média. Quando o horizonte B espódico apresenta-se consolidado, cimentado com ferro e MO, recebe o nome de Ortstein. O horizonte B espódico, diagnóstico exclusivo da ordem dos Espodosolos, é por excelência iluvial, resultante de processos entre os quais o de podzolização. Resulta numa morfologia peculiar, imprimindo ao solo feições fáceis de ser percebidas no campo. Assim, é comum a presença de horizonte alábico de cor esbranquiçada, contrastando com as cores vermelhas ou bruno-escuras do horizonte espódico que lhe sucede. Os ácidos fúlvicos, compostos ativos na gênese desse horizonte, são particularmente abundantes em três condições distintas, nas quais a decomposição microbiana da MO é dificultada: baixa temperatura, oligotrofismo pronunciado e ambiente saturado por água, estas últimas mais freqüentes. O horizonte B espódico e os solos que o contêm são pobres e quimicamente ácidos, com baixíssimos teores de bases trocáveis, sendo essencial a aplicação de insumos. Apesar disso, por ocorrerem em regiões litorâneas com intensa atividade turística, a horticultura ou qualquer outro uso agrícola pode ser compensador.

Horizonte B incipiente: horizonte subsuperficial subjacente aos horizontes A, Ap ou AB, que sofreu alteração física e química em grau não muito avançado, porém, suficiente para o desenvolvimento de cor ou de estrutura. Mais da metade do volume de todos os seus subhorizontes não deve consistir de material com estrutura da rocha original preservada. Para ser diagnóstico, deve ter no mínimo 10 cm de espessura e apresentar características, tais como: não satisfazer os requisitos estabelecidos para caracterizar um horizonte plíntico, B textural, B nítrico, B espódico, B plânico e B latossólico, além de não apresentar cimentação ou endurecimento característicos de duripã ou a consistência quebradiça do fragipan; apresentar textura franco-arenosa ou mais fina e desenvolvimento de estrutura do solo, ou ausência da estrutura da rocha original em 50% ou mais do seu volume. É o horizonte diagnóstico obrigatório no primeiro nível categórico da classe dos Cambissolos. Esse conceito de horizonte B incipiente é o de horizonte cujos atributos refletem estágio de intemperismo pouco acentuado. Um típico horizonte B incipiente apresenta, portanto, CTC e índice Ki elevados, teores apreciáveis de minerais primários facilmente intemperizáveis, elevada relação silte/argila e ocorre em solos pouco profundos.

Horizonte B latossólico: horizonte subsuperficial situado imediatamente abaixo de qualquer horizonte A e que não apresenta características diagnósticas de horizonte glei, B textural, B nítrico e plíntico. Além disso, apresenta pouca diferenciação entre os horizontes, estrutura forte muito pequena a pequena granular ou blocos subangulares fracos ou moderados; espessura mínima de 50 cm, grande estabilidade dos agregados, menos de 4% de minerais primários alteráveis e $CTC < 17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila. É diagnóstico da classe dos Latossolos. É importante no Brasil, pois mais da metade dos seus solos o apresenta. É constituído por material caracterizado por avançado estágio de intemperismo, que se manifesta de maneira particular em seus atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. Morfológicamente, o horizonte B latossólico se caracteriza por apresentar: virtual ausência da macroestrutura; consistência ligeiramente dura; friável a muito friável, ligeiramente plástica a

plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa. A constituição mineralógica da fração argila é representada essencialmente por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, enquanto as frações grosseiras são destituídas de minerais primários facilmente intemperizáveis. Além disso, mesmo quando bastante argiloso, apresenta excepcional porosidade total, sendo comuns valores de 50% a 60%. A distribuição entre macro e microporos é equivalente, de forma que a condutividade hidráulica é, em geral, boa. O topo do horizonte B de Latossolos Amarelos Coesos, desenvolvidos da formação Barreiras, contudo, apresenta porosidade total mais baixa do que a do horizonte superior. Quimicamente, esse horizonte se caracteriza por apresentar baixa CTC. Em solos muito intemperizados, argilosos e ricos em óxidos de ferro e/ou alumínio, é comum o B latossólico apresentar carga líquida positiva (caráter ácrico). O índice K_i é inferior a 2,2; valores baixos ($<0,7$) são indicativos de mineralogia essencialmente oxidica e geralmente se relacionam com a presença de carga líquida positiva.

A porosidade total e a adequada quantidade de macroporos determinam boas condições de permeabilidade no horizonte B latossólico. Esses fatores, juntamente com coesão relativamente baixa, permitem, mesmo em solos de textura argilosa, fácil penetração do sistema radicular. A textura variando de franco-arenosa até muito argilosa reflete-se na variada capacidade de retenção de água. Do ponto de vista de fertilidade, o horizonte B latossólico apresenta grande variação. São encontrados horizontes com elevada saturação por alumínio, com baixa saturação de alumínio, porém, distróficos e com elevada saturação por bases. Nestes últimos, a baixa CTC e a virtual ausência de minerais facilmente alteráveis limitam o potencial nutricional.

Horizonte B nítico: horizonte mineral subsuperficial, não hidromórfico, textura argilosa ou muito argilosa, sem incremento de argila do horizonte A para o B ou com pequeno incremento, porém, não suficiente para caracterizar a relação textural B/A do horizonte B textural. O horizonte B nítico é horizonte diagnóstico obrigatório da ordem dos Nitossolos. Constitui-se novo horizonte

no SBCS, tendo sido desmembrado do horizonte B textural anterior, e sua concepção baseia-se em grande parte na de horizonte B árgico. É típico das antigas terras roxas estruturadas, atualmente o Nitossolos Vermelhos, caracterizado pela baixa relação estrutural, estrutura em blocos ou prismática e cerosidade bem-desenvolvidas e textura argilosa ou muito argilosa. Em razão da ausência de relação textural, apresentam menor erodibilidade que os solos com horizonte B textural. A excelente estruturação que apresentam os solos com B nítico confere-lhes boas condições de permeabilidade interna.

Horizonte B plânico: é um tipo especial de horizonte B textural subjacente ao horizonte A ou E e precedido por mudança textural abrupta. Apresenta permeabilidade lenta ou muito lenta e cores acinzentadas ou escurecidas, podendo ou não possuir cores neutras de redução, com ou sem mosqueados. Esse horizonte, diagnóstico da ordem dos Planossolos, engloba o anteriormente denominado horizonte nátrico, sob a denominação de horizonte plânico com caráter sódico. Esse se caracteriza por apresentar, além dos requisitos de horizonte plânico, saturação por sódio igual ou superior a 15% em quaisquer dos subhorizontes dos 40 cm superiores do horizonte B. Por apresentar baixa condutividade, determina a formação de um lençol freático suspenso temporário nos períodos mais chuvosos do ano e o estabelecimento de ambiente redutor no seu topo e na base do horizonte suprajacente, A ou E. Quando o horizonte B está pouco profundo nos períodos chuvosos, os horizontes suprajacentes podem ficar completamente saturados e, nos terrenos planos nos quais o escoamento lateral é mínimo, pode-se formar até uma lâmina d'água em superfície, apesar de os horizontes mais profundos poderem apresentar-se pouco umedecidos, posto que a baixa condutividade hidráulica dificulta a percolação profunda da água. Nos solos com horizontes plânicos situados em planícies aluviais, é comum ter, além da água de infiltração pela superfície, a participação da água proveniente do lençol freático (Planossolos Hidromórficos).

A maior parte dos solos com horizonte plânico e caráter sódico (Planossolos Nátricos) identificados no Brasil apresenta processo de solodização, decorrente de fenômenos de lixiviação e degradação. Neles, significativa quantidade de sódio trocável é substituída por íons de H^+ , havendo intensa mobilização de argilas do horizonte A para o horizonte B (argilização), sendo comum a presença de horizonte eluvial E.

Solos com horizonte plânico apresentam em geral baixa permeabilidade à água e aqueles com caráter sódico, além disso, apresentam distúrbios nutricionais. As condições de hidromorfismo temporário podem ser de ordem nos Planossolos, que chegam a interferir nas funções fisiológicas das plantas menos adaptadas.

Horizonte B textural: horizonte mineral subsuperficial com textura franco-arenosa ou mais fina onde houve incremento de argila, orientada ou não, desde que não exclusivamente por descontinuidade, resultante de acumulação ou concentração absoluta ou relativa decorrente de processos de iluviação e/ou formação in situ e/ou herdada do material de origem e/ou infiltração de argila, ou argila mais silte, com ou sem MO e/ou destruição de argila no horizonte A e/ou perda de argila no horizonte A por erosão diferencial. É diagnóstico das ordens Alissolo, Argissolo, Chernossolo, Luvisolo. Geralmente, solos com B associado à mudança textural abrupta apresentam limitações moderadas a muito fortes quanto à erodibilidade. Quando na presença de textura argilosa, e especialmente os solos que apresentam argila de atividade elevada e relacionados também com mudança textural abrupta, tem-se significativa limitação ao enraizamento das plantas com sistema radicular pouco agressivo.

Horizonte cálcico e petrocálcico: o horizonte cálcico é um horizonte de acumulação de carbonato de cálcio (+15%). O petrocálcico é um horizonte contínuo resultante da consolidação de um horizonte cálcico por carbonato de cálcio e/ou de magnésio.

Horizonte glei: horizonte mineral subsuperficial ou eventualmente superficial, com espessura de 15 cm ou mais, com qualquer classe textural, menos de 15% de plintita e obrigatório da ordem

dos Gleissolos. É formado em ambiente palustre; nessa situação, o solo se mantém em condição de umidade excessiva por período excessivamente prolongado e sem renovação da água, de modo que a atividade microbiana possa reduzir significativamente a taxa de oxigênio livre nela dissolvido. Os nitratos e depois os compostos de manganês são os primeiros a serem reduzidos, porém, como eles geralmente não são abundantes, rapidamente esgotam o seu papel de receptores de elétrons. O ferro, portanto, mais abundante, constitui a maior reserva de receptores de elétrons nas reações de oxirredução. Nessas condições, o Fe^{+3} passa para o Fe^{2+} , adquirindo grande mobilidade, sendo removido causando, conseqüentemente, despigmentação do solo, que adquire cores acinzentadas, oliváceas ou azuladas. A flutuação do lençol freático permite que nos períodos mais secos os compostos de ferro situados próximo a fissuras, fendas e canais produzidos pelas raízes sejam reoxidados. Esse processo de reoxidação é mais rápido do que o de redução, produzindo então os mosqueados distribuídos em matriz acinzentada.

O principal problema apresentado pelo horizonte glei não é o excesso de água, mas a aeração inadequada que aumenta a resistência da difusão dos gases do solo para a atmosfera e vice-versa. O oxigênio necessário na respiração metabólica é rapidamente consumido pelos microrganismos e pelas plantas, inibindo o crescimento do sistema radicular.

Os solos com horizonte glei apresentam sérias limitações ao uso, como local de recebimento de resíduos industriais ou urbanos, e são inadequados para aterros sanitários, pois o lençol freático, situado a pouca profundidade, está sujeito à contaminação. Além disso, solos com horizonte glei, por estarem geralmente situados em planícies aluviais, estão sujeitos a inundações e apresentam forte limitação ao tráfego durante os períodos chuvosos.

Horizonte e albico: horizonte mineral comumente subsuperficial, no qual a remoção ou a segregação do material coloidal e orgânico progrediu a tal ponto que a cor do horizonte é determinada mais pela cor das partículas primárias de areia e silte do que por

revestimento nessas partículas. É um típico horizonte eluvial. Assim, em geral, está precedendo o horizonte B espódico, B textural, B plânico, glei ou plântico coincidentes com horizonte B. É ainda encontrado suprajacente a fragipã. Não tem grande significado agrônômico ou geotécnico, pois apresenta grande variabilidade do ponto de vista químico.

Horizonte plácico: é um horizonte fino, cimentado por ferro ou por ferro e manganês, com ou sem MO, acompanhado ou não de agentes cimentantes. Não há nenhuma classe de solo discriminada para tal atributo.

Horizontes plântico, petroplântico e litoplântico. Plântico: horizonte caracterizado pela presença de plintita em quantidade igual ou superior a 15% e espessura de pelo menos 15 cm. Quando um horizonte satisfizer coincidentemente os requisitos para ser identificado como plântico e também como qualquer um dos seguintes horizontes: B textural, B latossólico, B incipiente, B plânico ou horizonte glei, será identificado como horizonte plântico. Petroplântico: horizonte com pelo menos 15 cm de espessura, constituído de 50% ou mais de petroplintita. Litoplântico: secção consolidada, contínua ou praticamente contínua, endurecida por ferro ou por ferro e alumínio, na qual o carbono orgânico está ausente ou presente em pequena quantidade. O horizonte plântico é diagnóstico da ordem dos Plintossolos.

Horizonte sulfúrico: horizonte subsuperficial constituído por material mineral ou orgânico com 15 cm ou mais de espessura, apresentando pH de 3,5 e mostrando evidência de que o baixo valor de pH é causado pelo ácido sulfúrico por meio da jarosita ou por materiais sulfídricos. Esse horizonte forma-se como resultado da drenagem dos solos ricos em sulfetos situados nas regiões costeiras, com forte influência das marés, como aqueles situados em áreas de mangue. Os sulfetos presentes no solo são facilmente oxidados dando origem ao ácido sulfúrico. O pH do solo, que na condição original era neutro ou próximo, sofre drástico abaixamento, descendo a valores inferiores a 3,5. Solos com horizonte sulfúrico apresentam várias restrições do ponto de vista agrônômico. Com exceção

de solos construídos em áreas de mineração, todos os solos com horizonte sulfúrico apresentam limitações ao uso em razão da presença de lençol freático elevado. Além disso, o pH extremamente baixo constitui ambiente impróprio à maioria das plantas cultivadas. Nessas condições, é comum a presença de Al^{3+} e Mn^{+3} em doses tóxicas na solução do solo, constituindo ambiente impróprio à maioria das plantas.

Horizonte vértico: horizonte subsuperficial que, em decorrência da expansão e contração das argilas, apresenta feições pedológicas típicas, que são as superfícies de fricção (slickensides) e/ou a presença de unidades estruturais cuneiformes e/ou paralelepípedicas, além de fendas, em períodos mais secos do ano. A textura varia de argilosa a muito argilosa. O horizonte vértico pode coincidir com o horizonte AC, B (Bi ou Bt) ou C e apresentar cores escuras, acinzentadas, amareladas e avermelhadas. É diagnóstico da classe dos Vertissolos, desde que ocorra dentro da profundidade de 100 cm. As propriedades vérticas estão diretamente relacionadas à presença de minerais de argila expansiva (esmectitas) e à presença de teores significativos da fração argila (>30%). Abaixo desse valor, as argilas estão contidas em uma matriz arenosa, enquanto acima se dá o inverso, havendo então condições satisfatórias para que os fenômenos de expansão e contração das esmectitas se manifestem. A textura fina e a estrutura fraca e, portanto, a má drenagem interna causam aos Vertissolos sérias restrições ao uso de plantas arbóreas, as quais apresentam raízes grossas, requerendo poros relativamente grandes para penetrarem. Além disso, a textura argilosa aliada à mineralogia esmectítica determinam expressiva coesão nos agregados dos Vertissolos, de forma que o preparo desses solos para plantio requer, de um lado, considerável força de tração e, de outro, necessidade de fragmentar os grandes torrões que se formam com a aração. Quando molhados, são muito plásticos e pegajosos sendo chamados, por isso, de solos pesados.

Fragipã: horizonte mineral subsuperficial, usualmente de textura média ou arenosa, baixo conteúdo de MO e alta densidade do solo em relação aos horizontes subjacentes e é aparentemente

cimentado quando seco, tendo então consistência dura ou muito dura ou extremamente dura. Geralmente, está abaixo de um horizonte B espódico, B textural ou horizonte álbico. Quando úmido, o fragipã sob pressão tem tendência a romper-se subitamente ao invés de sofrer deformação lenta. Quando imerso em água, torna-se quebradiço, menos resistente, podendo desenvolver fraturas com ou sem desprendimento de pedaços e se esboroa em curto espaço de tempo. Como resultante da elevada densidade do solo e da baixa condutividade hidráulica, há a presença de mosqueado. Em razão dessas características, o fragipã constitui limitação ao livre desenvolvimento das plantas.

Duripã: horizonte mineral subsuperficial com 10 cm ou mais de espessura, que apresenta grau variável de cimentação por sílica, podendo ainda conter óxido de ferro e carbonato de cálcio. Apresenta consistência, quando úmido, muito firme ou extremamente firme, não se esboroando mesmo durante prolongado umedecimento, apesar de ser quebradiço. Apresenta séria limitação ao sistema radicular, pois impede seu aprofundamento.

Classes de Solos do Brasil (SANTOS et al., 2006)

Argissolos

São solos constituídos por material mineral com argila de atividade baixa e horizonte B textural (gradiente textural) imediatamente abaixo do A ou E. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este. São fortes a moderadamente ácidos, predominantemente caulíníficos e com relação Ki variando de 1,0 a 2,3. São de profundidade variável, desde fortes a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas. Nessa classe, estão incluídos os solos anteriormente classificados como Podzólico Vermelho-Amarelo argila de atividade baixa, pequena parte da Terra Roxa Estruturada, da Terra Roxa Estruturada Similar, da Terra Bruna

Estruturada e da Terra Bruna Estruturada Similar, todos com gradiente textural necessário para Bt, em qualquer caso Eutróficos, Distróficos ou Álicos, e mais recentemente o Podzólico Vermelho-Escuro, com B textural, e o Podzólico Amarelo.

Cambissolos

São solos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte A ou hístico com espessura < 40 cm seguido do horizonte B incipiente (Bi). Têm seqüência dos horizontes A ou hístico, Bi, C, com ou sem R. Distinguem-se dos Latossolos por apresentarem uma ou mais das características abaixo especificadas, não compatíveis com solos mais evoluídos: 4% ou mais de minerais primários alteráveis ou 6% ou mais de muscovita na fração areia total; CTC, sem correção para carbono, $\geq 17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila; $K_i > 2,2$; teores elevados de silte, de modo que a relação silte/argila seja $> 0,7$ nos solos de textura média ou $> 0,6$ nos de textura argilosa, principalmente nos solos do cristalino; 5% ou mais do volume do solo constando de fragmentos de rocha semi-intemperizada, saprólito ou restos de estrutura orientada da rocha que deu origem ao solo.

Em virtude da heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características desses solos variam muito de um local para outro. Assim, a classe comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna a vermelho-escura e de alta a baixa saturação por bases.

Essa classe compreende os solos anteriormente classificados como Cambissolos, inclusive os desenvolvidos em sedimentos aluviais. São excluídos dessa classe os solos com horizonte A chernozêmico e horizonte B incipiente com alta saturação por bases e argila de atividade alta.

Chernossolos

Solos constituídos por material mineral, que apresentam A chernozêmico sobrejacente a horizonte Bi, Bt, B nítico ou horizonte C cálcico ou carbonático. São solos moderadamente ácidos a fortemente alcalinos, com relação molecular Ki normalmente entre 3,0 e 5,0, argila de atividade alta (valor T por vezes superior a $100 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila), saturação por bases alta (geralmente superior a 70%) e predomínio de cálcio ou cálcio e magnésio entre os cátions trocáveis.

Embora sejam formados em condições de clima bastante variáveis e a partir de diferentes materiais de origem, o desenvolvimento desses solos depende da conjunção de condições que favoreçam a formação e a persistência de argilominerais 2:1, especialmente do grupo das esmectitas, e de um horizonte superficial rico em matéria orgânica e com alto conteúdo de cálcio e magnésio.

Está incluída nessa classe a maioria dos solos que foram anteriormente classificados como Brunizém, Rendzina, Brunizém Avermelhado, Brunizém Hidromórfico.

Espodossolos

Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B espódico, imediatamente abaixo dos horizontes E ou A, dentro de 200 cm da superfície do solo, ou de 400 cm, se a soma dos horizontes A + E ou horizonte hístico + E ultrapassar 200 cm de profundidade.

Apresentam, usualmente, seqüência dos horizontes A, E, Bh ou Bs e C, com nítida diferenciação de horizontes. A cor do horizonte A varia de cinzenta até preta e a do horizonte E, desde cinzenta ou acinzentado-clara até praticamente branca. A cor do horizonte Bh varia desde cinzenta, de tonalidade escura, até preta, enquanto no Bs as cores são variáveis, desde avermelhadas até amareladas. A textura do solum é predominantemente arenosa,

sendo menos comumente textura média e raramente argilosa (tendente para média ou siltosa) no horizonte B. São solos muito pobres, moderada a fortemente ácidos, normalmente com saturação por bases baixa, sendo peculiares altos teores de alumínio extraível. Podem apresentar fragipã, duripã ou orstein. Nessa classe, estão incluídos todos os solos anteriormente classificados como Podzol, inclusive Podzol hidromórfico.

Gleissolos

Solos hidromórficos constituídos por material mineral, com horizonte glei dentro dos primeiros 50 cm da superfície, ou entre 50 e 125 cm desde que imediatamente abaixo dos horizontes A ou E, ou precedido pelos horizontes Bi, Bt ou horizonte com presença de mosqueados abundantes com cores de redução.

Os solos dessa classe são permanentemente ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados. São caracterizados pela forte gleização, em decorrência do regime de umidade redutor, que se processa em meio anaeróbico, com muita deficiência ou mesmo ausência de oxigênio, em razão do encharcamento do solo por longo período ou durante o ano inteiro. O processo de gleização implica a manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, em virtude de compostos ferrosos resultantes da escassez de oxigênio causada pelo encharcamento. Provoca, também, a redução e a solubilização do ferro, promovendo translocação e reprecipitação dos seus compostos. Apresentam seqüência dos horizontes A-Cg, A-Big-Cg, A-Btg-Cg, A-E-Btg-Cg, A-Eg-Bt-Cg, Ag-Cg e H-Cg, tendo o horizonte A cores desde cinzentas até pretas, espessura normalmente entre 10 e 50 cm e teores médios a altos de carbono orgânico.

Essa classe abrange os solos que foram anteriormente classificados como Glei Pouco Húmico, Glei Húmico, parte do Hidromórfico Cinzento (sem mudança textural abrupta), Glei Tiomórfico e Solonchak com horizonte glei.

Latossolos

São solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo, ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura.

São solos em estado avançado de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo (salvo minerais pouco alteráveis). Os solos são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo e têm capacidade de troca de cátions baixa, inferior a 17 cmol_c/kg de argila sem correção para carbono. Comportam variações desde solos predominantemente cauliníticos, com valores de Ki mais altos, em torno de 2,0, admitindo o máximo de 2,2, até solos oxídicos de Ki extremamente baixo. São normalmente muito profundos, sendo a espessura do solum raramente inferior a um metro. Têm seqüência dos horizontes A, B, C, com pouca diferenciação de horizontes, e transições normalmente difusas ou graduais.

São, em geral, solos fortemente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou álicos. Ocorrem, todavia, solos com média e até alta saturação por bases, encontrados geralmente em zonas que apresentam estação seca pronunciada, semi-áridas ou não, como também em solos formados a partir de rochas básicas.

Estão incluídos todos os Latossolos, excetuadas algumas modalidades anteriormente identificadas, como Latossolos Plínticos.

Luvissolos

São solos constituídos por material mineral, não hidromórficos, com argila de atividade alta, saturação por bases alta e horizonte B textural ou B nítico imediatamente abaixo do horizonte A fraco, ou moderado, ou horizonte E.

Esses solos variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos (60 a 120 cm), com seqüência dos horizontes A, Bt e C e nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt, em razão do contraste de textura, cor e/ou estrutura entre os mesmos. Grande parte dos solos dessa classe possui mudança textural abrupta. Em todos os casos, podem apresentar pedregosidade na parte superficial e o caráter sódico ou solódico na parte subsuperficial. São moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, com teores de alumínio extraível baixos ou nulos e com valores elevados para a relação Ki no horizonte Bt, normalmente entre 2,4 e 4,0, denotando presença, em quantidade variável, mas expressiva, de argilominerais do tipo 2:1.

Nessa classe, estão incluídos os solos que foram anteriormente classificados como Bruno Não Cálxico, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico argila de atividade alta, Podzólico Bruno-Acinzentado Eutrófico e alguns Podzólicos Vermelho-Escuros Eutróficos com argila de atividade alta.

Neossolos

São solos constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso (menos de 30 cm), com pouca expressão dos processos pedogenéticos em consequência da baixa intensidade da atuação desses processos, que não conduziram ainda a modificações expressivas do material originário, de características do próprio material. Não apresenta qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Possuem seqüência dos horizontes A-R, A-C-R, A-Cr-R, A-Cr, A-C, O-R ou H-C.

Nessa classe, estão incluídos os solos anteriormente classificados como Litossolos e Solos Litólicos, Regossolos, Solos Aluviais e Areias Quartzosas (distróficas, marinhas e hidromórficas).

Nitossolos

Solos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte B nítico com argila de atividade baixa, imediatamente abaixo do horizonte A ou dentro dos primeiros 50 cm do horizonte B, com textura argilosa ou muito argilosa. Apresentam horizonte B bem expresso em termos de desenvolvimento de estrutura e cerosidade, mas com inexpressivo gradiente textural. São, em geral, moderadamente ácidos a ácidos, com saturação por bases baixa a alta, às vezes álicos, com composição caulinitico-oxídica e, por conseguinte, com argila de atividade baixa.

Nessa classe, enquadram-se os solos anteriormente classificados, na maioria, como Terra Roxa Estruturada, Terra Roxa Estruturada Similar, Terra Bruna Estruturada, Terra Bruna Estruturada Similar e alguns Podzólicos Vermelho-Escuros e Podzólicos Vermelho-Amarelos.

Organossolos

Compreendem solos pouco evoluídos, constituídos por material orgânico proveniente de acumulações de restos vegetais em grau variável de decomposição, acumulados em ambientes mal a muito mal-drenados ou em ambientes úmidos de altitudes elevadas, que estão saturados com água por poucos dias no período chuvoso, de coloração preta, cinzenta muito escura ou marrom e com elevados teores de carbono orgânico.

Em condições sujeitas a altas taxas de recepção de água, a formação dos solos é dominada pela acumulação de material orgânico sobre a superfície. Onde quer que os horizontes ou camadas superficiais permaneçam saturados com água na maior parte do ano, os processos de alteração mineral e translocação de produtos secundários são substituídos pela acumulação de MO sobre as seções superficiais e formação de "peat".

Usualmente, são solos fortemente ácidos, apresentando alta CTC e baixa saturação por bases, com esporádicas

ocorrências de saturações média e alta. Ocorrem normalmente em áreas baixas de várzeas e depressões, sob vegetação hidrófila ou higrófila, campestres ou florestais.

Nessa classe, estão incluídos os antigos Solos Orgânicos, Semi-Orgânicos, Solos Tiomórficos de constituição orgânica ou semi-orgânica e parte dos Solos Litólicos Turfosos com horizonte O hístico e 30 cm ou mais de espessura.

Planossolos

Solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguido de B plânico. Compreendem solos minerais imperfeitamente ou mal-drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B imediatamente subjacente, adensados, geralmente de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta, constituindo, por vezes, um horizonte pã. Característica distintiva marcante é a diferenciação bem-acentuada entre os horizontes A ou E ou B em razão da mudança textural abrupta entre os mesmos, requisito essencial para os solos dessa classe.

Tipicamente, um ou mais horizontes subsuperficiais apresentam-se adensados, com teores elevados de argila dispersa, constituindo, por vezes, um horizonte pã, condição que responde pela restrição à percolação de água, independentemente da posição do lençol freático, ocasionando retenção de água por algum tempo acima do horizonte B, o que se reflete em feições associadas com umidade.

Essa classe inclui os solos que foram classificados como Planossolos, Solonetz-Solodizado e Hidromórficos Cinzentos que apresentam mudança textural abrupta.

Plintossolos

São solos constituídos por material mineral com horizonte plíntico começando dentro de 40 cm, ou dentro de 200 cm quando imediatamente abaixo dos horizontes A ou E, ou subjacentes a horizontes que apresentem coloração pálida ou variegada ou com mosqueados em quantidade abundante. Formados em condições de restrição à percolação de água, sujeitos ao efeito temporário do excesso de umidade, de maneira geral imperfeitamente ou mal-drenados, que se caracterizam fundamentalmente por apresentar expressiva plintização com ou sem petroplintita ou horizonte petroplíntico.

Apesar de a coloração desses solos ser bastante variável, verifica-se o domínio das cores pálidas, com ou sem mosqueados de cores alaranjadas ou vermelhas, ou coloração variegada, acima do horizonte plíntico. Este apresenta cores acinzentadas, esbranquiçadas ou até amarelo-claras, com mosqueados predominantemente vermelhos, ou coloração variegada composta desta última com uma ou mais cores anteriores. Predominantemente, são solos fortemente ácidos, com saturação por bases baixa. Todavia, verifica-se a existência de solos com saturação por bases média a alta, como também solos com propriedades sódica e solódica.

Abrangência: estão incluídos nessa classe solos que foram reconhecidos como Lateritas Hidromórficas de modo geral, parte dos Podzólicos Plínticos, parte dos Gleis Húmico e Pouco Húmico e alguns possíveis Latossolos Plínticos.

Vertissolos

São solos constituídos por material mineral com horizonte vértico entre 25 e 100 cm de profundidade e relação textural insuficiente para caracterizar um Bt. Apresentam ainda os seguintes requisitos: teor de argila de, no mínimo, 30% nos primeiros 20 cm superficiais; fendas verticais no período seco

com, pelo menos, 1cm de largura e, no mínimo, 50 cm de profundidade; ausência de qualquer tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte vértico.

Apresentam pronunciadas mudanças de volume com o aumento do teor de umidade do solo, fendas profundas na época seca e evidências de movimentação da massa do solo. Podem ser escuros, acinzentados, amarelados ou avermelhados. Quimicamente, são solos de alta capacidade de troca de cátions, alta saturação por bases ($> 50\%$), com teores elevados de cálcio e magnésio e alta relação K_i ($> 2,0$). Textura normalmente argilosa ou muito argilosa, consistência variando de muito duros a extremamente duros quando secos, firmes a extremamente firmes quando úmidos e muito plásticos a muito pegajosos quando molhados. Nessa classe, estão incluídos todos os Vertissolos, inclusive os Hidromórficos.

Classes de solos da Região Meio-Norte do Brasil e suas potencialidades agrícolas

As classes de solos, com ocorrência de Cerrado, em maiores extensões no Meio-Norte são os Latossolos, Argissolos Vermelho-Amarelos, Plintossolos, Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos. A seguir, serão abordadas algumas considerações sobre a potencialidade dessas classes de solos.

Latossolos

Apesar de serem solos que ocorrem normalmente em relevo plano e suave-ondulado, são profundos, com boa drenagem, mas com algumas limitações: permeabilidade restrita e infiltração lenta, em razão principalmente do adensamento pedogenético que ocorre no horizonte transicional AB e/ou BA. Os Latossolos Amarelos de textura mais argilosa têm certa tendência à compactação superficial após o desmatamento para uso de lavouras e

pastagens. Apresentam ainda limitações pela sua baixíssima fertilidade, elevada acidez, alta saturação por alumínio e deficiência acentuada de micronutrientes. Os de textura muito argilosa apresentam limitações físicas em decorrência da sua forte coesão quando secos. Quanto ao uso, tem-se observado a pecuária extensiva com bovinos e ovinos e lavouras de soja, milho, feijão-caupi, arroz, mandioca, pastagens cultivadas, fruticultura tropical e extrativismo com babaçu. Embora sendo solos de baixa fertilidade natural, têm potencial para agricultura e pecuária, após correção com calcário e adubos químicos.

Argissolos Vermelho-Amarelos

Abrangem pequenas áreas sob vegetação de Cerrado. Potencialmente, nessas áreas extrai-se babaçu, sendo aproveitados também com culturas de subsistência como mandioca, arroz, milho e fruticultura tropical, principalmente manga e caju. Apresentam predominantemente textura arenosa/média e média, em relevo suave-ondulado e ondulado. A melhor opção de uso é a manutenção dos babaçuais nativos para exploração extrativista.

Plintossolos

Ocupam grandes extensões no Piauí e Maranhão, apresentando relevo predominantemente plano e suave-ondulado. Quanto ao uso agrícola, além do extrativismo de babaçu, existe grande diversificação de culturas: mandioca, arroz, feijão-caupi, milho, cana-de-açúcar, caju, banana, pastagens cultivadas e pecuária extensiva de bovinos. Os Plintossolos que ocorrem sob Cerrado são de baixa fertilidade natural, altos teores de alumínio, acidez elevada, necessitando de corretivos e adubos. De modo geral, por ocorrerem em relevo plano, a mecanização é favorecida, mas requerem muitos cuidados de conservação, principalmente quando se trata de lavouras de ciclo curto.

Anexo

Apresentam predominantemente textura arenosa e média. Na ocorrência de plintita, que caracteriza os plintossolos, quando sujeitos a ciclos de umedecimento e secamento, transformam-se gradualmente em petroplintita. Quando a petroplintita encontra-se pouco profunda, formando uma camada contínua, há limitações de drenagem, restrição ao enraizamento e entraves ao uso de equipamentos agrícolas.

Neossolos Litólicos

Ocorrem em relevo que varia desde suave-ondulado até montanhoso, sob diversos tipos de vegetação, tais como, Cerrado, Caatinga, floresta e suas transições. Quanto ao uso, esses solos são poucos utilizados com agricultura e pecuária, em razão da sua pequena espessura e por situarem-se geralmente em áreas de relevo movimentado, além de freqüente pedregosidade e rochiosidade. Observam-se pequenas culturas de subsistência em algumas áreas de relevo suave-ondulado, além de pecuária extensiva.

Neossolos Quartzarênicos

Ocorrem em relevo plano e suave-ondulado. São solos de fertilidade natural baixa e fortemente ácidos. A calagem desses solos deve ser feita com muito cuidado, a fim de não saturar o solo com cálcio e magnésio, causando desbalanço dos nutrientes (EMBRAPA, 1986). O potencial desses solos para uso com agricultura e pecuária é baixo, em virtude das características intrínsecas do solo. São bastante suscetíveis à desertificação, principalmente em áreas com ventos fortes associados a áreas destituídas de vegetação e pouca matéria orgânica, promovendo a formação de pequenas dunas. Esse processo é conhecido por arenização.

Referências

- BRADY, N. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 878 p.
- COSTA, J. V. B. da. **Caracterização e constituição do solo**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985. 527 p.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPq. Documentos, 1).
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Piauí**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS: SUDENE-DRN, 1986. 2 v. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim de Pesquisa, 36; SUDENE-DRN. Serie Recursos de Solos, 18).
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.
- OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. Jaboticabal: Funep, 2001. 414 p.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1997. 367 p.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- SILVA, L. F. da. **Solos tropicais: aspectos pedológicos, ecológicos e de manejo**. São Paulo: Terra Brasilis, 1996. 137 p.
- VIEIRA, L. S. **Manual da ciência do solo com ênfase em solos tropicais**. 2. ed. rev. ampl. São Paulo: Agronômica Ceres, 1988. 464 p.

Anexo

Fotos de perfis representativos das classes de solos do Meio-Norte



Latossolo Amarelo.



Plintossolo Argilúvico.



Neossolo Litólico.



Plintossolo Pétrico.



Neossolo Quartzarênico.

Capítulo II

Fertilidade e adubação em solos do Meio-Norte do Brasil

*Rosa Maria Mota de Alcântara
Milton José Cardoso*

Amostragem do solo, unidades utilizadas em análises químicas e transformações

Amostragem do solo

A avaliação da fertilidade de solo inicia-se na amostragem. Assim, para que a análise de solo seja eficaz, é necessário que se faça uma boa coleta da amostra.

A amostra de solo irá representar toda a área onde serão aplicados corretivos e fertilizantes, normalmente superior a 10 ou 20 ha. Em 10 hectares (profundidade de 20 cm), uma amostra de 500 g irá representar um volume de 20 milhões de kg. Considerando-se que no laboratório são tomadas para análises frações de 5 a 10 cm³ dessa amostra, sua representatividade tem enorme importância e a coleta deixa de ser prática simples, devendo ser criteriosa e seguir instruções de caráter científico (CANTARELLA, 1999).

A amostragem de solo pode ser realizada utilizando-se dois esquemas: ao acaso e sistematizado. O esquema ao acaso é o método tradicional, com seleção prévia de áreas homogêneas e coleta de amostra. Já a amostragem sistematizada é o método recomendado para a aplicação de agricultura de precisão (por meio do sistema de georreferenciamento), que permite estudar e visualizar melhor a variabilidade do solo de uma área, por exemplo, na forma de mapas de fertilidade (SOUSA; LOBATO, 2004).

Equipamentos utilizados na amostragem

Para se obter uma amostra composta, independentemente do instrumento de coleta utilizado, deve-se ter o cuidado para que cada uma das amostras simples seja coletada na mesma profundidade (SOUSA; LOBATO, 2004).

Os equipamentos mais comumente utilizados na amostragem são:

Trado Holandês - é o mais usado e apropriado para amostragem de solo em profundidade, apesar de apresentar bom desempenho em todos os tipos de solo. Exige grande esforço físico.

Trado de Rosca - indicado para solos arenosos e úmidos, tem a vantagem de coletar pequenas quantidades de solo, o que facilita a homogeneização.

Trado Calador - indicado para solos leves e úmidos. Requer a retirada do cilindro do solo amostrado com uma espátula ou outra ferramenta.

Trado Tubular - indicado para solo seco e compactado.

Pá de corte reto e enxadão - são instrumentos simples, porém, são os mais utilizados por serem mais disponíveis para o agricultor.

Época de amostragem

A definição da época de amostragem vai depender do estabelecimento da cultura:

Cultivos não estabelecidos - antes do plantio com antecedência de, pelo menos, três meses.

Cultivos estabelecidos - entre a colheita e a adubação subsequente.

A época de amostragem deve considerar as adubações já realizadas. A última adubação mineral deve ter ocorrido há, pelo menos, quatro a seis semanas e a última adubação orgânica, há oito semanas (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999).

Frequência da amostragem

A amostragem deve ser realizada em intervalos de um a quatro anos. Considera-se que áreas irrigadas devem ser amostradas anualmente. Em pastagens, a amostragem deve ser anual para espécies mais exigentes (capim colômbio e napier, sob pastoreio). Para espécies menos exigentes (braquiárias e andropogon), a amostragem deve ser feita de dois a três anos (EMBRAPA SOLOS, 2007).

Amostragem em sistema de plantio direto

Para amostragem no plantio direto, deve-se lembrar da maior variabilidade tanto horizontal quanto verticalmente, com os nutrientes e a matéria orgânica localizados na superfície (maior concentração superficial e um gradiente de concentração a partir desta). Essa variação é maior para P e K em que não é adotada a adubação a lanço (SOUSA; LOBATO, 2004).

Segundo Lima (2004), a presença dos nutrientes residuais nas linhas de plantio cria uma condição de alta variabilidade na área. Essa estratificação dos nutrientes no solo ocorre após um determinado período de adoção do plantio direto e, por isso, a profundidade de amostragem, tanto para avaliação da fertilidade quanto para necessidade de calagem, deve considerar:

Fase de estabelecimento (4-5 anos): amostragem de 0-20 cm (na forma convencional).

Sistema estabelecido (após 4-5 anos): amostragem de 0-10 cm. No sistema já implantado, para maior informação, pode-se estratificar em camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm.

A forma de coleta, o número de subamostras e o modo de adubação também são aspectos importantes na amostragem. Além da pá de corte, o trado tem sido utilizado rotineiramente, devendo haver o cuidado de não se perder a camada superficial da amostra.

A amostragem com o trado em sistema com adubação em linha tem sido recomendada de forma dirigida, ou seja, uma amostra na linha e um número variável nas entrelinhas de acordo com o espaçamento da cultura anterior. Para a cultura da soja, por exemplo, esse número é de uma coleta na linha para dez nas entrelinhas. Em sistemas bem implantados, acima de cinco anos, pode-se reduzir pela metade o número de furos na entrelinha. Nesse tipo de coleta, não se recomendam os trados de rosca. O número de subamostras deve considerar:

Aplicação de fertilizantes a lanço: na fase de implantação (4-5 anos), a amostragem casualizada em cerca de 20 pontos, a uma profundidade de 0 a 20 cm; em sistemas estabelecidos (após 4-5 anos), a amostragem deve ser casualizada em 8 a 10 pontos, com profundidade de 0 a 10 cm

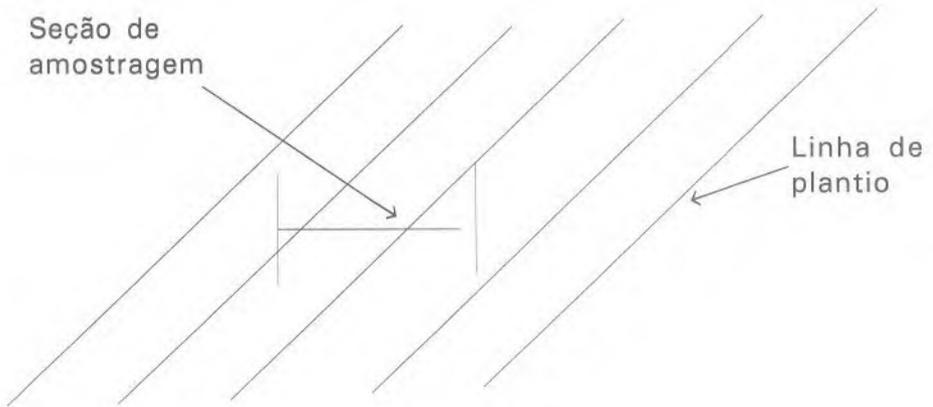


Fig. 1. Amostragem de solo em plantio direto.

Aplicação de fertilizantes em linha: na fase de implantação (4 - 5 anos), a amostragem deve ser dirigida utilizando-se trado ou uma fatia de 3 cm retirada com pá de corte, transversal à linha de plantio anterior (fig.), na profundidade de 0 a 20 cm, em no mínimo 12 a 15 locais na área de interesse; em sistemas estabelecidos (após 4 a 5 anos), a amostragem pode ser semelhante à fase de implantação, porém, em um número menor de subamostras, de 8 a 10, e em profundidade de 0 a 10 cm.

A amostragem de solo consiste na etapa inicial da avaliação da fertilidade do solo e a análise laboratorial não corrige (ou minimiza) os erros de uma amostragem inadequada, que resulta em interpretação e recomendação equivocadas com prejuízos

econômicos ao produtor e danos ao meio ambiente. O sucesso na avaliação da fertilidade é a conjugação de uma criteriosa e correta amostragem e a qualidade dos resultados obtidos nas análises laboratoriais (CANTARELLA, 1999).

Unidades utilizadas em análises químicas e transformações

Em virtude da necessidade de padronização das unidades para uniformizar a linguagem e conceitos, as mais diversas áreas da ciência adotaram o Sistema Internacional de Unidades (SI).

Unidades utilizadas em análises

As antigas unidades utilizadas em análise de solo eram:

Matéria orgânica - %.

Fósforo - ppm.

Cátions trocáveis (K, Ca, Mg e Al) - meq 100 cm⁻³.

Acidez potencial (H + Al) - meq 100 cm⁻³.

Soma de bases - meq 100 cm⁻³.

CTC - meq 100 cm⁻³.

Micronutrientes - ppm.

As principais mudanças ocorridas foram:

Matéria orgânica - g kg⁻¹.

Fósforo - mg dm⁻³.

Cátions trocáveis (K, Ca, Mg e Al) - mmol_c dm⁻³.

Acidez potencial (H + Al) - mmol_c dm⁻³.

Soma de bases - mmol_c dm⁻³.

CTC - mmol_c dm⁻³.

Micronutrientes - mg dm⁻³.

Transformação de unidades

Os resultados de cátions trocáveis (K, Ca, Mg e Al), acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB) e capacidade de troca de cátions (CTC) passaram a ter seus valores dez vezes maiores que os da representação anterior, que eram em meq 100 cm⁻³ (Tabela 1).

Os resultados de fósforo (P), enxofre (S) e micronutrientes passaram a ser representados em mg dm⁻³, o que corresponde à representação anterior em ppm. Os resultados de matéria orgânica (MO) tiveram seus valores aumentados dez vezes em relação à representação anterior em porcentagem (Tabela 1).

Por convenção, os laboratórios utilizam a unidade cmol_c dm⁻³ em substituição a mmol_c dm⁻³, considerando-se que cmol_c dm⁻³ é igual a meq 100 cm⁻³ (RAIJ, 1995).

Tabela 1. Conversão de unidades.

Unidade antiga (A)	Unidade nova (N) (N = A x F)	Fator de conversão (F)
%	g kg ⁻¹ , g dm ⁻³ , g/L	10
ppm	mg kg ⁻¹ , mg dm ⁻³ , mg/L	1
meq 100 cm ⁻³	mmol _c dm ⁻³	10
meq 100 g ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹	10
meq L ⁻¹	mmol _c L ⁻¹	1

Fonte: Raij (1995), adaptada pelo autor.

Acidez e salinidade de solos

Acidez

O conceito químico mais simples de ácido é suficiente para ilustrar as idéias relacionadas à acidez dos solos.

Ácidos são substâncias que, em solução aquosa, liberam íons hidrogênios (H^+) de acordo com a seguinte reação:



O ácido HA, em solução aquosa, dissocia-se no cátion H^+ e no ânion A^- . Ácidos fortes dissociam-se completamente; ácidos fracos (que se assemelham mais aos problemas de acidez em solos) dissociam-se muito pouco.

Pela pouca dissociação de ácidos fracos, ocorrem nas soluções aquosas concentrações muito baixas de H^+ , que são de difícil representação em frações decimais. O conceito de pH foi introduzido para representar a concentração de H^+ , sendo expresso por:

$$pH = \log 1/H^+$$

A escala de pH varia de 0 a 14. Em solos, podem ser encontrados valores de 3 a 10, com variações mais comuns em solos brasileiros entre 4,0 e 7,5. Solos com pH abaixo de 7 são considerados ácidos; os com pH acima de 7 são alcalinos.

→ Origem da acidez dos solos

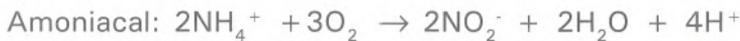
Os solos podem ser naturalmente ácidos em razão da própria pobreza em bases do material de origem ou em virtude de processos de formação que favorecem a remoção de elementos básicos como K, Ca, Mg, Na, etc. Além disso, os solos podem ter sua acidez aumentada por cultivos e adubações que levam a tal processo (LOPES; SILVA; GUILHERME, 1990).

Em qualquer caso, a acidificação se inicia, ou se acentua, em decorrência da remoção de bases da superfície dos colóides do solo.

Há duas maneiras principais que provocam a acidificação dos solos. A primeira ocorre naturalmente pela dissociação do gás carbônico: $CO_2 + H_2O \rightarrow H^+ HCO_3^-$. OH^- transfere-se então para a fase sólida do solo e libera um cátion trocável, que será

lixiviado com o bicarbonato. Esse fenômeno é favorecido por valores de pH elevados, tornando-se menos importante em pH baixo, sendo inexpressivo a pH abaixo de 5,2. Portanto, em solos muito ácidos, não é provável uma grande acidificação por meio do bicarbonato (RAIJ, 1991).

Não obstante os diversos benefícios da adubação no aumento da produtividade agropecuária, a segunda causa da acidificação é ocasionada por alguns fertilizantes (sobretudo os amoniacais e a uréia) que, durante a sua transformação no solo pelos microrganismos, resulta H^+ .



O H^+ produzido, no primeiro caso, libera um cátion trocável para a solução do solo, que será lixiviado com o ânion acompanhante, intensificando a acidificação.

Alguns autores atribuem ainda, como uma terceira causa importante da acidificação dos solos, a hidrólise do alumínio, a qual produz íons H^+ de acordo com a reação:



→ Componentes da acidez dos solos

A acidez dos solos pode ser dividida em acidez ativa e acidez potencial, e esta em acidez trocável e acidez não trocável.

Denomina-se acidez ativa a parte do hidrogênio que está dissociada, ou seja, na solução do solo, na forma de H^+ e é expressa em valores de pH.

A acidez trocável refere-se aos íons H^+ e Al^{3+} que estão retidos na superfície dos colóides por forças eletrostáticas. A quantidade de hidrogênio trocável, em condições naturais, parece ser pequena. A acidez não trocável é representada pelo hidrogênio de ligação covalente,

associado aos colóides com carga negativa variável e aos compostos de alumínio. A acidez potencial corresponde à soma da acidez trocável e da acidez não trocável do solo (LOPES; SILVA; GUILHERME, 1990).

Acidez ativa H^+ da solução do solo.

Acidez trocável..... Al^{3+} trocável + H^+ trocável.

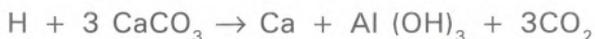
Acidez não trocável.... H^+ de ligação covalente.

Acidez potencial Al^{3+} trocável + H^+ trocável + H^+ de ligação covalente.

Dentre os conceitos citados, a maior preocupação do agricultor deve ser em corrigir a maior parte da acidez potencial, que é a mais prejudicial ao crescimento da maioria das plantas.

→ Reação no solo

Quando se aplica um corretivo da acidez no solo, na maioria das vezes calcário (carbonato de cálcio e carbonato de magnésio), as reações resultantes são as seguintes:



Da mesma forma representada acima, acontece com o carbonato de magnésio. Os carbonatos de Ca ou de Mg reagem com o hidrogênio do solo liberando água e gás carbônico. O alumínio é insolubilizado na forma de hidróxido.

No caso de outros corretivos da acidez de solo, que não o calcário, como a cal virgem (CaO), a cal hidratada $Ca(OH)_2$, o calcário calcinado, que são quimicamente bases fortes, o mecanismo de neutralização da acidez do solo baseia-se na reação da hidroxila (OH^-) com o H^+ da solução do solo.

→ Conceitos básicos sobre CTC

A capacidade de troca de cátions dos solos é de grande importância na agricultura. Assim sendo, alguns conceitos são muito importantes no manejo da fertilidade do solo.

a) CTC efetiva

É representada pela letra “t” e reflete a capacidade de troca de cátions efetiva do solo, ou melhor, a capacidade de o solo reter cátions em seu pH natural. Qualquer que seja o valor do pH do solo, as cargas negativas ocupadas pelo H^+ não estão disponíveis para retenção de outro cátion por troca.

$$t \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = Al^{3+} + Ca^{+2} + Mg^{+2} + K^+$$

Supondo-se o cultivo do solo ao valor do pH natural, a correta interpretação do valor da CTC efetiva fornece uma idéia das possibilidades de perdas de cátions por lixiviação, do potencial de salinidade e da necessidade de parcelamento das adubações potássicas.

É importante observar que na definição da CTC efetiva aparece um cátion de caráter ácido, o alumínio, que além de não ser essencial, é tóxico às plantas, e três cátions de caráter básico, cálcio, magnésio e potássio, que são essenciais às plantas. Portanto, devem-se considerá-los distintamente, o que é feito com base nos dois conceitos a seguir.

b) Soma de bases

É representada pelas letras “SB” e, como o próprio nome indica, reflete a soma de cálcio, magnésio e potássio trocáveis.

$$SB \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = Ca^{+2} + Mg^{+2} + K^+$$

A soma de bases não é uma medida muito importante por englobar três bases e, portanto, não dá uma idéia dos valores absolutos de cada uma delas.

Muitas vezes, o solo não será cultivado em seu pH natural, dada a necessidade da calagem. Portanto, sua CTC será alterada, de forma que a determinação da porcentagem de saturação de bases da CTC efetiva ou da porcentagem de saturação de cada uma das bases em relação à CTC efetiva perde o significado (LOPES, 1989).

c) Porcentagem de saturação por alumínio

É representada pela letra "m", expressando a fração da CTC efetiva que é ocupada por alumínio trocável

$$m (\%) = \text{Al}^{3+}/t \times 100$$

Quando se faz a interpretação de resultados da análise química de um dado solo, um dos pontos mais importantes é avaliar o teor de alumínio trocável.

Os conceitos até então discutidos estão relacionados com a CTC do solo em seu pH natural ou, de outra forma, com as condições prevalentes no solo em seu pH natural. Todavia, sabe-se que muitas vezes o solo não será cultivado na sua condição natural de pH. Assim sendo, os dois conceitos a seguir aplicam-se a uma condição de pH ideal para cultivo do solo.

d) CTC potencial

É representada pela letra "T" e reflete a capacidade de o solo reter cátions a pH 7,0. Portanto, é também conhecida por CTC a pH 7,0.

Do ponto de vista prático, é o valor da CTC de um solo, caso a sua calagem fosse feita para elevar o pH a 7,0. Partindo-se de um solo ácido, a elevação do pH para 7,0 promove a neutralização de cátions H^+ que se encontram em ligações

covalentes com o oxigênio de colóides orgânicos e de óxidos de ferro e de alumínio. Com isso, são desenvolvidas cargas negativas que existiam apenas em potencial.

Na análise química do solo, obtém-se o valor de T a partir da extração de $H^+ + Al^{+3}$ com solução salina tamponada a pH 7,0. O valor de T pode ser calculado por:

$$T \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = SB + H^+ + Al^{+3}$$

ou

$$T \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = t + H^+$$

Finalmente, deve-se destacar que o ganho em CTC pela neutralização de H^+ adsorvidos será tanto maior quanto mais baixo for o pH natural do solo e quanto maior for o teor de matéria orgânica e de óxidos de ferro e de alumínio do solo. Os colóides orgânicos são os principais responsáveis por tal ganho.

e) Porcentagem de saturação por bases

Essa propriedade, representada por "V", reflete quantos por cento da CTC a pH 7,0 estão ocupados pelas bases existentes no solo. O valor de V será dado por:

$$V (\%) = SB/T \times 100$$

Supondo-se a elevação do pH do solo para 7,0, sem aumento do teor das bases Ca, Mg e K, a porcentagem de saturação de bases no complexo de troca será reduzida, pois há aumento da CTC com o aumento de pH e a CTC passa de t para T.

Portanto, pelo nível de manejo da fertilidade do solo, o aumento do pH do solo deve ser feito com corretivos que adicionem bases ao solo, de forma a elevar também a saturação de bases. Essa é uma das razões do uso do calcário, pois, além de elevar o pH do solo, esse corretivo adicionará cálcio e magnésio ao solo (LOPES; GUILHERME, 1990).

Assim sendo, a porcentagem de saturação de bases é um parâmetro muito usado para recomendação de calagem.

Salinidade

Salinização é o termo utilizado para se designar o processo de acúmulo de sais na camada superficial do solo, prejudiciais às culturas que nele crescem, tanto cultivadas como nativas. Os principais íons que podem formar sais são Ca, Na, Mg e K.

A salinização não ocorre somente em áreas próximas ao mar. Pode ocorrer também em zonas de clima semi-áridas ou subúmidas e em regiões desérticas, ou seja, em zonas cuja concentração de chuvas é muito baixa e localizada em algumas semanas do ano.

Como exemplo, tem-se a Austrália, que apresentava mares internos, os quais, com o passar dos anos, evaporaram-se, ficando somente o sal na superfície do solo. Nessa região, a presença de ventos constantes causa problemas de salinização de solos, por meio da ação dos ventos como transportadores de sais. Também, na região costeira do Sul do Brasil, a salinização é, na sua maioria, causada por utilização de água para irrigação, com alta concentração de sais (WINKEL; TSCHIEDEL, 2005).

A salinização também pode ocorrer em locais onde a precipitação pluviométrica é normal, mas os solos se apresentam compactados e, como consequência, os sais não podem ser lixiviados pela água por não permitirem a infiltração da mesma. Também pode ocorrer em locais onde a insolação é insuficiente para aquecer o solo e provocar a evaporação. Como prova disso, podem-se encontrar solos salinos até no círculo polar ártico. Como se pode ver, há problema de salinização de solos nas mais diversas regiões do mundo (PRIMAVESI, 1998).

→ Razões de salinização

- Irrigação malfeita em áreas maiores que a capacidade de seus recursos hídricos e mecânicos.
- Destruição da vegetação nativa.
- Ausência de drenagem adequada.
- Formação de crostas ou compactações superficiais.
- Solo com a sua bioestrutura decaída.
- Nível do lençol freático muito superficial, dificultando a drenagem desses solos.
- Manejo inadequado do solo e da água.

→ Processo de salinização

Quando o solo é compactado na superfície, a infiltração é deficiente. Como consequência, há uma maior deficiência de oxigênio no solo, causando uma maior transpiração das plantas, apesar de a água disponível estar em menor quantidade. A evaporação em solos compactados é maior em razão de eles se aquecerem com maior facilidade ao sol.

Conforme a estrutura dos solos, grumosos ou compactados, podem ter comportamentos diferentes perante a salinidade. Em solos grumosos, com nível freático baixo, a diminuição da água de irrigação pode atrasar a salinização, evitando que o nível freático se eleve. Em solos compactados, com superfície impermeável, a diminuição da água de irrigação não diminui o fornecimento de sais; o correto é o aumento da água de irrigação para que os sais sejam lixiviados. Obviamente que esse aumento de irrigação deve ser feito com água que tenha baixa concentração de sais.

Dinâmica e disponibilidade de nutrientes

Os elementos minerais classificam-se em:

- Essenciais – são os nutrientes minerais sem os quais as plantas não vivem; N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn e Co.
- Úteis – as plantas vivem sem eles, porém, não realizam determinadas funções, pois sua presença contribui para o crescimento, produção ou para resistência a condições desfavoráveis: Na e Si.
- Tóxicos – são prejudiciais às plantas: Br, Cd, Pb, Cr, F, I, Ni, Se e Al.

Nitrogênio

O nitrogênio destaca-se dos demais nutrientes por apresentar acentuado dinamismo no sistema solo e por ser, normalmente, o nutriente exigido em maior quantidade pelas culturas (MALAVOLTA, 1980).

Esse nutriente apresenta uma dinâmica complexa, traduzida por mobilidade no solo e por diversas transformações em reações mediadas por micronutrientes. Além da movimentação em profundidade, principalmente na forma nítrica, o nitrogênio pode transformar-se em formas gasosas, resultando em perdas por volatilização.

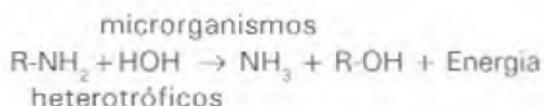
→ Ciclo e formas do nitrogênio no solo

Ao contrário dos demais nutrientes, o nitrogênio praticamente não é fornecido ao solo pelas rochas de origem. Em última instância, a fonte de nitrogênio para as plantas é o gás N_2 que constitui 78% da atmosfera terrestre. Na sua forma elementar, entretanto, o nitrogênio não é absorvido pelas plantas. Assim sendo, essa fonte inesgotável de nitrogênio, para ser utilizada pelas plantas, precisa ser transformada em formas orgânicas ou inorgânicas, aproveitáveis pelas plantas (RAIJ, 1991).

→ Transformações do nitrogênio no solo

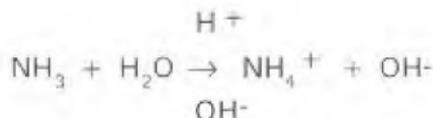
♦ Mineralização

O processo pelo qual o nitrogênio orgânico (98% a 99%) é convertido em nitrogênio mineral ou inorgânico é denominado mineralização. Essa transformação do nitrogênio ocorre à medida que os microrganismos decompõem a matéria orgânica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989).



As aminas e aminoácidos liberados são utilizados por vários microrganismos heterotróficos, com a conseqüente liberação de amônio. Essa é considerada a segunda etapa da mineralização, denominada de amonificação.

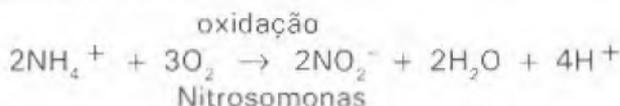
Em condições de pH abaixo de 7,0, praticamente toda a amônia é convertida em íons amônio. O amônio é, portanto, a primeira forma de nitrogênio mineral formada, disponível para as plantas.



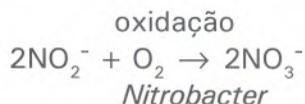
♦ Nitrificação

A transformação do amônio em nitrato ocorre em duas etapas, sendo mediada por bactérias do gênero *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, que são quimioautotróficas obrigatoriamente aeróbicas.

As bactérias do gênero *Nitrosomonas* promovem a oxidação do amônio para nitrito, numa reação que se destaca no sistema solo pela geração de acidez.

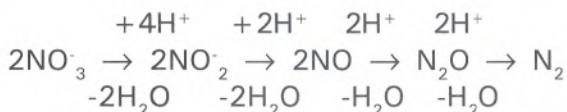


O nitrito é formado como produto intermediário, pois é rapidamente oxidado a nitrato, pela ação das bactérias do gênero *Nitrobacter*.



◆ *Desnitrificação*

Com a inundação do solo, algumas bactérias aeróbicas facultativas passam a utilizar o nitrato em vez de oxigênio como receptor de elétrons em seus processos metabólicos. Com o sucessivo abaixamento do potencial redox, formam-se os gases N_2O e N_2 que são perdidos por volatilização. Portanto, a desnitrificação representa o processo final de retorno do N_2 fixado ao solo para a atmosfera (VALE;GUILHERME; GUEDES, 1995).



Fósforo

Entre os macronutrientes, o fósforo é o exigido em menores quantidades pelas plantas. Todavia, trata-se do nutriente aplicado em maiores quantidades em adubação no Brasil. A explicação para esse fato relaciona-se com a baixa disponibilidade de fósforo nos solos do Brasil e também com a forte tendência de o fósforo aplicado ao solo reagir com os próprios componentes para formar compostos de baixa solubilidade (SOUSA; LOBATO, 2004).

→ Formas e dinâmica do fósforo no solo

◆ *Fósforo na solução*

As formas de fósforo na solução do solo dependem diretamente da sua acidez. Considerando-se que a maioria dos

solos apresenta pH na faixa de 4 a 9, as formas predominantes são H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , com a quantidade de cada uma dependendo do pH da solução. A pH igual a 7,2, as quantidades se equivalem. Abaixo desse valor, condição existente na grande maioria dos solos cultivados, H_2PO_4^- é a forma predominante (VALE;GUILHERME; GUEDES, 1995).

◆ *Fósforo precipitado*

A precipitação em solos ácidos ocorre com íons alumínio ou ferro presentes na solução e, no caso de solos alcalinos, com íons cálcio.

Assim, no caso de solos ácidos, a calagem prévia, ao promover a neutralização do alumínio e de grande parte do ferro, reduz a fixação do fósforo via precipitação. De outro lado, o uso excessivo de calcário promoverá, a pH acima de 7,0, novo aumento da fixação, via precipitação do fosfato com cálcio.

◆ *Fósforo adsorvido*

O outro mecanismo envolvido via remoção do fósforo da solução, fixação de fósforo é a reação de adsorção na superfície de argilas, óxidos hidratados de ferro e de alumínio ou de carbonato de cálcio em solos calcários. A adsorção de fosfato ocorre por meio de ligação covalente de alta energia, todavia, pelo menos parte do fosfato adsorvido permanece por certo tempo na forma lábil, ou seja, pode retornar à solução (RAIJ, 1991).

◆ *Fósforo mineralogicamente estável*

O fósforo removido da solução por precipitação ou adsorção, com o passar do tempo, tende a formar ligações mais estáveis com Al, Fe ou Ca, resultando de formação de compostos mineralogicamente estáveis. Com o passar do tempo, por meio

de reações lentas, o fósforo lábil torna-se P não lábil, que constitui, portanto, o fósforo mineralogicamente estável.

Essa é uma particularidade do fósforo na dinâmica dos nutrientes no solo, considerando-se que é o único nutriente que “envelhece” no solo. Tal envelhecimento, passando da forma lábil para a não lábil, implica a diminuição da disponibilidade do fósforo aplicado ao solo em adubações com o passar do tempo (VALE;GUILHERME; GUEDES, 1995).

◆ *Fósforo orgânico*

O fósforo orgânico pode representar de 20% a 70% do fósforo total da camada arável. Logicamente, a sua contribuição será tanto maior quanto maior for o teor de matéria orgânica no solo (RAIJ, 1991).

O fósforo orgânico apresenta-se basicamente na forma de ésteres do ácido ortofosfórico, principalmente representados por fosfatos de inositol, fosfolipídeos, ácidos nucleicos, nucleotídeos e açúcares fosfatados.

Potássio

O potássio é absorvido pelas plantas em grandes quantidades. Para várias espécies, como banana, citros, abacaxi e batata, a exigência é muito maior do que para o nitrogênio.

Além de sua importância na produção vegetal propriamente dita, o potássio é muitas vezes associado a uma maior resistência das plantas a condições adversas, tais como, baixa disponibilidade de água e extremos de temperatura. Esse nutriente, mais do que qualquer outro, é conhecido por reduzir a incidência de doenças-ataque de insetos. É normalmente descrito como o “nutriente da qualidade” na produção vegetal (SOUSA; LOBATO, 2004).

→ Formas e dinâmica do potássio no solo

◆ *Potássio na solução*

A solução do solo é a fonte imediata de potássio para as plantas. Apesar de muito variável, o potássio na solução do solo representa apenas uma pequena fração do potássio trocável.

A concentração de potássio na solução controla a difusão desse nutriente até a superfície das raízes; portanto, controla a absorção de potássio pelas plantas. Assim como o fósforo, o potássio depende largamente da difusão para chegar na superfície das raízes. Todavia, como a concentração de potássio é muito maior que a de fósforo, sua dependência na difusão é menos crítica. De qualquer forma, os fatores que afetam a difusão afetam sobremaneira a disponibilidade de potássio (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

◆ *Potássio trocável*

O potássio trocável representa a fração do potássio da fase sólida capaz de prontamente ressuprir a solução do solo, à medida que a planta absorve esse nutriente. Em outras palavras, é representado pelos íons K^+ adsorvidos nas cargas negativas dos colóides do solo por atração eletrostática, facilmente deslocados ou trocados por outros cátions da solução.

Em solos de clima temperado, o potássio trocável usualmente apresenta menos de 1% do potássio total do solo. De outro lado, em solos tropicais, que na sua maioria só contêm colóides orgânicos, caulinita e óxidos hidratados de ferro e de alumínio como materiais responsáveis pela capacidade de retenção de cátions, o potássio trocável pode representar até 10% do potássio (RAIJ, 1991).

◆ *Potássio não trocável*

Em razão de o raio iônico dos íons K^+ ser praticamente do tamanho do espaço existente entre as camadas de argilas do tipo 2:1, notadamente de illita e vermiculita, os sítios de adsorção representados pelas cargas negativas apresentam elevada especificidade ou seletividade para o potássio (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

Embora a reserva de potássio não trocável não seja prontamente disponível, esta pode vir a exercer importante papel no suprimento de potássio às plantas em médio/longo prazo, após esgotamento do potássio trocável. Com o abaixamento da concentração de potássio na solução do solo e o aumento da concentração de íons H^+ , exsudato pela raiz com a absorção de K^+ , aumenta a liberação de K^+ fixado em troca com íons H^+ .

◆ *Potássio mineral*

O potássio mineral representa o potássio estrutural, ou seja, o potássio como constituinte de minerais primários.

A liberação do potássio mineral para a solução do solo ocorre por meio da intemperização dos minerais primários, caracterizando-se por um processo relativamente lento. De qualquer forma, trata-se da principal fonte de potássio para as plantas em condições naturais (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

◆ *Potássio lixiviado*

O potássio lixiviado não representa uma forma de potássio propriamente dita, mesmo porque pode tratar-se de potássio em solução, potássio trocável ou não trocável. Apenas refere-se ao potássio removido para camadas mais profundas, com o movimento descendente da água.

A quantidade de potássio que lixivia para debaixo da camada do solo ocupada pelas raízes depende do volume de água percolado,

da concentração desse nutriente na solução do solo, da CTC do solo, do tipo de ânions presente na solução da cobertura vegetal e do método de aplicação do potássio (SOUSA; LOBATO, 2004).

Cálcio

Merece destaque especial a importância que o cálcio assume no crescimento radicular, por intermédio de seu papel na divisão e alongação celular. Trata-se do único nutriente, cujo suprimento externo às raízes é crucial para o seu crescimento. Portanto, em solos altamente intemperizados e ácidos, o crescimento radicular pode ser grandemente reduzido, principalmente abaixo da camada arável, em virtude da baixa disponibilidade de cálcio (MALAVOLTA, 1980).

→ Formas e dinâmica do cálcio no solo

◆ *Cálcio na solução*

O cálcio, exceto em solos altamente intemperizados e ácidos, apresenta-se na solução do solo em concentrações relativamente elevadas. Em média, a concentração de Ca^+ é cerca de dez vezes maior que a de K^+ , embora o cálcio seja bem menos absorvido pelas plantas do que o potássio (MALAVOLTA, 1980).

Quando ocorre menor disponibilidade de cálcio no solo, com o cultivo de espécies muito exigentes por esse nutriente, a disponibilidade pode depender da difusão. Nessa situação, principalmente em períodos de grande exigência desse nutriente, pode haver necessidade de adubação com cálcio. Não se deve esquecer que o cálcio é praticamente imóvel na planta; portanto, um contínuo suprimento é essencial (SOUSA; LOBATO, 2004).

◆ Cálcio trocável

Assim como acontece com os demais cátions, o cálcio da solução do solo está em equilíbrio dinâmico com o cálcio trocável, ou seja, com cálcio adsorvido nos colóides orgânicos ou inorgânicos. Se a atividade do cálcio decresce na solução por meio da absorção pelas plantas ou da lixiviação, há um deslocamento de íons cálcio da fase sólida para a fase líquida. De outro lado, se a atividade do cálcio na solução aumenta por meio da calagem ou da adubação, há uma adsorção dos íons cálcio pelos colóides (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

◆ Cálcio mineral

A anortita $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ é o mais importante mineral primário contendo cálcio. A augita e hornblenda também são comuns e contêm cálcio. Pequenas quantidades de cálcio também podem-se originar da biotita, apatita e certos borossilicatos (MALAVOLTA, 1980).

A calcita normalmente é o mineral dominante como fonte de cálcio em solos de regiões áridas e semi-áridas. Nessas condições, a dolomita e o gesso também podem-se fazer presentes. Os solos dessas regiões, geralmente, são ricos em cálcio como resultado da baixa precipitação e, conseqüentemente, da baixa lixiviação (RAIJ, 1991).

◆ Cálcio lixiviado

O cálcio lixiviado não representa uma forma de cálcio propriamente dita mesmo porque pode tratar-se de cálcio em solução ou de cálcio trocável. Apenas refere-se ao cálcio removido para camadas mais profundas com a percolação de água (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

Como o cálcio é mais fortemente adsorvido que o amônio, o potássio e o magnésio, sua lixiviação não é tão intensa e não chega a preocupar em termos de perdas.

Magnésio

O magnésio é pouco exigido pelas plantas, com exigência similar ao fósforo e enxofre. Com isso, e considerando-se que a disponibilidade de magnésio é satisfatória na maioria dos solos, a deficiência desse nutriente não é muito comum.

Entretanto, podem surgir problemas com o suprimento de magnésio nas seguintes situações: em solos ácidos altamente intemperizados; em solos arenosos; em solos ácidos cultivados com aplicação de altas doses de calcário pobre em magnésio; em cultivo com adubações pesadas de potássio ou amônio; em cultivo de espécies mais exigentes em magnésio.

→ Formas e dinâmica do magnésio no solo

◆ *Magnésio na solução*

A solução do solo é a fonte imediata de magnésio para as plantas. Exceto em solos ácidos altamente intemperizados ou em certos solos arenosos, a concentração de magnésio na solução do solo é relativamente elevada (MALAVOLTA, 1980).

Com isso, e em razão da baixa demanda das plantas por esse nutriente, o transporte de magnésio por fluxo de massa quase sempre é suficiente para atender à necessidade das plantas. Isso, em alguns casos, sem contar a contribuição da interceptação radicular (MALAVOLTA, 1980).

◆ *Magnésio trocável*

O magnésio trocável é representado pelos íons Mg^{+2} adsorvidos nas cargas negativas dos colóides do solo por atração eletrostática, facilmente deslocados ou trocados por outros cátions da solução. Enfim, trata-se do magnésio da fase sólida capaz de prontamente ressuprir a solução do solo, à medida que as plantas absorvem esse nutriente (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

◆ *Magnésio mineral*

Em solos bem menos intemperizados, o magnésio presente em minerais primários, tais como, biotita, dolomita, hornblenda, olivina e serpentina, pode ser importante para a disponibilidade desse nutriente, embora a taxa de liberação seja lenta em comparação com a demanda das plantas (MALAVOLTA, 1980).

◆ *Magnésio lixiviado*

O magnésio lixiviado não representa uma forma de magnésio propriamente dita, mesmo porque pode tratar-se de magnésio em solução ou de magnésio trocável. É apresentado na dinâmica do magnésio no solo para destacar a possibilidade de lixiviação desse nutriente para camadas do solo abaixo do alcance das raízes (RAIJ, 1991).

Como o magnésio é menos fortemente adsorvido que o cálcio, pois o magnésio apresenta raio iônico hidratado maior que o cálcio, a sua lixiviação tende a ser mais intensa que a do cálcio.

Enxofre

O enxofre é exigido pelas plantas em quantidades aproximadamente iguais às do fósforo. Entretanto, diferentemente do fósforo, trata-se de um nutriente que, na maioria das vezes, não faz parte das principais preocupações do agricultor e até mesmo do técnico. A razão é muito simples e está ligada ao fato de o enxofre apresentar muito menor tendência de reagir com componentes do solo. Portanto, está sempre muito mais disponível que o fósforo (RAIJ, 1991).

Com a tendência de uso cada vez maior de fertilizantes concentrados sem enxofre e com a exploração de solos de fertilidade mais baixa, muitas vezes em cultivo intenso e buscando-se altas produtividades, há a necessidade de se estar muito atento para a capacidade de o solo em suprir enxofre (SOUSA; LOBATO, 2004).

→ Formas e dinâmica do enxofre no solo

◆ *Enxofre na solução*

O enxofre ocorre na solução do solo na forma de SO_4^{-2} , que é a forma absorvida pelas raízes das plantas. Trata-se de uma forma bastante solúvel. Ao formar pares iônicos com Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ , lixivia com relativa facilidade no solo. A perda de sulfato é maior com o predomínio de K^+ e Na^+ na solução, quando comparada com Ca^{+2} e Mg^{+2} (MALAVOLTA, 1980).

Assim, principalmente em solos cultivados que recebem muito cálcio e magnésio via calagem, e potássio via adubação, a tendência do sulfato é movimentar-se para camadas subsuperficiais. Nesse sentido, é preciso considerar que, na camada arável dos solos, o sulfato sofre competição na adsorção com as hidroxilas do calcário e com o fosfato da adubação. Portanto, tende a ficar mais em solução (RAIJ, 1991).

◆ *Enxofre adsorvido*

Os íons sulfato em solução, à semelhança do que ocorre com os íons fosfato, podem ser adsorvidos nas superfícies de óxidos de ferro e do alumínio. Todavia, a sua capacidade de adsorção, quando em competição com fosfato e hidroxila, é muito pequena (MALAVOLTA, 1980).

Observa-se que a adsorção do sulfato ocorre quase que exclusivamente nas superfícies com cargas positivas, ou seja, por adsorção eletrostática na substituição de grupos "aquo". Portanto, além de depender do teor de óxido de ferro e de alumínio a adsorção de sulfato depende do pH do solo (RAIJ, 1991).

◆ *Enxofre Orgânico*

Em geral, mais de 90% do enxofre total da camada arável do solo encontra-se em formas orgânicas. Assim, observam-se altas

correlações entre os teores de matéria orgânica e os teores de enxofre total ou orgânico (MALAVOLTA, 1980).

Portanto, a mineralização é o processo natural de maior importância para a disponibilidade às plantas, já que as formas orgânicas constituem a maior parte do enxofre do solo. Aproximadamente, para cada 1% de matéria orgânica no solo, a sua capacidade natural de suprimento de enxofre varia de 1 a 4 kg S/ha/cultivo (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

Micronutrientes no solo

Os micronutrientes das plantas são o ferro, o cobre, o manganês, o zinco, o molibdênio, o boro e o cloro. É possível que novos elementos sejam acrescentados a essa lista, com o avanço do estudo do metabolismo das plantas, como o cobalto, considerado atualmente micronutriente essencial em razão da sua atuação na fixação biológica (SOUSA; LOBATO, 2004).

Os micronutrientes ocorrem em teores muito baixos no solo. O ferro pode ser considerado exceção, assim como o manganês em alguns solos. Mas são exigidos em quantidades quase negligíveis pelas plantas.

A razão da pouca exigência está ligada ao fato de que a principal função de quase todos é a de atuarem como catalisadores de reações enzimáticas, muitas vezes formando metaloenzimas. Muitos dos sistemas enzimáticos são comuns entre plantas e animais, de forma que, exceto o boro e o cloro, os demais também são essenciais aos animais (MALAVOLTA, 1980).

→ Formas e dinâmica dos micronutrientes no solo

◆ *Micronutrientes na solução do solo*

A baixa solubilidade dos compostos inorgânicos contendo Fe^{+3} limita grandemente a disponibilidade e a absorção dessa forma oxidada.

De qualquer forma, a solubilidade de ferro é praticamente controlada pelos óxidos hidratados de Fe^{+3} , pois o Fe^{+2} contribui muito pouco para o total de ferro solúvel em solos aerados (MALAVOLTA, 1980).

O cobre é mais fortemente retido por radicais orgânicos que qualquer outro micronutriente. Muitos dos complexos ou quelados formados são solúveis. Em decorrência dessa forte interação, mais de 98% do cobre da solução está ligado a compostos orgânicos solúveis (RAIJ, 1991).

A concentração de Mn^{+2} na solução, à semelhança do ferro, também depende de reações de oxirredução, de forma que a sua disponibilidade depende do teor da matéria orgânica, da atividade microbiana e da umidade do solo (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

O zinco ocorre na solução do solo na forma de Zn^{+2} , que é a forma absorvida pelas plantas. Sua concentração também diminui cerca de cem vezes para cada aumento de uma unidade de pH (MALAVOLTA, 1980).

Na faixa de pH da maioria dos solos cultivados, o boro ocorre na solução do solo na forma de ácido bórico não dissociado (H_3BO_3). É, portanto, o único nutriente que ocorre na solução na forma neutra. Por essa razão, é um micronutriente muito suscetível a perdas por lixiviação (RAIJ, 1991).

O cloro ocorre na solução do solo na forma de Cl^- e tem um comportamento muito similar ao NO_3^- quanto à adsorção em cargas positivas. A deficiência de cloro é extremamente rara. Ao contrário, os maiores problemas estão associados à toxidez (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

◆ *Micronutriente adsorvido*

A adsorção representa, geralmente, um importante processo de manutenção dos nutrientes no sistema solo, em forma capaz de ressuprir a solução prontamente. Os micronutrientes catiônicos podem ser adsorvidos em cargas negativas de colóides orgânicos ou de argilas (SOUSA; LOBATO, 2004).

O cobre é também o micronutriente mais fortemente adsorvido por óxidos hidratados de ferro e de alumínio. Como esses óxidos possuem cargas dependentes de pH, a adsorção dos micronutrientes catiônicos aumenta com o pH do solo (MALAVOLTA, 1980).

O molibdênio tem um comportamento químico no solo muito semelhante ao do fósforo. Dessa forma, o molibdato é adsorvido por óxidos hidratados de ferro e de alumínio de maneira análoga ao fosfato. A adsorção do molibdato também é específica e, entre os ânions, só é menos fortemente adsorvido que o fosfato (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

Apesar de se fazer presente na solução do solo apenas na forma neutra, o boro pode ser adsorvido principalmente por óxidos hidratados de ferro ou de alumínio, formando um complexo borato-diol. A adsorção é dependente do pH do solo, sendo maior em torno de pH 7 para $Al(OH)_3$ e em torno de pH 9 para $Fe(OH)_3$ (RAIJ, 1991).

O boro é mais fortemente adsorvido pelos colóides orgânicos do que pelas argilas. A exata forma de combinação entre o boro e a matéria orgânica não é conhecida, mas acredita-se na formação de compostos do tipo diol, por meio da ligação a grupos carboxílicos e/ou fenólicos (VALE; GUILHERME; GUEDES, 1995).

Conforme já ressaltado, o Cl^- tem um comportamento muito similar ao NO_3^- quanto à adsorção em cargas positivas. Trata-se, portanto, do micronutriente com menor poder de adsorção (MALAVOLTA, 1980).

◆ *Micronutriente precipitado*

Os micronutrientes, principalmente os catiônicos, reagem com espécies iônicas da solução formando precipitados. Nesse caso, a disponibilidade de micronutrientes, ou seja, o seu retorno à solução do solo depende da solubilidade dos compostos formados (SOUSA; LOBATO, 2004).

Os micronutrientes catiônicos reagem com OH^- da solução formando hidróxidos, que são compostos de baixa solubilidade, principalmente o hidróxido férrico. Assim, o micronutriente livre na solução, não protegido por radical orgânico, fica muito sujeito à precipitação, principalmente com a elevação do pH (RAIJ, 1991).

◆ *Micronutriente mineralogicamente estável*

A presença do micronutriente em forma mineralogicamente estável como mineral primário apenas contribui com o suprimento de micronutrientes para a solução por meio do processo de intemperização, que é muito lento (MALAVOLTA, 1980).

A calcopirita (CuFeS_2) é o mineral de cobre mais comum, seguido da calcocita (Cu_2S) e bornita (CuFeS_4). Alguns minerais mais comuns contendo ferro são olivina [$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$], pirita (FeS_2), hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4) (RAIJ, 1991).

Os principais minerais contendo zinco são a esfalerita (ZnS) e a hemifortita ($\text{Zn}_4(\text{OH})_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$), enquanto o manganês ocorre em compostos ferro-magnesianos, tais como, augita, hornblenda e biotita. O molibdênio basicamente ocorre na forma de molibdatos de cálcio e de óxidos hidratados de molibdênio. O principal mineral contendo boro é a turmalina, um borosilicato complexo (MALAVOLTA, 1980).

Correção e adubação do solo

Calagem

A calagem é a aplicação de calcário, cuja função é fornecer cálcio e magnésio para o solo e diminuir ou eliminar os efeitos tóxicos do alumínio (LOPES, 1989).

◆ *Vantagens*

- Aumenta a disponibilidade dos nutrientes.

- Favorece a atividade dos microorganismos.
- Melhora as propriedades físicas do solo.
- Melhora a fixação simbiótica de N pelas leguminosas.

→ Corretivos de acidez do solo

A qualidade dos corretivos é determinada em razão da granulometria e do teor de neutralizantes.

◆ **Granulometria** é o grau de moagem do material que, de acordo com a legislação brasileira, deve possuir as seguintes características:

Passar 100% em peneira de 2,00 mm (ABNT nº 10)

Passar 70% em peneira de 0,84 mm (ABNT nº 20)

Passar 50% em peneira de 0,30 mm (ABNT nº 50)

◆ **Teor de neutralizantes** é avaliado pela determinação do poder de neutralização (PN), que é a capacidade potencial de um corretivo neutralizar a acidez do solo (Tabela 2).

Tabela 2. Características mínimas quanto ao PN, CaO e MgO.

Materiais corretivos da acidez	PN	Soma
	% ECaCO_3	% CaO + % MgO
Calcário	67	38
Cal virgem agrícola	125	68
Cal hidratada agrícola	94	50
Escórias	60	30
Calcário calcinado agrícola	80	43
Outros	67	38

O Poder Relativo de Neutralização Total – PRNT integra a granulometria e o teor de neutralizantes.

$$\text{PRNT} = \text{PN} \times \text{RE}/100$$

◆ Classificação dos corretivos

Os corretivos são classificados quanto à:

a) Concentração de MgO:

Calcínicos – menos de 5%.

Magnesianos – de 5% a 12%.

Dolomíticos – acima de 12%.

b) PRNT:

Faixa A – PRNT de 45% a 60% .

Faixa B – PRNT de 60,1% a 75% .

Faixa C – PRNT de 75,1% a 90% .

Faixa D – PRNT > 90% .

Métodos utilizados para a determinação da Necessidade de Calcário

Existem inúmeros métodos com o objetivo de estimar a quantidade de calcário a ser aplicada. Nos trabalhos rotineiros, utilizam-se os seguintes métodos:

◆ *Método segundo o alumínio trocável – utilizado quando a soma de cálcio e magnésio é igual ou > 2 cmol_c dm⁻³*

$$\text{NC (t ha}^{-1}\text{)} = \text{Al}^{3+}(\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}) \times 2 \times 100/\text{PRNT}$$

◆ *Método segundo o cálcio + magnésio trocáveis – utilizado quando a soma de cálcio e magnésio é < 2 cmol_c dm⁻³*

$$\text{NC (t ha}^{-1}\text{)} = 2 \cdot (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}) \times 100/\text{PRNT}$$

Geralmente quando os teores de cálcio e de magnésio são menores que 2 cmol_c dm⁻³, utiliza-se o maior resultado obtido entre os dois métodos. Para olerícolas e culturas irrigadas, o valor 2 é substituído por 3 na fórmula do segundo método (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999).

◆ *Modo de aplicação do calcário*

A calagem pode ser praticada em qualquer época, contudo, recomenda-se que seja realizada pelos menos um a três meses antes do plantio, em solo úmido.

A aplicação deve ser a lanço sobre a superfície do solo, seguida de incorporação a uma profundidade de 20 cm. Para melhor rendimento, é recomendável aplicar a metade do calcário antes da aração e a outra metade antes da gradagem (UNIVERSIDADE..., 1993).

Para culturas perenes, já implantadas, a aplicação deve ser realizada também a lanço seguida de uma ou duas gradagens. Deve-se fracionar em duas aplicações para evitar desequilíbrio nutricional.

Gessagem

A calagem corrige apenas a acidez superficial, porque o calcário se move de forma muito lenta para as camadas mais profundas. Por essa razão, para corrigir acidez subsuperficial, utiliza-se a gessagem. O gesso, ao contrário do calcário, move-se para as camadas mais profundas onde diminui a atividade do alumínio.



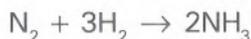
Considerações: o gesso não substitui o calcário, pois não altera o pH; é recomendado apenas para solos com acidez subsuperficial; complementa a ação do calcário quando ocorre acidez superficial e subsuperficial (SOUSA; LOBATO, 2004).

Adubação mineral

O fertilizante é o insumo mais importante, em termos percentuais, no aumento da produtividade das culturas.

O uso eficiente de fertilizante exige uma diagnose correta de possíveis problemas de fertilidade do solo e nutrição de plantas. As principais ferramentas são: análise de solo e análise foliar (LOPES; GUILHERME, 1990).

♦ **Adubação nitrogenada** - a maior parte dos fertilizantes nitrogenados utiliza a amônia (NH₃) como matéria-prima, que é obtida do nitrogênio do ar, por meio de combinação com o hidrogênio.



As respostas à adubação nitrogenada variam dependendo das culturas, sendo de maior magnitude nas gramíneas, em especial no milho. O potencial de resposta de uma cultura ao nitrogênio depende de: suprimento de outros nutrientes; profundidade do perfil do solo com presença efetiva de raízes; tempo de cultivo; sistema de preparo do solo; rotação de culturas; intensidade de chuva; nível de radiação solar e teor de matéria orgânica no solo (SOUSA; LOBATO, 2004).

Entre os elementos minerais essenciais, o nitrogênio é o que, com maior frequência, limita o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento biológico e econômico de milho. Isso ocorre porque as plantas requerem quantidades relativamente grandes do elemento (1,5% a 3,5%) do peso seco da planta e porque a maioria dos solos não tem nitrogênio suficiente em forma disponível para sustentar os níveis de produção desejados.

A quantidade de nitrogênio a ser aplicada ao solo depende da exigência da cultura e do balanço entre as reações de mineralização e de perda de nitrogênio no solo, seja por imobilização, seja por volatilização, seja por lixiviação, etc. (ERNANI; NASCIMENTO; FREITAS, 1996).

Segundo Yamada (1996), as recomendações ao redor de 15 a 20 kg de nitrogênio por tonelada de grãos de milho parecem ser bem-coerentes, considerando-se somente a reposição do elemento exportado nos grãos.

Os efeitos da adubação nitrogenada na produtividade de grãos de milho em solos Neossolos Flúvicos e Quartzarênicos, na Região Meio-Norte, foram estudados por Cardoso e Melo (2000) que obtiveram as máximas produtividades de grãos de 8.914 kg ha⁻¹ (Neossolo Flúvico) e 6.925 kg ha⁻¹ (Neossolo Quartzarênico) com os níveis de 115,23 kg de N ha⁻¹ e 114,54 kg de N ha⁻¹, respectivamente. A contribuição em termos relativos para o aumento da produtividade de grãos quando desenvolvido o trabalho em solo Neossolo Flúvico foi de 15,82%, enquanto em Neossolo Quartzarênico foi de 56,33%.

Em condições de irrigação em um Neossolo Quartzarênico, o máximo rendimento obtido (7.641 kg ha⁻¹) ocorrem com a dose de 142 kg de N ha⁻¹. A dose econômica foi igual a 132 kg de N ha⁻¹ com rendimento de grãos de 7.634 kg ha⁻¹ e uma eficiência do uso da água de 11,23 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (CARDOSO et al., 2003).

Em Latossolo Amarelo do Cerrado Sul Maranhense, observou-se uma produtividade técnica de grãos de milho de 6.622 kg ha⁻¹ e econômica de 6.480 kg ha⁻¹, respectivamente, com as doses de 163,9 kg de N ha⁻¹ e 69,5 kg de N ha⁻¹ (CARDOSO; MELO; BASTOS, 2004). No mesmo tipo de solo dos Cerrados do Sudoeste Piauiense, Bastos et al. (2003) estudaram os efeitos de níveis de nitrogênio e de potássio e observaram efeitos quadráticos com uma produtividade técnica de 5.930 kg ha⁻¹ associada a uma dose de 103 kg de N ha⁻¹. Os autores não observaram efeito das doses de potássio na produtividade de grãos de milho.

Em um Latossolo Vermelho-Amarelo no Centro-Norte Piauiense, observou-se efeito significativo ($P < 0,05$) das adubações orgânicas (10 t ha⁻¹ de esterco de caprino curtido), da adubação química (90 kg de N ha⁻¹ + 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹ + 70 kg de K₂O ha⁻¹ + 3 kg de Zn ha⁻¹) e da mistura orgânica + química na produtividade de grãos de milho (MELO; CARDOSO; ANDRADE JÚNIOR, 2003).

Uma atividade em expansão no Nordeste brasileiro é o plantio comercial de milho, visando a sua comercialização in

natura, popularmente conhecido como milho verde. É uma prática cultural bastante utilizada pela pequena e média propriedade, cuja importância econômica e social vem crescendo como fixadora de mão-de-obra, principalmente na agricultura familiar. Com o objetivo de melhorar a produtividade de espiga verde empalhada da variedade BR 5039 – São Vicente, Cardoso e Melo (2001c) observaram efeito quadrático com acréscimo de níveis de nitrogênio em solo Neossolo Flúvico. A produtividade máxima de espiga verde empalhada foi de 19,6 t ha⁻¹ com uma dose de 126,7 kg de N ha⁻¹. O nitrogênio contribuiu em média com 25,1% para o aumento da produtividade de espiga verde.

Em Neossolo Quartzarênico, Cardoso, Melo e Duarte (2002) também observaram efeito quadrático na produtividade de espiga verde empalhada em relação à dose de nitrogênio, com um máximo de 12,4 t ha⁻¹ e 172 kg de N ha⁻¹, cuja contribuição do nitrogênio para o aumento da produtividade de espiga verde foi de 50,7%.

Em condição irrigada por aspersão foi em solo Neossolo Quartzarênico, Cardoso et al. (2002) obtiveram uma resposta linear na produtividade de espiga verde empalhada em relação à densidade de plantas e à dose de nitrogênio. O aumento foi de 90,7% quando se aumentou a densidade de plantas.m de 2,5 plantas m (10,1 t ha⁻¹) para 10,0 plantas.m (19,2 t ha⁻¹). As doses de nitrogênio proporcionaram um aumento médio de 11,2% na produtividade de espiga verde, observando-se que, para cada kg de nitrogênio adicionado ao solo, houver um aumento de 12,2 kg de espiga verde ha⁻¹.

♦ **Adubação fosfatada** – a maior parte das matérias-primas usadas na fabricação de fertilizantes fosfatados é extraída de minas, cujo principal mineral é a fluorapatita (RAIJ, 1991).

Os adubos fosfatados usados na agricultura são resultantes de transformações químicas que destroem a estrutura da apatita.

A resposta à adubação fosfatada depende da disponibilidade de P no solo, da disponibilidade de outros nutrientes, da espécie e variedade vegetal cultivada e das condições climáticas (SOUSA; LOBATO, 2004).

Trabalho sobre densidade de plantas (4, 6, 8 e 10 plantas.m) de milho, associado a níveis de fósforo (0, 40, 80, 120 e 160 kg de P_2O_5 ha⁻¹) em solo de Tabuleiro Costeiro (Neossolo Quartzarênico), mostrou efeito não significativo para a interação densidade x fósforo e efeitos significativos isolados para a densidade das plantas e níveis de fósforo. Em ambos os casos, a resposta foi quadrática, observando-se uma produtividade máxima de grãos de 7.302 kg ha⁻¹ para uma densidade de 7,82 plantas m⁻² e de 6.682 kg ha⁻¹ para um nível de 96,0 kg de P_2O_5 ha⁻¹ (CARDOSO; MELO; PEREIRA FILHO, 2002).

Trabalho semelhante foi conduzido em um solo Neossolo Flúvico Eutrófico de textura média, onde se observaram respostas crescente da produtividade de grãos e decrescente dos componentes de produção (peso de grãos por espiga e número de grãos por espiga) em relação à densidade de plantas, cuja produtividade de grãos foi compensada pelo aumento do número de espiga por área. Em relação ao fósforo, a resposta foi quadrática com uma produtividade máxima de grãos de 7.582 kg.ha⁻¹ obtida com 74,50 kg de P_2O_5 ha⁻¹ (CARDOSO; BASTOS; PEREIRA FILHO, 2002).

Em solos do Cerrado (Argissolo Vermelho-Amarelo) do Sudoeste Piauiense, observou-se uma produtividade máxima de grãos de milho de 9.254 kg ha⁻¹ com a densidade de 8,32 plantas. As produtividades de grãos máximas, técnica e econômica, foram de 8.388 kg ha⁻¹ e 8.370 kg ha⁻¹ obtidas, respectivamente, com os níveis de 102,8 kg de P_2O_5 ha⁻¹ e 91,6 kg de P_2O_5 ha⁻¹ (Cardoso et al., 2004).

Resposta de níveis de fósforo à produtividade de grãos em feijão-caupi foi observada por Cardoso e Melo (2001a), cujas produtividades máximas de grãos foram de 1.250 kg ha⁻¹ (cv BR 17 Gurguéia) e 1.338 kg ha⁻¹ ('Vita 7'), respectivamente, com os níveis de 75,1 kg de P_2O_5 ha⁻¹ e 72,0 kg de P_2O_5 ha⁻¹ em um Neossolo Flúvico. Em Latossolo Vermelho-Amarelo, foram de 89,8 kg de P_2O_5 ha⁻¹ e 88,1 kg de P_2O_5 ha⁻¹ com produtividades máximas de grãos de 1.332 kg ha⁻¹ ('Vita 7') e 2.313 kg ha⁻¹ ('BR 17 Gurguéia').

Em Neossolo Quartzarênico e em irrigação por aspersão convencional, o feijão-caupi ('Vita 7') de porte moita respondeu linearmente às densidades (4, 9, 14 e 18 plantas m⁻²) e a níveis de P₂O₅ (0, 45, 90 e 135 kg ha⁻¹). Para feijão-caupi de porte ramador ('BR 17 Gurguéia'), a densidade de plantas não influenciou a produtividade de grãos, entretanto, observou-se efeito quadrático com uma produtividade máxima de 2.512 kg ha⁻¹ e um nível de 65,4 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (CARDOSO; MELO, 2001b).

◆ **Adubação potássica** – os sais do potássio são obtidos de minas profundas que contêm mistura de cloreto e sulfato de potássio, sódio, magnésio e cálcio (RAIJ, 1991).

O uso eficiente de adubos potássicos deve considerar os fatores que aumentam seu efeito residual e o rendimento das culturas por unidade de potássio aplicado ao solo. Entre esses fatores, os mais importantes são: doses, fontes e modo de aplicação (SOUSA; LOBATO, 2004).

◆ **Adubação com enxofre** – as necessidades de enxofre são supridas por fertilizantes portadores de enxofre ou fórmulas fabricadas com enriquecimento desse nutriente.

Os fatores que influenciam a adubação com enxofre são: textura e matéria orgânica; necessidades das culturas; teor de enxofre na água de irrigação; relação nitrogênio: enxofre (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989).

◆ **Adubação com cálcio e magnésio** – a calagem é a maneira mais usual de fornecimento desses nutrientes.

Na adubação com cálcio e magnésio, devem ser considerados os seguintes fatores: relação cálcio:magnésio; granulometria e aplicação dos adubos (LOPES; GUILHERME, 1990).

◆ **Adubação com micronutrientes** – as fontes solúveis dos elementos são as mais usadas, além de materiais solúveis e insolúveis.

Os fatores que afetam a adubação dos micronutrientes são, principalmente, o método de aplicação e a fonte. As principais razões para adubação com micronutrientes são: carência desses nutrientes na maioria dos solos; cultivo de variedades com alto potencial de rendimento e o uso crescente de fertilizantes de alta concentração, que contêm menores quantidades de micronutrientes.

Referências

BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; RIBEIRO, V. Q.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de. Rendimento de grãos de milho em resposta ao nitrogênio e no potássio em solo do cerrado piauiense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Solo: alicerces dos sistemas de produção: [anais]**. Botucatu: UNESP; Ribeirão Preto: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

CANTARELLA, H. A qualidade da análise de solo. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: SBCS, Lavras: UFLA, 1999. p. 321-335.

CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; MELO, F. de B.; RIBEIRO, V. Q.; PEREIRA FILHO, I. A. Rendimento de grãos secos de milho relacionado a doses de nitrogênio sob irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Solo: alicerces dos sistemas de produção: [anais]**. Botucatu: UNESP; Ribeirão Preto: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; PEREIRA FILHO, I. A. Resposta do milho BR 3123 a adubação fosfatada e a densidade de plantas. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. **Meio ambiente e a nova agenda para o agronegócio de milho e sorgo: anais**. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo: EPAGRI, 2002. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B. Efeitos adubação fosfatada e da densidade de plantas na produtividade de grãos de feijão-caupi em regime de sequeiro. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CAUPI, 5., 2001, Teresina. **Avanços tecnológicos no feijão caupi: anais**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2001a. p. 285-287. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 56).

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B. Níveis de fósforo e da densidade de plantas de feijão-caupi de portes moita e remador em solo de textura arenosa. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CAUPI, 5., 2001, Teresina. **Avanços tecnológicos no feijão caupi: anais**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2001b. p. 288-290. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 56).

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B. Níveis de nitrogênio e produtividade de espiga verde de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Ciência do solo: fator de produtividade competitiva com sustentabilidade: anais.** Londrina: SBCS, 2001c. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B. Níveis de nitrogênio e produtividade de grãos de milho em solos Aluvial Eutrófico e Areais Quartzosas sob condições de sequeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23., 2000, Uberlândia. **Anais...** Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo: Universidade de Uberlândia, 2000. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; BASTOS, E. A. Rendimento de grãos relacionado à adubação nitrogenada e a densidade de plantas na região sul maranhense. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 26; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 10.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 8.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 5., 2004, Lages. **Fertbio 2004: anais...** Lages: SBCS, 2004. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; BASTOS, E. A.; PEREIRA FILHO, I. A. Rendimento de grãos de milho relacionado a níveis de fósforo e a densidade de plantas em solo do cerrado piauiense. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 25.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA-DO-CARTUCHO, *Spodoptera frugiperda*, 1., 2004, Cuiabá. **Da agricultura familiar ao agronegócio: tecnologia, competitividade e sustentabilidade: [resumos expandidos].** Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo: EMPAER, 2004. Seção Trabalhos. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; DUARTE, R. L. Efeitos do nitrogênio na produtividade de espiga de milho verde. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 42; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HORTICULTURA, 11., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: SOB, 2002. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; PEREIRA FILHO, I. A. Produtividade de grãos de milho relacionada a níveis de fósforo e a densidade de plantas em solo de Tabuleiros Costeiros. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. **Meio ambiente e a nova agenda para o agronegócio de milho e sorgo: anais.** Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo: EPAGRI, 2002. 1 CD-ROM.

CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q.; DUARTE, R. L. R.; PEREIRA FILHO, I. A. Produtividade de espiga verde de milho em diferentes densidades de plantas e doses de nitrogênio sob irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 42; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HORTICULTURA, 11., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: SBO: Universidade de Uberlândia, 2002. 1 CD-ROM.

EMBRAPA SOLOS. **Método para coleta de amostras de solos para análise.** Disponível em: http://www.cnps.embrapa.br/servicos/metodo_coleta.htm. Acesso em: 8 nov. 2007.

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L. do; FREITAS, E. G. da. Aumento do rendimento de grãos e de massa verde de milho para silagem pela aplicação de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porta Alegre, v. 2, n. 2, p. 201-205, 1996.

- LIMA, G. J. E. de O. Amostragem de solos nos sistema plantio direto. **Direto no cerrado**, Brasília, DF, v. 8, n. 35, p. 14, abr./maio, 2004.
- LOPES, A. S. **Manual de fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA: POTAFOS, 1989. 155 p.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes: aspectos agrônômicos**. São Paulo: ANDA, 1990. 51 p. (ANDA. Boletim Técnico, 4).
- LOPES, A. S.; SILVA, M. de C.; GUILHERME, L. R. G. **Acidez do solo e calagem**. 3. ed. rev. São Paulo: ANDA, 1990. 22 p. (ANDA. Boletim Técnico, 1).
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201 p.
- MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de. Rendimento de grãos de milho relacionado à adubação orgânica e química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Solo: alicerce dos sistemas de produção: [anais]**. Botucatu: UNESP; Ribeirão Preto: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 9. ed. São Paulo: Nobel, 1998. 549 p.
- RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. Van. Representação dos resultados de análise de solos, folhas, fertilizantes e corretivos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 2, p. 155-156, fev. 1995.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a. aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.
- SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Ceará**. Fortaleza: BNB, 1993. 247 p.
- VALE, F. R.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. de A. **Fertilidade do solo: dinâmica e disponibilidade dos nutrientes de plantas**. Lavras: UFLA: FAEPE, 1995. 171 p.
- WINKEL, H. L.; TSCHIEDEL, M. **Cultura do arroz: salinização de solos em cultivos de arroz**. Disponível em: <http://members.tripod.com/agropage/saliniza.html>. Acesso em: 3 set. 2005.
- YAMADA, T. Adubação nitrogenada do milho: quanto, como e quando aplicar? **Informações Agrônômicas**, Piracicaba, n. 74, p. 1-5, jun. 1996.

Capítulo III

Manejo da matéria orgânica em solos dos Cerrados do Meio-Norte do Brasil

Luiz Fernando Carvalho Leite

Conceitos e funções da matéria orgânica do solo

Em ecossistemas terrestres, a matéria orgânica do solo (MOS) é importante reservatório de carbono, nutrientes e energia. Sem a presença da matéria orgânica, a superfície terrestre seria uma mistura estéril de minerais intemperizados. Além disso, não há dúvidas quanto à sua essencialidade na fertilidade, produtividade e sustentabilidade das áreas agrícolas ou não agrícolas.

A matéria orgânica é um componente importante do solo, afetando diversos processos físicos, químicos e biológicos e, por meio desses, desempenhando importantes funções. Um efeito direto da atividade biológica, por exemplo, está associado à macroestrutura do solo, por meio da formação de poros do solo, como consequência da atividade da fauna e crescimento de raízes e fungos. De outro lado, efeitos menos diretos são relacionados às mudanças em compostos orgânicos resultantes de processos como decomposição e concomitante mineralização e imobilização de nutrientes.

A importância relativa dessas funções varia com o tipo de solo, clima e sistemas de manejo. Em muitas situações, a função mais importante da MOS é atuar mesmo como reserva de nutrientes requeridos pelas plantas e, em última análise, pela população humana. No entanto, ainda atua no suprimento de nutrientes por meio da sua influência na capacidade de troca de cátions e na capacidade de adsorver ânions, e essas funções têm implicações importantes para o impacto de íons tóxicos e agroquímicos biocidas.

O papel da matéria orgânica é também relevante na formação de agregados estáveis, influenciando diretamente a estrutura do solo e, portanto, a infiltração de água, a capacidade de retenção de água, a aeração e a resistência ao crescimento de raízes. Em situações em que a umidade do solo é o principal limitante do crescimento das plantas, os maiores impactos da matéria orgânica são sobre os componentes físicos do solo.

A estabilidade dos agregados depende do agente cimentante. Na maioria dos solos, substâncias orgânicas juntamente com óxidos de ferro e carbonatos são os principais agentes cimentantes. Em alguns trabalhos, tem-se observado que a estabilidade dos agregados é maior em solos com maiores teores de matéria orgânica e com maior número de minhocas e negativamente correlacionada com sistemas agrícolas convencionais, essencialmente em razão do uso de fertilizantes e pesticidas (WOLF; SNYDER, 2003). Agregados são formados com a adição de polissacarídeos, mucilagens provenientes do metabolismo microbiano e da decomposição de raízes, resíduos vegetais e animais e da exsudação radicular, entretanto, a sua estabilidade dependerá do entrelaçamento de hifas de fungos presentes nos agregados. Os fungos, concentrados próximo da superfície, em solos sob plantio direto, são muito eficientes na estabilização de agregados formados pelas minhocas e microartrópodos (BEARE, 1997). Embora a atividade de minhocas seja muito importante para a manutenção da estabilidade de agregados, fungos e bactérias também contribuem diretamente para a formação e estabilidade dos agregados do solo. A contribuição desses microrganismos é especialmente importante em sistemas de preparo convencional, em que a atividade de minhocas é reduzida pela presença de máquinas e implementos.

Em alguns estudos, tem-se reportado que diferentes materiais orgânicos podem ter efeitos diferenciados na estabilização de agregados (PICCOLO; MBAGWU, 1999). Os autores mencionam a composição da matéria orgânica, especialmente a porção humificada, que pode ter importante papel na eficiência da matéria orgânica em estabilizar agregados. Além disso, sugerem que a adição de materiais orgânicos ricos em componentes hidrofóbicos (substâncias que repelem água) propiciarão maior benefício para a estabilização de agregados do que a adição de materiais orgânicos ricos em componentes hidrofílicos (substâncias que absorvem água), tais como, os polissacarídeos. Nesse sentido, os ácidos húmicos, em virtude do seu alto conteúdo de componentes hidrofóbicos, poderiam ser utilizados para estabilizar agregados e com isso melhorar a condição física do solo.

Ultimamente, além dos efeitos benéficos sobre as propriedades do solo, tem-se reconhecido que outro papel importante da matéria orgânica do solo é funcionar como componente central do balanço global do carbono, sendo um compartimento de carbono muito maior do que aqueles observados na atmosfera e na biota, embora menor do que nos combustíveis fósseis e nos oceanos. O manejo da matéria orgânica do solo pode ter implicações significativas no balanço global do carbono e, por isso, no impacto do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre as mudanças climáticas.

Compartimentos da matéria orgânica do solo

Definir a qualidade, a disponibilidade e a atividade dos nutrientes nos substratos orgânicos em diferentes compartimentos do solo é a chave para entender e descrever os processos de mineralização-imobilização dos nutrientes na forma orgânica. Independentemente da forma orgânica do nutriente, a matéria orgânica dos diferentes tipos de solos difere muito quanto à qualidade e habilidade de suprir nutrientes para as plantas. Assim, a tentativa de compartimentalizar a MOS pode ser um bom instrumento para se compreender o seu potencial de fornecimento de nutrientes. Com base em vários trabalhos, Duxbury, Smith e Doran (1989) sugeriram a organização da MOS em compartimentos protegidos e não protegidos, e Eswaran et al. (1995), em ativo, lento e passivo (Tabela 1).

Os compartimentos não protegidos BIO e LAB, ou ativo, são caracterizados pela biomassa microbiana e pelos resíduos vegetais e microbianos parcialmente decompostos e respectivos produtos de transformação. O tamanho desses compartimentos está diretamente relacionado com o aporte de material orgânico e sua taxa de decomposição. O compartimento BIO pode representar até 4% do carbono orgânico total do solo (COT) e é o de menor tempo de ciclagem da MOS, sendo composto por células vegetativas em plena atividade funcional, o que o torna um importante reservatório de nutrientes potencialmente

disponível para as plantas. Portanto, espera-se que a ciclagem dos nutrientes nos compartimentos não protegidos (BIO e LAB) seja alta, fazendo que os tamanhos desses compartimentos de carbono e de nutrientes sejam menores em regiões tropicais do que em regiões temperadas.

Tabela 1. Compartimentos da matéria orgânica do solo, tempo de ciclagem e hipótese dos controles primários do tamanho dos compartimentos.

Compartimento	Tempo de ciclagem	Controle do tamanho dos compartimentos
Não protegido		
BIO (biomassa microbiana)	2,5 anos em clima temperado e 0,25 ano em clima tropical úmido	Disponibilidade de substrato (CA)
LAB (lábil)	20 anos em clima temperado e 5 anos em clima tropical úmido	Clima e disponibilidade de substrato (CA) (CL)
Protegido		
Matéria orgânica quimicamente protegida (proteção coloidal)	1.000 anos	Mineralogia e textura do solo (CL) (CP)
Matéria orgânica fisicamente protegida (proteção estrutural)	Dependente do manejo do solo (resistência física)	Sistemas de preparo do solo, quebra de agregados, textura do solo (CP)

CA = Compartimento ativo – macroagregados; CL = Compartimento lento – microagregados dentro de macroagregados; CP = Compartimento passivo – intramicroagregados.

Fonte: Duxbury, Smith e Doran (1989); Eswaran et al. (1995), adaptada pelo autor.

Os tamanhos dos compartimentos física e quimicamente protegidos, ou passivo, estão relacionados com o manejo, textura e mineralogia do solo (Tabela 1). A maior parte da matéria orgânica e dos nutrientes do solo está nesses compartimentos. O tempo de ciclagem dos nutrientes é controlado pelo grau de proteção, intra e intermicroagregados e pelo grau de interação do nutriente com a matéria orgânica. Os nutrientes que interagem com a matéria orgânica por meio de ligações eletrostáticas estarão prontamente disponíveis para serem absorvidos pelas plantas, enquanto nutrientes formando quelatos com a matéria orgânica quimicamente protegida terão um tempo de ciclagem maior. O tempo de ciclagem varia muito de situação de manejo e de como o nutriente pode interagir com a matéria orgânica.

As quantidades de nutrientes armazenados na fração não protegida da MOS (compartimentos BIO e LAB) podem atingir valores bastante elevados, como 100 kg ha⁻¹ de N, 80 kg ha⁻¹ de P, 70 kg ha⁻¹ de K e 11 kg ha⁻¹ de Ca. Como a reciclagem da matéria orgânica desses compartimentos é cerca de dez vezes mais rápida que a da matéria orgânica morta do solo, grande parte dos nutrientes armazenados é liberada durante essa reciclagem, realçando a importância desses compartimentos para a melhoria da qualidade do solo.

Os compartimentos da MOS devem ser quantificados por se mostrarem muito sensíveis às ações antrópicas e mudanças no manejo, o que os credenciam como eficientes indicadores de qualidade do solo. Por isso, além dos teores ou dos estoques do COT, já determinados nas análises químicas de rotina, tem-se recomendado, nos últimos anos, a determinação desses compartimentos. Essa maior sensibilidade possibilita, de forma mais antecipada do que se utilizando apenas a medida do COT, a tomada de decisões em relação aos agroecossistemas mais adequados a determinado ambiente. No entanto, apesar da importância desses compartimentos para o estudo da dinâmica da MOS, são ainda escassos os métodos analíticos usados para referenciá-los. De forma geral, o C da biomassa microbiana, determinado pelo método irradiação-extração (ISLAM; WEIL,

1998) e representando o compartimento ativo, e o C da fração leve ou da matéria orgânica particulada, determinados por fracionamento densimétrico ou granulométrico (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992; JANZEN et al., 1992; ROSCOE; MACHADO, 2002) e relacionados ao compartimento lento, têm sido usados para estudos de dinâmica da MOS em solos tropicais (LEITE et al., 2003a). Apesar da dificuldade na escolha de métodos para os compartimentos lábeis ou ativo, a maior dificuldade está em referenciar o compartimento passivo, caracterizado pela maior estabilidade, em razão da proteção física e da presença de compostos quimicamente recalcitrantes. Nesse sentido, em alguns trabalhos, tem-se sugerido a determinação do C das frações húmicas (ácidos húmicos + ácidos fúlvicos + huminas) obtido pelo método proposto por Swift (1996) para ser associado a esse compartimento (LEITE et al., 2003a).

A biomassa microbiana representa o componente vivo da MOS, excluindo-se animais e raízes das plantas. Embora normalmente constitua cerca de menos de 5% da MOS, desempenha importantes funções no solo, como servir de fonte e dreno de nutrientes, participar ativamente das transformações de C, N, P e S, atuar na degradação de compostos orgânicos xenobióticos e imobilização de metais pesados, além de participar da formação e estrutura do solo. Considerado por diversos autores como excelente indicador de qualidade do solo, o C da biomassa microbiana tem apresentado, entretanto, resultados muito variáveis e até contraditórios em diversos estudos (GIL-STORES, 2005).

A fração leve também tem sido muito referenciada como importante indicador de qualidade do solo. Essa fração é um intermediário entre os resíduos vegetais recém- incorporados ao solo e o húmus estabilizado. A quantidade e a labilidade da fração leve variam intensamente entre solos tropicais e temperados, dependendo de vários fatores, tais como, o pH, a temperatura, a umidade, a aeração, a mineralogia do solo e o estado de nutrientes do solo. As variações da fração leve no solo são indicativos das conseqüências sobre a dinâmica da MOS,

causadas pelas mudanças no manejo. A composição química da fração leve no solo é similar àquela dos tecidos vegetais. A variabilidade dos estoques de C e N medidos na fração leve tem sido associada à relação C:N do material vegetal originário, ao estoque de C no solo, ao pH e às condições climáticas. Além de indicador de qualidade do solo, a fração leve é fonte de C lábil, isto é, cicla rapidamente e, por isso, contribui para a ciclagem de nutrientes, pois é fonte de energia prontamente disponível para os microrganismos responsáveis por essa ciclagem.

Além da biomassa microbiana e da fração leve, há outros constituintes lábeis que poderiam referenciar compartimentos de MOS. As substâncias não húmicas compreendem diversos compostos quimicamente definidos, tais como, lignina, ceras, pectinas, além de vários polissacarídeos. Esses compostos são relacionados ao compartimento lábil da MOS, pelo menos em solos em que os processos biológicos não são restritos. Em geral, a labilidade das substâncias não húmicas nos solos é inversamente relacionada ao tamanho e complexidade das moléculas que as formam. A maioria desses compostos pode persistir por vários anos, especialmente em solos com baixa atividade biológica, em virtude, essencialmente, das suas estruturas poliméricas recalcitrantes, ou seja, de difícil decomposição, ou da estabilização química por meio de interações com minerais ou outras substâncias, tais como, complexos proteínas-taninos.

Os compartimentos lábeis de MOS são extremamente importantes como fonte e dreno de nutrientes às plantas, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos existentes em áreas de Cerrados. Embora existam poucas informações disponíveis sobre os processos de mineralização e conseqüente liberação e ciclagem de nutrientes desses compartimentos em solos tropicais, esses processos são controlados por aspectos químicos, como em solos temperados. Entretanto, o tamanho do compartimento lábil é aparentemente menor e tem ciclagem mais rápida, com liberação mais rápida de nutrientes em regiões tropicais úmidas do que naquelas

temperadas. De outro lado, os compartimentos de MOS quimicamente protegidos são provavelmente maiores. O preparo intensivo do solo, entretanto, resulta na remoção parcial da proteção da MOS e numa rápida liberação de nutrientes em áreas tropicais úmidas.

Fatores que regulam a dinâmica da matéria orgânica no solo

Os estoques de MOS são controlados pelo balanço entre as entradas, acima e abaixo do solo, e as saídas por meio da mineralização. Em uma situação de equilíbrio, como em uma floresta nativa, essas entradas são equivalentes à produtividade primária líquida (PPL) de um sistema, a qual é fortemente controlada pelo clima, com alguma influência do estado de fertilidade do solo, textura do solo e vegetação. Os resíduos vegetais recém-depositados sobre o solo são gradativamente modificados por meio da fragmentação física, interações fauna/microflora, mineralização e formação de húmus.

De forma geral, a mudança da floresta nativa para sistemas agrícolas propicia um declínio nos estoques de MOS. Essa redução pode ser atribuída ao aumento da erosão do solo, a processos mais acelerados de mineralização da matéria orgânica e oxidação de C orgânico do solo, a quantidades menores de aportes orgânicos e/ou aportes orgânicos mais facilmente decompostos em sistemas manejados comparativamente às florestas nativas. No entanto, em alguns sistemas manejados, o aumento dos estoques de MOS pode ocorrer em face da maximização da produtividade das culturas e conseqüente aumento nos aportes da parte aérea e do sistema radicular ao solo. Batjes (1999) relata que, após um distúrbio, como o desmatamento de uma floresta nativa, um período de manejo constante é requerido para se alcançar um novo estado de equilíbrio nos estoques de C. Esse novo equilíbrio pode tornar os estoques de MOS menores, similares ou maiores do que aqueles no solo em condições originais (Fig. 1). Apesar dessas possibilidades, os estoques de

MOS em solos cultivados são, via de regra, menores do que em solos sob florestas, a menos que sistemas de manejo conservacionistas com alto aporte de resíduos sejam adotados.

A fração de C perdida com esses distúrbios está diretamente associada à quantidade inicialmente presente em solos não perturbados. Esse decréscimo é maior em áreas com monoculturas de baixa produtividade e com limitado retorno de resíduos culturais ao solo. Nessas condições, o declínio ocorre por diversos processos, tais como, a remoção da camada superficial (topsoil), a ruptura de agregados, o aumento na oxidação da matéria orgânica e a maior acessibilidade dessa matéria orgânica aos microrganismos decompositores. Esses processos não apenas reduzem os estoques totais de MOS, mas também alteram as frações ou compartimentos presentes, reduzindo a disponibilidade de nutrientes e afetando negativamente as propriedades físicas do solo.

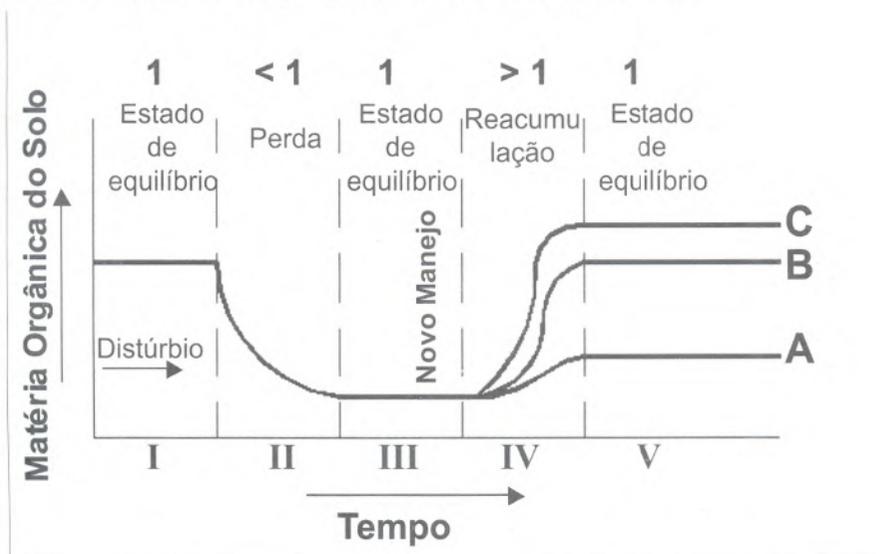


Fig. 1. Dinâmica da matéria orgânica do solo após distúrbio – A: estabilização abaixo do nível original; B: estabilização no nível original; C: estabilização acima do nível original. Fonte: Batjes (1999), adaptada pelo autor.

As reduções dos estoques de C geralmente diminuem sensivelmente após os dez primeiros centímetros de solo, embora em alguns estudos tenham sido reportados decréscimos até cem centímetros de profundidade (BATJES, 1999). Em média, a perda de carbono (até um metro de profundidade), após a mudança da floresta nativa para a agricultura sob monocultivos, está na maioria dos solos em torno de 40% a 50%; de floresta para pastagem, de 20% a 30%; e de floresta para culturas consorciadas, de 35% (SCHLESINGER, 1986). Nos solos sob pastagens e sob florestas, há uma tendência de perda dos estoques originais de C de 20% a 50% nos primeiros 50 anos de cultivo (LAL, 1998). Esse decréscimo dos estoques de C pode ser atribuído ao reduzido aporte de C, quando a produtividade vegetal diminui ou maior quantidade de resíduos é removida, e ao aumento das taxas de decomposição.

As principais formas nas quais se pode aumentar os estoques de MOS e seqüestrar C são: a) modificação do ambiente solo, pelo preparo, irrigação e fertilização, influenciando os processos biológicos de decomposição e mineralização; b) manipulação da quantidade e qualidade de aportes orgânicos, por meio da modificação do tempo e da localização desses aportes orgânicos, como forma de influenciar a sincronia entre a liberação de nutrientes a partir da MOS e a demanda da planta; c) manipulação da fauna do solo (agentes de decomposição) via preparo, cobertura morta ou uso de pesticidas.

A modificação do ambiente solo

A modificação do ambiente solo está calcada no uso de cobertura morta e na adoção de sistemas de preparo conservacionistas, tais como, o plantio direto. Em sistemas de preparo convencional, baseados no revolvimento intensivo do solo, por meio de operações sucessivas de aração e gradagem, os resíduos vegetais são incorporados ao solo, distribuindo-se até a profundidade de atuação do implemento. Concomitantemente, a aeração e a temperatura, maiores nesses sistemas, e a destruição de agregados pela ação dos

implementos, expõem a matéria orgânica protegida fisicamente ao ataque microbiano, promovendo a perda de COT e a diminuição da capacidade de o solo reservar carbono. De outro lado, no sistema plantio direto (SPD), a maior quantidade de resíduos culturais na superfície do solo o protegerá contra as forças erosivas do vento, da água e do escoamento superficial. Além disso, a menor intensidade de perturbação e o aumento gradativo no aporte desses resíduos na superfície do solo preservam os estoques de MOS intra-agregados, seqüestrando C, e influenciam o aumento da população de térmitas, provocando impacto favorável sobre a estrutura do solo e aeração. Ainda, como a atividade biológica e as reservas de C orgânico são concentradas próximo da superfície do solo, no sistema plantio direto, há maior potencial de imobilização de N disponível às plantas nas formas orgânicas.

O sistema plantio direto tem propiciado incrementos gradativos nos estoques de MOS, com taxas de seqüestro de C atmosférico estimadas entre 0,2 e 1,6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (AMADO, 2002). Amado et al. (2001), estimando emissões de CO₂ em razão da mudança de estoque de carbono no solo, observaram que o sistema plantio direto pousio/milho resultou, num período de oito anos, em uma liberação líquida de 4,3 Mg ha⁻¹, enquanto o sistema mucuna/milho propiciou seqüestro de 20 Mg ha⁻¹, indicando a eficiência das leguminosas em aumentar os estoques de MO em solos tropicais.

Nos trabalhos de Leite et al. (2003a), observou-se, após 15 anos de adoção de diferentes sistemas de preparo, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em Viçosa-MG, aumento dos estoques totais de C e N no SPD em relação aos sistemas convencionais (arado de disco, grade pesada, arado de disco + grade pesada), embora esse aumento tenha sido restrito à camada superficial (0-10 cm) (Tabela 2). Resultados similares foram observados em experimento com seis anos de existência, em Baixa Grande do Ribeiro, na região de Cerrados do Estado do Piauí, também em Latossolo Vermelho-Amarelo, com a superioridade do SPD sendo constatada nas camadas

5-10, 10-20 e 20-40 cm, tanto em relação ao preparo convencional (grade pesada + grade niveladora), quanto em relação à floresta nativa de Cerrados (Tabela 3) (LOPES et al., 2005). De outro lado, em Latossolo Amarelo, no Município de Chapadinha, nos Cerrados Maranhenses, Leite, Azevedo e Teixeira Neto (2004) não verificaram, após três anos de adoção do SPD, diferenças nos estoques de COT nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em relação aos sistemas semiconvencionais (escarificação) (Tabela 4).

O período necessário para o SPD aumentar os estoques de MOS e atuar no seqüestro de C em solos é variável, dependendo de muitos fatores, tais como, clima, textura e mineralogia do solo, embora alguns autores estimem esse período em aproximadamente 25 a 30 anos (FOLLET, 2001; FOLLET; MCCONKEY, 2000).

Tabela 2. Teores e estoques totais de carbono orgânico (COT) e nitrogênio (NT) e relação C/N de um Argissolo Vermelho-Amarelo nas camadas 0-10, 10-20 e 0-20 cm, 15 anos após o início da utilização dos diferentes sistemas de preparo em Viçosa-MG⁽¹⁾. Fonte: Leite et al. (2003a)

Sistema ⁽²⁾	COT	NT	C/N	COT	NT
	dag kg ⁻¹			Mg ha ⁻¹	
0-10 cm					
PD	1,67a	0,134a	12,5	22,0a	1,74a
AD	1,38b	0,107bc	12,9	16,7b	1,29bc
GPAD	1,29b	0,103c	12,5	15,48b	1,23c
GP	1,43b	0,113b	12,6	17,16b	1,36b
FA	3,50	0,259	13,5	35,0	2,59
10-20 cm					
PD	1,25ab	0,103a	12,1	16,75a	1,38a
AD	1,18ab	0,098a	12,0	14,51ab	1,20b
GPAD	1,27a	0,102a	12,4	15,62ab	1,25ab
GP	1,09b	0,100a	10,9	13,95b	1,28ab
FA	2,16	0,174	12,4	27,21	2,19
0-20 cm					
PD	1,46	0,118a	12,4	38,54a	3,11a
AD	1,28b	0,102b	12,5	31,23b	2,49b
GPAD	1,28b	0,102b	12,5	30,97b	2,49b
GP	1,26b	0,107b	11,8	31,24b	2,64b
FA	2,83	0,216	13,1	63,95	4,88

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

⁽²⁾PD: plantio direto, AD: arado de disco, GPAD: grade pesada + arado de disco, GP: grade pesada, FA: floresta atlântica.

A adoção do SPD, apesar das inúmeras vantagens propiciadas à qualidade do solo, nem sempre é suficiente para aumentar os estoques de MOS. Por isso, é necessária a utilização, de forma associada, de outras práticas de manejo, como, a introdução de sistemas de culturas de cobertura com elevado aporte de resíduos. O incremento da fitomassa das culturas comerciais, somado à fitomassa de plantas de cobertura, representa grande contribuição na adição de resíduos vegetais ao solo e, portanto, pode ser considerada eficiente alternativa para seqüestrar C no solo. Alguns trabalhos reforçam essa assertiva e enfatizam que o impacto de sistemas de preparo conservacionistas será significativo apenas se esses sistemas forem associados a sistemas de rotação de cultura intensivos que permitam maiores aportes de C (BATJES, 1999; LAL, 2003), causando sinergismo que aumentaria a retenção do C do solo. Além disso, a utilização de resíduos orgânicos com baixa relação C:N, combinada com a maior diversidade temporal na seqüência dos cultivos também devem ser aspectos considerados.

Tabela 3. Teores e estoques totais de carbono orgânico (COT) e nitrogênio (NT) de um Latossolo Vermelho-Amarelo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em diferentes sistemas de preparo, em Baixa Grande do Ribeiro-PI⁽¹⁾. Fonte: Lopes et al. (2005).

Camada	Sistema ⁽²⁾	Teor		Estoque	
		COT	NT	COT	NT
		dag kg ⁻¹		Mg ha ⁻¹	
0-5	FC	2,05a	0,17a	12,83 a	1,10 a
	PD	2,19a	0,20a	13,38 a	1,24 a
	PC	1,74a	0,15a	11,35 a	0,98 a
5-10	FC	1,47b	0,12b	9,90 b	0,85 b
	PD	3,02a	0,26a	18,43 a	1,59 a
	PC	1,06b	0,09b	8,91 b	0,80b
10-20	FC	1,32b	0,11b	9,29 b	0,80 b
	PD	2,06a	0,17a	15,35 a	1,32 a
	PC	1,08b	0,09b	9,15 b	0,83 b
20-40	FC	0,97b	0,08b	7,00 b	0,60 b
	PD	1,33a	0,12a	9,24 a	0,80 a
	PC	0,64b	0,06b	5,24 b	0,45 b

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

⁽²⁾FC: floresta nativa de cerrado; PD: plantio direto; PC: preparo convencional (grade pesada + grade niveladora).

Tabela 4. Estoques totais de carbono orgânico (COT) e teores de fósforo (P) e potássio (K) de um Latossolo Amarelo cultivado com soja nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em diferentes sistemas de preparo, em Chapadinha-MA⁽¹⁾. Fonte: Leite et al. (2004).

Sistema ⁽²⁾	COT (Mg ha ⁻¹)	Atributo químico	
		P	K
		mg dm ⁻³	
0-5 cm			
PD	7,26a	33,88a	21,40a
E30	7,00a	22,45b	19,50a
E40	6,95a	40,50a	20,47a
PC	5,52b	12,00c	31,20a
FC	6,91	2,06	17,55
5-10 cm			
PD	6,81a	32,94a	16,57a
E30	6,77a	18,76b	16,50a
E40	6,63a	36,32a	19,5a
PC	6,20b	13,71c	18,5a
FC	5,38	1,40	13,65
10-20 cm			
PD	6,80a	15,59a	16,5a
E30	6,60a	14,90a	12,67a
E40	6,58a	18,08a	18,5a
PC	6,50a	7,60b	17,5a
FC	4,78	0,91	9,75
20-40 cm			
PD	6,28a	2,37b	14,62a
E30	6,41a	1,64b	12,65a
E40	6,17a	6,77a	16,42a
PC	6,46a	3,62b	18,5a
FC	3,90	0,90	7,8

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

⁽²⁾PD: plantio direto; E30: escarificação a 30 cm; E40: escarificação a 40 cm; PC: plantio convencional; FC: floresta nativa de cerrado.

Além dos sistemas de preparo conservacionistas, melhorar o estado de N, P e S e a fertilidade do solo, de forma geral, pode resultar em melhoramento concomitante dos estoques de MOS. Para seqüestrar 10.000 kg de C na forma de húmus, cerca de 833 kg de N, 200 kg de P e 143 kg de S são necessários (HIMES, 1998), o que realça a importância do manejo adequado da fertilidade do solo no seqüestro de C.

As mudanças ou os aumentos dos estoques de N são dependentes do manejo da fertilização nitrogenada e do estreitamento da relação C:N, indicando a manutenção preferencial de N em relação ao C, enquanto, o aumento do estoque de P é em razão da fertilização. Em regiões tropicais, na maioria dos sistemas agrícolas, a concentração de P no solo é insuficiente para o crescimento das culturas e, portanto, deve ser fornecido por meio de aportes externos.

Em diversos trabalhos, tem-se observado a importância do suprimento de N, P, K e S, por meio da adição de fertilizantes, aplicação de rochas fosfáticas, culturas de cobertura, especialmente leguminosas ou adubação orgânica, no aumento dos aportes de C e conseqüente manutenção dos níveis de C do solo (LEITE et al., 2003b). Nesse sentido, sistemas agrícolas sustentáveis que contribuam diretamente para o aumento da produção agrícola e para a preservação de recursos naturais devem ser desenvolvidos, juntamente com políticas sociais e econômicas viáveis para determinada região. Esses sistemas podem ser caracterizados pelas seguintes estratégias: a) incorporação de P nos sistemas agrícolas por meio de culturas anuais e perenes; b) minimização de perdas de P; c) reciclagem de P nos sistemas agrícolas e entre os setores de produção e consumo; d) aumento do uso de fertilizante fosfatado e de outros fertilizantes. Além da fertilização química, a aplicação regular de aportes orgânicos pode propiciar mudanças substanciais no C orgânico total em médio e longo prazos.

Nos Cerrados do Meio-Norte ainda são escassos trabalhos de pesquisa com adubação e seus efeitos na matéria orgânica do solo, especialmente para sistema plantio direto. Em Baixa Grande do Ribeiro, sudeste do Piauí, Leite et al. (2005) estudaram

o impacto de diferentes doses de adubação nitrogenada sobre compartimentos da matéria orgânica do solo, em plantio direto e convencional. Nesse trabalho, observou-se que na camada de 0-5 cm os estoques de COT foram maiores ($p < 0,05$) no tratamento PD/180 kg ha⁻¹ de N (17,1 Mg ha⁻¹), quando comparados aos demais tratamentos (Tabela 5). De outro lado, nas demais camadas (5-10, 10-20 e 20-40 cm), embora tenham sido observados maiores valores para o PD comparativamente ao PC, as diferenças entre as doses de adubo nitrogenado não foram significativas. Esses resultados realçaram a importância do PD em aumentar os estoques de matéria orgânica do solo, especialmente nas camadas superficiais e indicou a possibilidade de se usarem doses menores de N em cobertura (60 kg ha⁻¹ de N) em relação àquelas atualmente adotadas nos Cerrados Piauienses (100 kg ha⁻¹ de N). Comparando-se à floresta nativa de cerrados (FN), os estoques de COT no PD e no PC, na camada de 0-5 cm, aumentaram entre 18% e 25% e entre 18% e 21% respectivamente, significando melhoria da qualidade do solo com a adoção dos sistemas de manejo. Os estoques de carbono da biomassa microbiana (C_{MIC}) na camada de 0-5 cm foram maiores ($p < 0,05$) no PD e nas doses de 0, 60 e 120 kg ha⁻¹, quando comparados àqueles observados no PC. No entanto, nas camadas de 5-10, 10-20 e 20-40 cm, o PD diferiu significativamente ($p < 0,05$) do PC somente na dose de 60 kg ha⁻¹ com valores de 0,92, 0,93 e 0,28 Mg ha⁻¹ respectivamente (Tabela 5). Em relação à FN, na camada de 0-5 cm, observou-se aumento dos estoques de C_{MIC} no PD entre 35% (180 kg ha⁻¹ de N) e 60% (60 kg ha⁻¹ de N). No entanto, no PC verificou-se incremento apenas no tratamento com 60 kg ha⁻¹ de N (29%). Esse aumento do C_{MIC} em solos sob PD é importante para a construção da matéria orgânica e para a melhoria da qualidade do solo, visto que esse compartimento, de ciclagem rápida, funciona como fonte extremamente lábil de nutrientes. Além disso, pela sua alta sensibilidade às ações antrópicas, tem-se tornado excelente indicador de qualidade de solo, evidenciando mudanças não observadas em outras variáveis.

Tabela 5. Estoques de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da biomassa microbiana (C_{MIC}) e quociente metabólico (C_{MIC}/C_{OT}) de um Latossolo Vermelho-Amarelo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm, em sistema de plantio direto e convencional, em razão de diferentes doses de adubação nitrogenada⁽¹⁾. Fonte: Leite et al. (2005).

Sist ⁽²⁾	Dose N (kg ha ⁻¹)	COT	NT	C_{MIC}	C_{MIC}/C_{OT}
		Mg ha ⁻¹			
0 – 5 cm					
FN	-	12,8	1,10	0,38	2,96
PD	0	15,6 c	1,34 ab	0,94 a	6,03
	60	15,9 b	1,36 ab	0,91 a	5,69
	120	16,0 b	1,38 ab	0,86 a	5,38
	180	17,1 a	1,42 a	0,58 b	3,39
PC	0	15,2 c	1,27 ab	0,26 d	1,66
	60	15,7 b	1,29 ab	0,53 b	3,48
	120	15,7 b	1,24 b	0,38 c	2,49
	180	16,1 b	1,28 ab	0,29 d	1,80
5 – 10 cm					
FN	-	9,9	0,85	0,30	3,03
PD	0	15,9 ab	1,31 a	0,55 b	3,44
	60	16,2 a	1,30 a	0,92 a	5,69
	120	16,2 a	1,46 a	0,53 b	3,40
	180	16,2 a	1,37 a	0,53 b	3,27
PC	0	15,9 ab	1,27 a	0,16 d	1,01
	60	15,5 cd	1,31 a	0,25 cd	1,61
	120	5,2 d	1,39 a	0,48 b	3,16
	180	15,7 bc	1,35 a	0,29 c	1,85
10 – 20 cm					
FN	-	9,3	0,80	0,28	3,01
PD	0	15,5 ab	1,33 bc	0,52 b	3,36
	60	15,7 a	1,35 abc	0,93 a	5,93
	120	15,6 a	1,46 a	0,30 cd	1,92
	180	13,4 c	1,45 a	0,22 de	1,64
PC	0	14,6 b	1,29 c	0,11 f	0,75
	60	14,9 ab	1,30 c	0,17 ef	1,14
	120	13,8 c	1,36 abc	0,37 c	2,69
	180	13,7 c	1,43 ab	0,19 ef	1,39

Continua...

Tabela 5. Continuação

Sist ⁽²⁾	Dose N (kg ha ⁻¹)	20 – 40 cm			
		COT	NT	C _{MIC}	C _{MIC} /C _{OT} %
		Mg ha ⁻¹			
FN	-	7,00	0,60	0,21	3,00
PD	0	6,86 a	0,61 a	0,28 a	4,08
	60	6,25 d	0,60 a	0,28 a	4,48
	120	6,37 cd	0,60 a	0,14 b	2,19
	180	6,32 cd	0,57 a	0,09 c	1,47
PC	0	6,50 b	0,60 a	0,08 c	1,23
	60	6,00 e	0,60 a	0,12 bc	2,00
	120	6,38 c	0,58 a	0,15 b	2,35
	180	5,75 e	0,56 a	0,09 c	1,56

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra nas colunas, dentro de cada camada de solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. ⁽²⁾ FN: floresta nativa de cerrado; PD: plantio direto; PC: preparo convencional.

Além dessas variáveis, foram estudados também os impactos dos sistemas de manejo nos estoques das substâncias húmicas, consideradas importantes reservas de carbono em solos tropicais por apresentarem elevada estabilidade. Verificou-se que, nas camadas de 0-5, 5-10 e 20-40 cm, os estoques de carbono na fração ácidos fúlvicos (FAF) foram maiores ($p < 0,05$) no tratamento PD sem adição de adubação nitrogenada (1,59; 2,51 e 1,50 Mg ha⁻¹ respectivamente); na camada de 10-20 cm, os maiores valores foram observados no tratamento com 60 kg ha⁻¹ de N (1,89 Mg ha⁻¹) (Tabela 6). Na fração húmica (HUM), os estoques de C também apresentaram maiores valores no PD diferindo significativamente ($p < 0,05$) do solo em PC nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, nas doses de 60 e 180 kg ha⁻¹ de N. De outro lado, na camada de 10-20 cm, o PD diferiu ($p < 0,05$) do PC nas doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ de N. A presença de maiores estoques de C nas frações FAF e HUM no PD pode ser atribuída à ausência ou revolvimento mínimo do solo e às condições pedoambientais mais estáveis desse sistema, propiciando às substâncias húmicas estabelecer interações químicas mais estáveis com a fração mineral do solo, tornando-se mais resistentes às alterações acarretadas por práticas de manejo. Em todos os tratamentos, a fração HUM

apresentou maiores estoques de C, comparativamente à FAF e FAH, constituindo-se de aproximadamente 60% do COT, o que sugere elevada interação da fração mineral dos Latossolos dos Cerrados com a matéria orgânica.

Tabela 6. Estoques de carbono nas frações ácidos fúlvicos (FAF), ácidos húmicos (FAH), huminas (HUM) e na fração leve (C_{FL}) de um Latossolo Vermelho-Amarelo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm, em sistema de plantio direto e convencional, em razão de diferentes doses de adubação nitrogenada⁽¹⁾. Fonte: Leite et al. (2005).

Sist ⁽²⁾	Dose N (kg ha ⁻¹)	FAF	FAH	HUM	FAH/FAF
		Mg. ha ⁻¹			
0 – 5 cm					
FN	-	1,47	1,24	8,59	0,84
PD	0	1,59 a	1,33 d	9,60 b	0,84
	60	1,41 b	1,52 c	11,7 a	1,08
	120	1,43 b	1,53 c	9,34 bc	1,07
	180	1,46 b	1,40 d	12,47 a	0,96
PC	0	1,12 b	1,75 c	8,48 d	1,56
	60	1,30 b	3,59 a	7,85 d	2,76
	120	1,27 b	1,09 d	8,66 cd	0,86
	180	1,55 b	2,59 b	8,44 d	1,67
5 – 10 cm					
FN	-	1,13	0,96	6,62	0,85
PD	0	2,51 a	1,93 a	9,42 b	0,77
	60	1,66 b	1,22 de	11,39 a	0,73
	120	1,11 e	1,08 e	9,43 b	0,97
	180	1,44 cd	1,00 e	10,76 a	0,69
PC	0	1,52 bc	1,36 cd	9,76 b	0,89
	60	1,05 e	1,52 bc	8,71 c	1,45
	120	1,44 cd	1,36 cd	8,42 c	0,94
	180	1,25 de	1,70 ab	9,40 b	1,36

Continua...

Tabela 6. Continuação

Sist ⁽²⁾	Dose N (kg ha ⁻¹)	FAF	FAH	HUM	FAH/FAF
		Mg. ha ⁻¹			
10 – 20 cm					
FN	-	1,06	0,91	6,20	0,86
PD	0	0,93 bc	1,50 a	9,37 b	1,61
	60	1,89 a	1,26 a	10,75 a	0,67
	120	1,13 bc	1,70 a	11,22 a	1,50
	180	1,14 bc	1,31 a	9,15 b	1,15
PC	0	0,84 c	1,64 a	8,66 c	1,95
	60	1,22 b	1,26 a	9,43 b	1,03
	120	1,29 b	1,50 a	9,33 b	1,16
	180	1,31 b	1,31 a	9,24 b	1,00
20 – 40 cm					
FN	-	0,80	0,68	4,68	0,85
PD	0	1,50 a	1,14 c	3,01 c	0,76
	60	1,20 d	1,25 b	3,19 b	1,04
	120	1,21 d	1,28 b	3,42 a	1,06
	180	1,20 d	1,09 d	3,18 b	0,91
PC	0	1,16 d	1,62 a	3,02 c	1,40
	60	1,00 e	1,32 b	3,15 b	1,32
	120	1,30 c	1,03 d	3,17 b	0,79
	180	1,40 b	1,03 d	2,79 d	0,74

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra nas colunas, dentro de cada camada de solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

⁽²⁾FN: floresta nativa de cerrado; PD: plantio direto; PC: preparo convencional.

Manipulação da quantidade e qualidade dos aportes orgânicos

O manejo de resíduos culturais, especialmente por meio da quantidade e da qualidade da biomassa aplicada ao solo, tem gerado benefícios sobre a qualidade do solo, produtividade das culturas e emissões líquidas de gases de efeito estufa para a atmosfera. O aumento dos estoques de COT, por meio da aplicação desses resíduos, depende, além da quantidade e da qualidade do material incorporado ao solo, das propriedades do solo, das condições climáticas e do manejo do solo. Por exemplo, há variações na dinâmica do C derivado de resíduos de milho e soja, com diferenças observadas no tamanho e na estabilidade dos agregados do solo, na suscetibilidade à erosão e em outras características físicas do solo (BATJES, 1999). Lal (1997) apresentou uma estimativa de produção de resíduos para as principais culturas e considerou, em média, um aporte de 3,4 Pg por ano ($1\text{Pg} = 10^{15}$ g). Assumindo-se que o teor médio do C dos resíduos é de 45%, o C total assimilado nos resíduos culturais é em torno de 1,5 Pg. C ano⁻¹. Considerando-se que 15% do C assimilado no resíduo pode ser convertido nas frações húmicas, isso pode propiciar o seqüestro de C na taxa de 0,2 Pg C ano⁻¹.

A importância das características químicas para determinar a qualidade do aporte orgânico e a disponibilidade de nutrientes é realçada em diversos trabalhos (PALM et al., 2001). Os percentuais de nitrogênio (N), lignina e polifenóis e as relações C:N, lignina:N e polifenóis:N são os principais determinantes da composição química (MANFOGOYA; DZOWELA; NAIR, 1997). Quando a relação lignina:N ou polifenóis:N do material vegetal aumenta, a taxa de decomposição do material diminui e a disponibilidade de N em curto prazo pode diminuir. Quanto ao uso de aportes orgânicos para aumentar os estoques do C orgânico do solo em condições tropicais, são necessárias quantidades elevadas de adições anuais (SNAPP; MAFONGOYA; WADDINGTON, 1998). Aproximadamente 7 Mg ha⁻¹. ano⁻¹ de resíduos com alta relação C:N (raízes, galhos) ou 10t ha⁻¹.ano⁻¹ de resíduos com baixa relação C:N (folhas de adubos verdes) são requeridos para manter o teor do C orgânico no solo em 1,0 dag kg⁻¹ (JANSSEN, 1993).

Por isso, o uso combinado de fertilizantes químicos e materiais orgânicos tem sido recomendado como importante sistema de manejo alternativo, possibilitando a manutenção de alta produtividade, com estabilidade, principalmente quando o material orgânico aplicado apresenta alta relação C:N e altos conteúdos de lignina e polifenóis, e para regiões onde a recomendação de uso de fertilizante é disponibilizada. Em um experimento de longa duração (16 anos), em Argissolo Vermelho-Amarelo, com cultivos de milho exclusivo e consorciado com feijão, e fertilização química e orgânica (palhada de soja e feijão + esterco bovino), Leite et al. (2003b) observaram que os estoques totais de C e N foram maiores nos tratamentos com as duas adubações, em comparação com aqueles com apenas uma fonte ou mesmo sem adubação (testemunha) (Tabela 7).

Na escolha do aporte orgânico, as leguminosas, via de regra, têm sido escolhidas, comparativamente àquelas espécies não-leguminosas, especialmente quando o aumento da disponibilidade de nutrientes é o principal objetivo. Isso é decorrente de as espécies leguminosas geralmente possuírem maiores teores de N e menores de C do que espécies não-leguminosas e, por isso, promoverem mineralização mais rápida de N quando aplicadas ao solo. Os diversos benefícios obtidos pela cultura principal, promovidos pelos resíduos de leguminosas ou adubos verdes, tanto da parte aérea quanto das raízes, são largamente reportados na literatura (BIEDERBECK; ZENTNER; CAMPBELL, 2005; CHAVES et al., 2004; KUMAR et al., 2003). Embora o aporte de C por meio da parte aérea das plantas seja considerado como a mais importante fonte, há alguns estudos que relatam uma significativa transferência de C via rizosfera e isso é muito importante na formação da MOS (LAL, 2003).

A liberação de nutrientes, a partir de aportes orgânicos, para coincidir com a demanda de crescimento das plantas, é outro fator essencial no manejo adequado da MOS, podendo ser afetada por vários fatores, incluindo-se o tempo de aplicação, a qualidade e quantidade desses aportes e o método de aplicação. Além disso, os diferentes padrões de absorção de nutrientes e desenvolvimento de raízes entre as culturas são aspectos importantes na seleção de práticas de manejo que objetivem aumentar a disponibilidade de nutrientes advindos dessas fontes.

Os efeitos em longo prazo dos aportes orgânicos sobre a produtividade do solo são componentes essenciais das estratégias de manejo sustentáveis para agroecossistemas. Os efeitos residuais desses aportes podem ser resultado dos compostos orgânicos física e quimicamente estabilizados e podem constituir compartimentos recalcitrantes da MOS, os quais podem atuar como importantes reservatórios de C.

Tabela 7. Estoques totais de carbono orgânico (COT) e nitrogênio (NT) nas profundidades de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo, em razão das adubações mineral e orgânica e em floresta atlântica⁽¹⁾.

Adubo ⁽²⁾ mineral	Adubo orgânico		Média	adubo orgânico		Média
	O	AO		O	AO	
	COT (Mg ha ⁻¹)			NT (Mg ha ⁻¹)		
0-10 cm						
FA	35,00	± 5,29		2,59	± 0,41	
O	18,8b ⁽¹⁾	23,35 a	21,10	1,54 b	1,98 a	1,76
AM1	21,65 b	26,50 a	24,07	1,64 b	2,11 a	1,87
AM2	20,61 b	25,91 a	23,26	1,56 b	2,09 a	1,82
10-20 cm						
FA	27,21	± 2,00		2,19	± 0,16	
O	18,0b ⁽¹⁾	22,72 a	20,38	1,53 b	1,86 a	1,69
AM1	18,12 b	24,81 a	21,46	1,56 b	2,02 a	1,79
AM2	19,38 b	24,14 a	21,76	1,44 b	1,95 a	1,69
0-20 cm						
FA	63,95	± 5,49		4,88	± 0,51	
O	36,9b ⁽¹⁾	48,06 a	42,49	3,07 b	3,84 a	3,45
AM1	39,71 b	51,30 a	45,50	3,20 b	4,13 a	3,66
AM2	39,98 b	50,05 a	45,01	3,01 b	4,04 a	3,52

⁽¹⁾Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si ao nível de 5% (teste F). ⁽²⁾FA: floresta atlântica; O: testemunha; AM1: 250 kg ha⁻¹ de 4-14-8 + 20 kg N ha⁻¹ em cobertura; AM2: 500 kg ha⁻¹ de 4-14-8 + 40 kg N ha⁻¹ em cobertura; AO: 40 m³ ha⁻¹. Fonte: Leite et al. (2003b).

Manipulação da fauna do solo

Os organismos do solo têm evoluído com três principais limitações: (1) mover-se em ambientes densos e compactados; (2) alimentar-se de recursos de baixa qualidade; (3) tolerar espaços porosos secos ou encharcados. A decomposição dos resíduos orgânicos é proximamente associada às atividades microbianas. Embora a comunidade microbiana seja numerosa e diversa, suas atividades são limitadas por microssítios, muitas vezes em razão da incapacidade de se mover em solos compactados. Eles dependem das raízes e da fauna do solo para terem acesso a novos substratos. Embora existam muitos tipos de invertebrados de solo (micro, meso e macrofauna), as minhocas e os cupins do grupo da macrofauna são os mais prontamente acessíveis e potencialmente manejáveis no ambiente solo. Esses macrorganismos não somente ingerem grandes quantidades de liteira e solo, como também se movem ativamente no solo, desempenhando um papel regulatório na dinâmica da MOS. A passagem de solo e de MOS através do aparelho digestivo das minhocas e dos cupins aumenta fortemente a mineralização da MOS. Em poucas horas, a digestão desses macrorganismos pode resultar na fragmentação de resíduos orgânicos e conseqüente liberação de quantidades significativas de nitrogênio mineral e fósforo. Em médio e longo prazos, o efeito contínuo desse processo propicia significativa melhoria da estrutura do solo.

Em ambientes com condições adequadas para suas atividades, a macrofauna, especialmente as minhocas e os cupins, tornam-se importantes reguladores da atividade microbiana. Esses macrorganismos, entretanto, são muito sensíveis à perturbação do solo e uso de herbicidas. Em alguns estudos, tem-se relatado um declínio drástico na biomassa da macrofauna do solo em sistemas de monocultivos com alto aporte de insumos externos, comparativamente a sistemas agroflorestais (FERNANDES et al., 1997). Solos em processo de degradação tendem a apresentar baixa população de fauna do solo e uma significativa correlação entre o aumento da produtividade vegetal e a biomassa de cupins (LAVELLE et al., 1992). Nesse sentido, práticas de manejo, tais como, o plantio direto e o aporte de resíduos permanentes ao

solo, devem promover o desenvolvimento de uma fauna de solo ativa e diversa, contribuindo diretamente para a melhoria dos estoques de C orgânico do solo.

Considerações Finais

O desenvolvimento de sistemas de produção que estejam calcados na melhoria da fertilidade do solo por meio do manejo adequado da MOS é um dos desafios atuais da agricultura desenvolvida nos trópicos. Para isso, é fundamental que sejam estabelecidas linhas de pesquisa que otimizem o conhecimento acerca da dinâmica da MOS em solos tropicais. Inseridos nesse contexto, estão a identificação de novos métodos de determinação de C orgânico total e dos vários compartimentos de C; a criação de modelos de simulação adaptados às condições tropicais, os quais estimem os impactos do uso da terra sobre a dinâmica da MOS e seqüestro de C, e o desenvolvimento de uma base de dados georreferenciada de informações biofísicas e sócio-econômicas com a intensificação do uso de Sistemas de Informação Geográfica.

É notório que há, ainda, muito que se pesquisar sobre o papel da MOS, especialmente em ambiente tropical. No entanto, o desafio mais urgente é aplicar o conhecimento já existente na criação de sistemas de uso da terra sustentáveis, particularmente em regiões onde a pressão para o aumento de produção, aliada à degradação ambiental, é muito intensa.

Referências

- AMADO, T. J. C. Matéria orgânica no solo no sistema plantio direto: a experiência do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO SOBRE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 3., 2002, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS, 2002. 4 CD-ROM.
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo sob plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

BATJES, N. H. **Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil.** Wageningen: ISRIC, 1999. 114 p. (ISRIC. Technical Paper, 30). Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change - NRP Report n. 410-200-031.

BEARE, M. H. Fungal and bacterial pathways of organic matter decomposition and nutrient mineralization in arable soils. In: BRUSSARD, L.; FERRERA-CERRATO, R. (Ed.). **Soil ecology in sustainable agriculture system.** Boca Raton, FL: CRC Press, 1997. p. 39-70.

BIEDERBECK, V. O.; ZENTNER, R. P.; CAMPBELL, C. A. Soil microbial populations and activities as influenced by legume green fallow in a semiarid climate. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v. 37, n. 10, p. 1775-1784, 2005.

CAMBARADELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CHAVES, B.; NEVE, S. de; HOFMAN, G.; BOECKX, P.; CLEEMPUT, O. van. Nitrogen mineralization of vegetable root residues and green manures as related to their (bio)chemical composition. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 21, n. 2, p. 161-170, 2004.

DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S.; DORAN, J. W. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (Ed.). **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems.** Honolulu: University of Hawaii, 1989. p. 33-67.

ESWARAN, H.; BERG, E. van den; REICH, P.; KIMBLE, J. Global soil carbon resources. In: LAL, R.; KIMBLE, E.; STEWART, B. A. (Ed.). **Soil and global change.** Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. p. 27-43.

FERNANDES, E. C. M.; MOTAVALLI, P. P.; CASTILLA, C.; MUKURUMBIRA, L. Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, n. 1/4, p. 49-67, 1997.

FOLLET, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 1/2, p. 77-92, 2001.

FOLLET, R. F.; McCONKEY, B. The role of cropland agriculture for C sequestration in the Great Plains. In: GREAT PLAINS SOIL FERTILITY CONFERENCE, 8., 2000, Denver. **Proceedings...** Brookings: P&PI, 2000. p. 1-15.

GIL-STORES, F.; TRASAR-CEPEDA, C.; LEIROS, M. C.; SEOANE, S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 37, n. 5, p. 877-887, 2005.

HIMES, F. L. Nitrogen, sulfur and phosphorus and the sequestering of carbon. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Soil Processes and the Carbon Cycle.** Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 315-319.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 27, n. 4, p. 408-416, 1998.

JANSSEN, B. H. Integrated nutrient management: the use of organic and mineral fertilizers. In: REULER, H. V.; PRINS, H. (Ed.). **The role of plant nutrients for sustainable food crop production in sub-Saharan Africa**. Leidschendam: VKP, 1993. p. 89-106.

JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; BRANDT, S. A.; LAFOND, G. P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 6, p. 1799-1806, 1992.

KUMAR, U. M.; SINGH, G.; VICTOR, U. S.; SHARMA, K. L. Green manure: its effect on soil properties and crop growth under rice-wheat cropping systems. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 19, n. 2, p. 225-237, 2003.

LAL, R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 22, n. 2, p. 151-184, 2003.

LAL, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, n. 1/2, p. 81-107, 1997.

LAL, R. Soil processes and the greenhouse effect. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 199-212.

LAVELLE, P.; SPAIN, A. V.; BLANCHART, E.; MARTIN, A.; MARTIM, S. The impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. A. **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p. 157-185. (SSSA. Special Publication, 29).

LEITE, L. F. C.; AZEVEDO, D. M. P.; TEIXEIRA NETO, M. L. Estoques de carbono e teores de fósforo e potássio em Latossolo Amarelo sob sistemas de plantio direto e preparo convencional nos cerrados do Meio-Norte do Brasil. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. [Anais...]. Santa Maria: UFSM: SBSC, 2004. 1 CD-ROM.

LEITE, L. F. C.; LOPES, A. N. C.; DANTAS, J. S.; SOUZA, F. P.; CARDOSO, M. C. Compartimentos da matéria orgânica em Latossolos dos Cerrados sob diferentes tipos de preparo e doses de adubação nitrogenada. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 6., 2005, Rio de Janeiro. **Resumos expandidos...** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. p. 36-38. (Embrapa Solos. Documentos, 70).

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, P. L. O. A.; MATOS, E. S. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow Podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic Forest Zone, south-eastern Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 41, n. 4, p. 717-730, July 2003a.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L.; MACHADO, P. L. O. A.; GALVÃO, J. C. C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 5, p. 821-832, 2003b.

LOPES, A. C. L.; LEITE, L. F. C.; MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J.; ARAÚJO, A. Estoques de carbono e teores de fósforo e potássio em Latossolo Amarelo sob sistemas de plantio direto e preparo convencional nos cerrados do Meio-Norte do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBCS: Embrapa Solos-UEP Recife, 2005. 1 CD-ROM.

MANFOGOYA, P. L.; DZOWELA, B. H.; NAIR, P. K. Effect of multipurpose trees, age of cutting and drying method on pruning quality. In: CADISCH, G.; GILLER, K. E. (Ed.). **Driven by nature: plant litter quality and decomposition**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 167-174.

PALM, C. A.; GACHENKO, C. N.; DELVE, R. J.; CADISCH, G.; GILLER, K. E. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 83, n. 1/2, p. 27-42, 2001.

PICCOLO, A.; MBAGWU, J. S. C. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 6, p. 1801-1810, 1999.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. de A. **Fracionamento físico do solo em estudos de matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p.

SCHLESINGER, W. H. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: TRABALKA, J. R.; REICHLER, D. E. (Ed.). **The changing carbon cycle: a global analysis**. New York: Springer-Verlag, 1986. p. 194-220.

SNAPP, S. S.; MAFONGOYA, P. L.; WADDINGTON, S. Organic matter technologies for integrated nutrient management in smallholder cropping systems of southern Africa. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 71, n. 1/3, p. 185-200, 1998.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMMER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1996. p. 1011-1020. (Soil Science Society of America Book. Series, 5).

WOLF, B.; SNYDER, G. H. **Sustainable soils: the place of organic matter in sustaining soils and their productivity**. New York: Haworth Press, 2003. 347 p.

Capítulo IV

Processos microbiológicos e bioquímicos do solo em sistema plantio direto

*Ademir Sérgio Ferreira de Araújo
Jussara Silva Dantas
Regina Teresa Rosim Monteiro
Luiz Fernando Carvalho Leite*

Introdução

O solo é um sistema complexo composto de cinco principais componentes: água, ar, material mineral, matéria orgânica e organismos que interagem entre si, cuja variação de um deles pode ocasionar alterações nos demais (ALEXANDER, 1977). A fração biológica é um dos principais componentes do solo, sendo composta por pequenos animais (mesofauna) e microrganismos (microfauna e microflora). Os componentes mais numerosos da fração biológica do solo são os microrganismos, e as transformações que eles promovem exercem efeitos diretos e indiretos na produtividade e na qualidade dos produtos agrícolas. O conhecimento sobre os processos e seus efeitos torna-se essencial para o manejo adequado do solo, como meio para o crescimento vegetal e o uso racional de outros recursos naturais e insumos manufaturados, especialmente os fertilizantes químicos e pesticidas, que contribuem para a elevação do custo de produção e podem representar ameaças ao meio ambiente, se não forem utilizados adequadamente (SIQUEIRA; FRANCO, 1988).

Os microrganismos têm um papel importante no funcionamento e na sustentabilidade do agrossistema, porque atuam na gênese e morfologia dos solos, na troca de nutrientes no sistema solo-planta e, principalmente, na ciclagem de compostos orgânicos. Segundo Colozzi Filho, Balota e Andrade (1999), os microrganismos promovem a decomposição de resíduos, a mineralização e a absorção de determinados nutrientes pelas plantas, melhorando sua nutrição e resistência a doenças e estresses abióticos. De outro lado, segundo os mesmos autores, as plantas são fontes de carbono no solo e estimulam a atividade microbiana. O aumento dessa atividade promove a agregação de partículas de solo e amplia a retenção de água e oxigênio, favorecendo o desenvolvimento de plantas e microrganismos, levando o agrossistema a uma nova situação de equilíbrio, provavelmente mais próxima da sustentabilidade.

O sistema plantio direto

O Sistema Plantio Direto (SPD) é caracterizado pela semeadura realizada diretamente sobre os restos culturais do cultivo anterior, sem nenhum preparo do solo (aração e gradagem). Atualmente, no Brasil, estima-se ao redor de vinte e cinco milhões de hectares cultivados no SPD, atingindo quase 25% da área com produção de grãos (Fig. 1). Desse total, uma grande parte, cerca de dez milhões de hectares, encontra-se na região do Cerrado (CERVI, 2003 citado por LOPES et al., 2004).

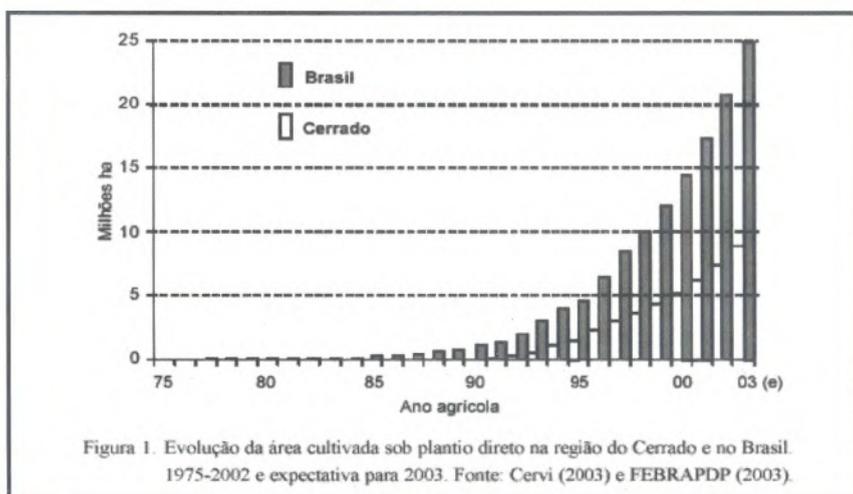


Fig. 1. Evolução da área cultivada em SPD na região do Cerrado e no Brasil, entre 1975 e 2002, e a estimativa para 2003.

Fonte: Cervi (2003) citado por Lopes et al. (2004).

O SPD tem sido uma das melhores alternativas para a manutenção da sustentabilidade dos recursos naturais na utilização agrícola dos solos. Segundo Oliveira et al. (2002), ao se adotar o SPD, perde-se menos solo, água e nutrientes por erosão em relação ao sistema de cultivo convencional (SCC), em razão da não-desagregação do solo e da manutenção da cobertura vegetal e palha na sua superfície. Na Fig. 2, estão ilustradas as diferenças entre o SPD, o SCC e o sistema natural.

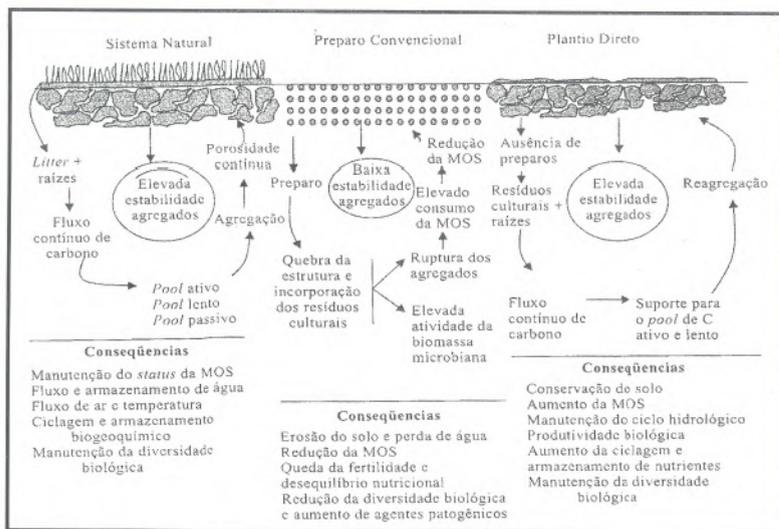


Fig. 2. Diferenças básicas entre o sistema natural, o SCC e o SPD.
Fonte: Sá (1999).

O plantio direto não deve ser visto apenas como um procedimento de semeadura em solo não revolvido e protegido por resíduos vegetais de culturas anteriores. O SPD envolve combinação de práticas culturais ou biológicas, tais como, uso de produtos químicos (fertilizantes e pesticidas), de culturas com coberturas vegetais diferenciadas (leguminosas e gramíneas) e combinações de espécies com exigências nutricionais distintas (SÁ, 1999).

Processos microbiológicos e bioquímicos no sistema plantio direto

A atividade biológica está concentrada nas primeiras camadas do solo, nas profundidades entre 1 e 30 cm. Nessas camadas, o componente biológico ocupa uma fração de menos que 0,5% do volume total do solo e representa entre 2% e 5% da matéria orgânica. Esse componente biológico consiste, principalmente, de

microrganismos que realizam diversas funções essenciais para o funcionamento do solo. Os microrganismos decompõem a matéria orgânica, liberam nutrientes em formas disponíveis às plantas e degradam substâncias tóxicas. Além disso, formam associações simbióticas com as raízes das plantas e atuam no controle biológico de patógenos, influenciam a solubilização de minerais e contribuem para a estruturação e agregação do solo (POWLSON; BROOKES; CHRISTENSEN, 1987).

As transformações que ocorrem no solo resultam de inúmeros processos microbiológicos e bioquímicos distintos, cuja relevância e consequência para o SPD são apresentados na Tabela 1.

Decomposição do carbono

Os resíduos orgânicos, principalmente a palhada da cultura anterior, são componentes importantes no SPD. Eles representam uma grande quantidade de carbono, imobilizado por meio da fotossíntese, e constituem uma importante fonte de energia e nutrientes para os microrganismos. A velocidade com que um resíduo é consumido pela microbiota depende da sua constituição química, das condições ambientais e dos sistemas de manejo do solo.

Tabela 1. Processos microbiológicos e bioquímicos do solo no SPD.

Processo microbiológico/bioquímico	Importância para o agrossistema no SPD
Decomposição de resíduos orgânicos ricos em carbono	a) Dinâmica da matéria orgânica do solo b) Libera nutrientes às plantas
Atividade da biomassa microbiana do solo	a) Controle do ciclo interno de nutrientes b) Regulação do metabolismo do solo c) Dinâmica da matéria orgânica do solo d) Reservatório lábil de nutrientes no solo
Decomposição de substâncias naturais específicas (lignina, quitina, tanino)	a) Precusores de substâncias húmicas b) Liberação de produtos antimicrobianos no solo.
Produção e secreção de enzimas extracelulares no solo	a) Degradação de compostos complexos no solo b) Metabolismo global e transformações inorgânicas no solo
Mineralização de compostos orgânicos ricos em nutrientes (N, P, K, S)	a) Aumenta a disponibilidade de nutrientes às plantas b) Atua nos ciclos biogeoquímicos dos elementos
Imobilização de elementos minerais	a) Reduz a disponibilidade de nutrientes às plantas b) Reduz perdas para a atmosfera e os mananciais hídricos
Fixação biológica do nitrogênio (FBN)	a) Disponibiliza N às plantas b) Promove o enriquecimento do solo com N
Degradação de pesticidas	a) Promove a degradação de inseticidas, fungicidas e herbicidas. b) Evita seu acúmulo no solo e na água
Síntese de substâncias húmicas	a) Controla a dinâmica da matéria orgânica do solo b) Interfere nas propriedades físicas e químicas do solo
Formação e decomposição de agentes cimentantes e aderentes às partículas do solo	a) Favorece a agregação do solo b) Provoca modificações físicas no solo
Interação entre a microbiota e a fauna do solo	a) Decomposição e mineralização da matéria orgânica b) Favorece a formação de substâncias húmicas
Micorrização	a) Reduz os efeitos dos estresses abióticos b) Favorece a nutrição das plantas

Os resíduos orgânicos de origem vegetal apresentam composição variada, sendo composto principalmente por carboidratos, celulose, lignina, compostos nitrogenados, entre outros. No SCC a incorporação dos resíduos orgânicos, por meio do revolvimento do solo (aração e gradagem) aumenta a velocidade de decomposição com diminuição do conteúdo de matéria orgânica. De outro lado, o SPD favorece o acúmulo de matéria orgânica, em virtude da prática de conservar a palhada na superfície do solo. Dessa forma, a decomposição dos resíduos orgânicos é lenta e gradual, proporcionando uma cobertura morta e contribuindo para a conservação do solo.

Resíduos vegetais que apresentam compostos simples, como glicose e proteínas são rapidamente decompostos, se comparados com a celulose e lignina. Assim, as leguminosas, ricas em proteínas, não favorecem uma cobertura morta mais permanente do que as gramíneas, ricas em celulose. A cinética de decomposição de restos culturais depositados no solo está representada na Fig. 3.

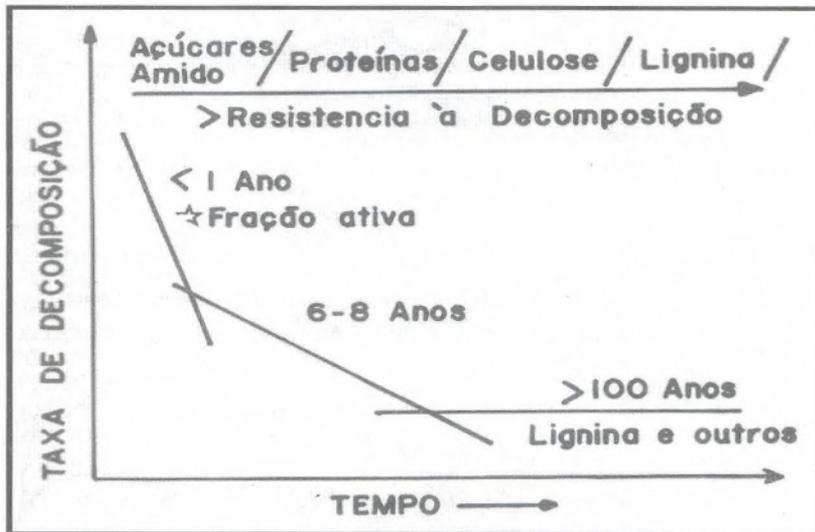


Fig. 3. Cinética da decomposição de resíduos vegetais no solo. Fonte: Siqueira e Franco (1988) adaptada pelo autor.

Atividade da biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana é definida como o principal componente vivo da matéria orgânica do solo (JENKINSON; LADD, 1981). Segundo os mesmos autores, a proporção presente de células microbianas vivas contendo carbono (C-microbiano, em mg kg^{-1} solo) geralmente compreende de 1% a 5 % do carbono orgânico total (COT), enquanto para o nitrogênio (N-microbiano, em mg kg^{-1} solo) compreende de 1% a 6 % do nitrogênio total (NT).

A atividade da biomassa microbiana controla funções-chaves no solo, como a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica, ou transformações envolvendo os nutrientes minerais. A biomassa representa uma reserva considerável de nutrientes, os quais são continuamente assimilados durante os ciclos de crescimento dos diferentes organismos que compõem o ecossistema. Conseqüentemente, os solos que mantêm um alto conteúdo de biomassa microbiana são capazes não somente de estocar, mas também de ciclar mais nutrientes no sistema (GREGORICH et al., 1994).

Há diferenças entre os conteúdos de biomassa microbiana no SCC e no SPD. Segundo Wardle & Hungria (1994), o SPD permite o acúmulo de resíduos vegetais e, dessa forma favorece o aumento da biomassa microbiana em relação ao SCC ao redor de 52% (Fig. 4). Os mesmos autores citam que essa diferença observada na biomassa entre o SPD e o SCC nos solos tropicais é mais elevada do que a observada em solos de regiões temperadas, que ficam em torno de 10% a 20%.

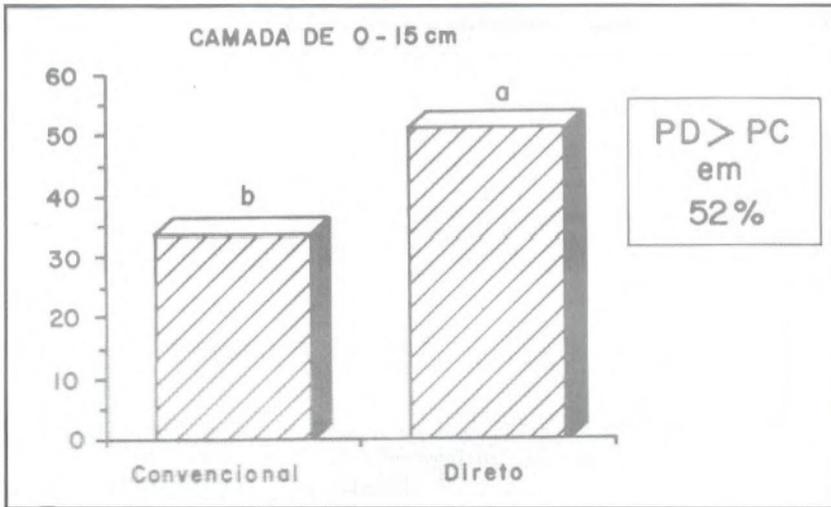


Fig. 4. Biomassa microbiana do solo ($\mu\text{g N g}^{-1}$ de solo seco) em sistema de cultivo convencional e sistema plantio direto.

Fonte: Andrade et al. (1993) citado por Wardle e Hungria (1994).

Em um trabalho avaliando diferentes sistemas de manejo do solo, D'Andréa et al. (2002) observaram que o SPD apresentou maior conteúdo de carbono da biomassa microbiana do solo (C_{mic}), quando comparado ao SCC. Além disso, houve um decréscimo significativo no C_{mic} no SCC. Resultados semelhantes foram apresentados por Perez, Ramos e McManus (2004). Os resultados mostram que as adições de carbono oxidável no SCC não são suficientes para atender à demanda da biomassa microbiana, levando ao decréscimo acentuado nos valores de C_{mic} . De outro lado, no SPD há uma tendência de aumento do C_{mic} , principalmente na camada de 0-10 cm, em razão principalmente, da manutenção da palhada na superfície do solo (VASCONCELOS et al., 1999).

Produção e secreção de enzimas no solo

As enzimas são mediadoras do catabolismo biológico dos componentes orgânico e mineral do solo. As reações catalizadas por enzimas são importantes para os processos edáficos. A atividade enzimática do solo possui características de: a) ser relacionada com o conteúdo de matéria orgânica, as propriedades físicas e a atividade da biomassa microbiana; b) ser um claro indicador de mudanças na qualidade do solo; c) envolver metodologias simplificadas (DICK, 1997). Além disso, a atividade enzimática pode ser utilizada como medida de atividade microbiana, produtividade e efeito de poluentes no solo. Mudanças na atividade microbiana, mensurada pelo metabolismo enzimático, podem indicar distúrbios no ecossistema (TATE, 1995). Atualmente, está sendo utilizado um largo número de enzimas do solo, tais como, a desidrogenase, B-glucosidase, celulase, urease, amidase, fosfatase, arissulfatase e hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA). A hidrólise de diacetato de fluoresceína representa a atividade de um complexo de enzimas do solo, como as proteases, lípases e esterases (SCHNURER; ROSSWALL, 1982).

No SPD, em decorrência da manutenção da palhada na superfície do solo, o que favorece uma menor amplitude térmica e condições adequadas de umidade, ocorre um aumento da atividade enzimática e da densidade populacional dos microrganismos, principalmente os responsáveis pela decomposição de resíduos vegetais. Araújo (2002) avaliou a atividade enzimática, medida pela hidrólise de diacetato de fluoresceína, e a população de actinomicetos de um Latossolo Vermelho manejado em SCC e SPD (11 anos de implantação). O autor observou que a atividade enzimática e a população de actinomicetos foram superiores no solo em SPD, quando comparado ao SCC (Fig. 5).

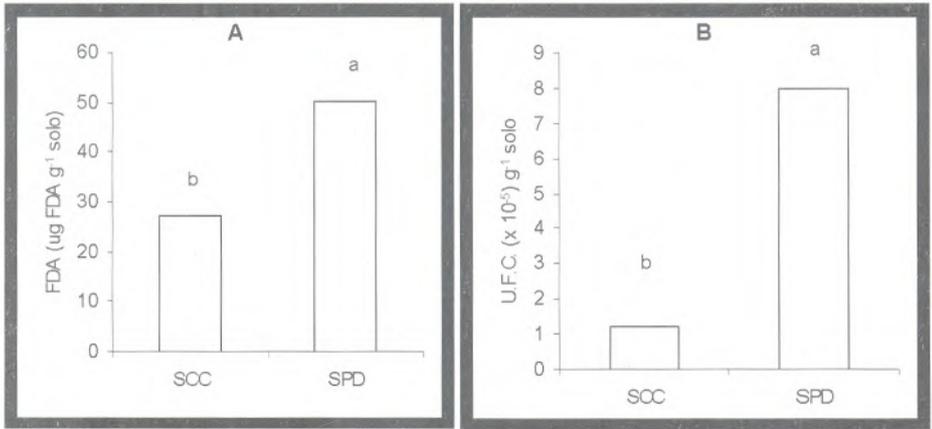


Fig. 5. Atividade enzimática medida pela hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) (A) e população de actinomicetos (B) em Latossolo Vermelho, em sistema de cultivo convencional (SCC) ou plantio direto (SPD), após 11 anos de cultivo. Fonte: Araújo (2002).

Esse aumento da população de actinomicetos ocorre, principalmente, em virtude da presença de resíduos orgânicos no SPD, os quais favorecem a presença de microrganismos heterotróficos (ARAÚJO; MONTEIRO; ABARKELI, 2003).

Ciclagem de nutrientes

Durante os processos de oxidação do carbono e biossíntese de células microbianas (biomassa), ocorrem, simultaneamente, a liberação dos elementos contidos no resíduo em decomposição e a imobilização de nutrientes minerais do solo, para atender à demanda nutricional da microbiota (SIQUEIRA; FRANCO, 1988). Os processos descritos anteriormente são conhecidos por "*mineralização ou imobilização líquida*" e são de grande importância para a fertilidade do solo.

O principal fator que controla a mineralização e/ou imobilização é a relação C/N/P/S do resíduo orgânico. Para relações C/N, C/P e C/S superiores a 30/1, 300/1 e 400/1, ocorre imobilização líquida de N, P e S, respectivamente, pelos microrganismos do solo. De outro lado, em relações C/N, C/P e C/S inferiores a 20/1, 200/1 e 200/1, ocorre mineralização líquida de N, P e S respectivamente.

Em relação ao N, no SPD a decomposição dos resíduos culturais é regulada pela relação C/N, sendo o processo essencialmente biológico (SÁ, 1999). A presença de resíduos culturais com relação C/N inferior a 20/1 (geralmente leguminosas) favorece a mineralização do N presente nos resíduos. Entretanto, se o material apresentar relação C/N superior a 30/1 (gramíneas), ocorrerá imobilização do N mineral presente no solo, indisponibilizando-o para a planta. Na prática, a adição de resíduo com elevada relação C/N antes do plantio favorecerá o aumento do número de microrganismos que utilizarão o N disponível no solo para compor sua biomassa, podendo causar deficiência de N na cultura em desenvolvimento. À medida que há o consumo do carbono (respiração microbiana e liberação de CO_2) e o estreitamento da relação C/N (por volta de 20/1), ocorre a liberação N, contido na biomassa microbiana, para as plantas (Fig. 6).

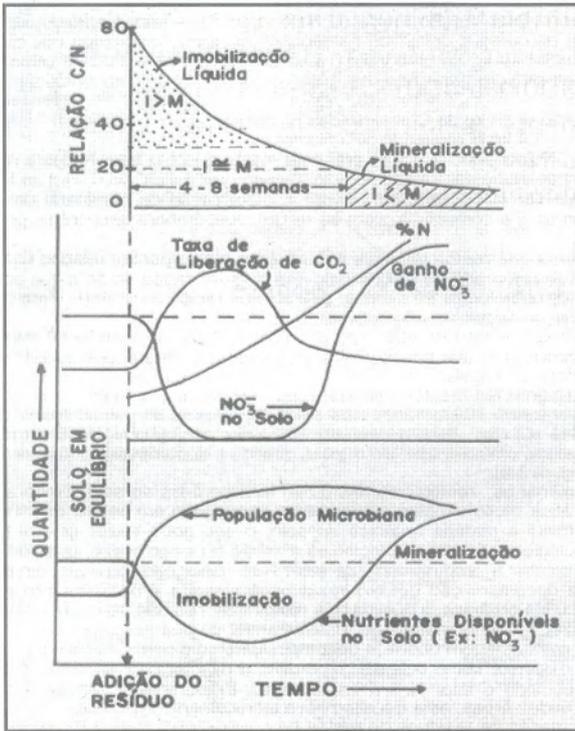


Fig. 6. Dinâmica do nitrogênio durante a mineralização de resíduos orgânicos. Fonte: Stenvenson (1986).

Em um trabalho para avaliar a utilização de N pelo trigo em solo fertilizado com *Crotalaria juncea* e/ou uréia, Araújo et al. (2005) observaram que houve uma baixa recuperação pela planta do N oriundo da *C. juncea*, enquanto, quando conjugada com a uréia, a recuperação foi maior. Os autores sugerem que houve imobilização do N do solo com a utilização da *C. juncea*, que apresenta uma relação C/N de 36/1, indisponibilizando-o para a planta (Fig. 7). De outro lado, a aplicação da uréia favoreceu a mineralização pelo estreitamento da relação C/N. O estudo reforça que a utilização de resíduos orgânicos favorece a conservação do N no solo, evitando perdas para o sistema.

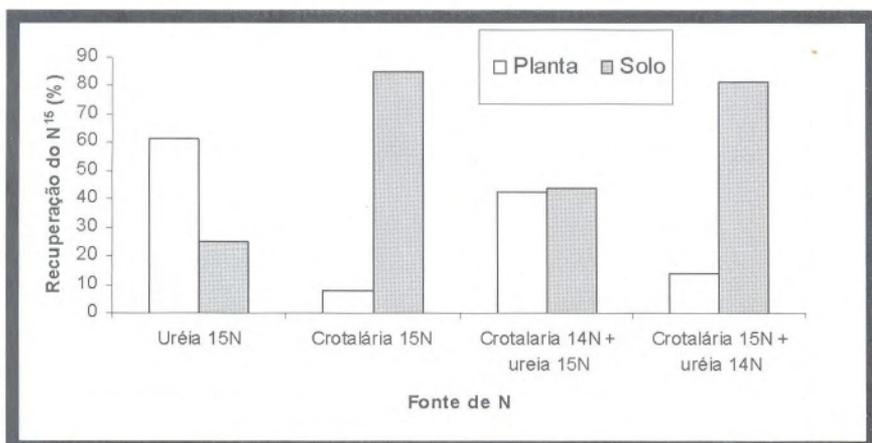


Fig. 7. Recuperação do N das fontes (uréia e crotalária) no solo e na planta de trigo.

Fonte: Araújo et al. (2005).

Nos primeiros anos de implantação do SPD, os efeitos da imobilização de N tendem a ocorrer e são mais acentuados se o solo apresentar elevado estado de degradação e baixo conteúdo de matéria orgânica. Nesse caso, haverá demanda de N pela biomassa microbiana e pela cultura, exigindo maiores doses de N mineral para suprir as exigências nutricionais (SÁ, 1999). Após alguns anos, com o aumento do conteúdo de matéria orgânica, a mineralização líquida tende a superar a imobilização, principalmente quando se utiliza a rotação leguminosas/gramíneas (Fig. 8).

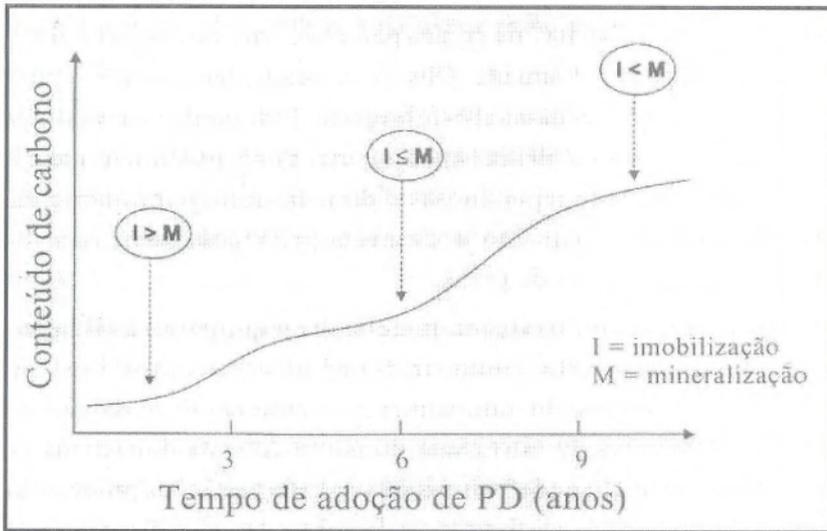


Fig. 8. Influência do tempo de adoção do SPD no aumento do conteúdo de carbono e nos processos bioquímicos da dinâmica do N no solo.

Fonte: Sá (1999).

Fixação biológica do nitrogênio (FBN)

O nitrogênio (N) é um nutriente essencial, sendo requerido em grande quantidade para o crescimento das plantas. As fontes fornecedoras de N às plantas são o solo (mineralização da matéria orgânica), os fertilizantes e o processo de fixação biológica do nitrogênio atmosférico (N_2). A maior parte do N da natureza está na forma combinada (N_2), correspondendo a quase 80% do gás atmosférico, indisponível para a absorção vegetal. A fixação biológica do nitrogênio é resultado da simbiose entre bactérias dos gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* e *Azorhizobium* e plantas leguminosas. As bactérias fixadoras possuem um complexo enzimático denominado dinitrogenase, capaz de quebrar a tripla ligação entre os dois átomos de N_2 e transformá-lo em NH_3 , que é uma forma utilizável pelas plantas (HUNGRIA, 1994). Segundo o mesmo autor, esse processo ocorre em estruturas típicas e altamente específicas denominadas nódulos, que são formados

após o estabelecimento da simbiose entre o microsimbionte (bactéria) e a planta hospedeira (leguminosas).

Entre os principais fatores que afetam a FBN, citam-se a temperatura e a umidade. Solos em SPD desenvolvem condições extremamente favoráveis à fixação biológica do nitrogênio, tais como, manutenção de temperatura adequada e boa disponibilidade de água, resultante da cobertura vegetal, estabilidade de agregados e porosidade. Hungria et al. (1995) avaliaram a população de *Bradyrhizobium japonicum* capaz de nodular a soja em solos em SPD e SCC (Fig. 9). Os autores observaram que em solos em SPD a população de *Bradyrhizobium japonicum* foi significativamente superior, quando comparada ao SCC. Houve também aumento significativo da atividade de B-galactosidade dos extratos do solo no SPD, indicando, indiretamente, a atividade indutora de genes de nodulação.

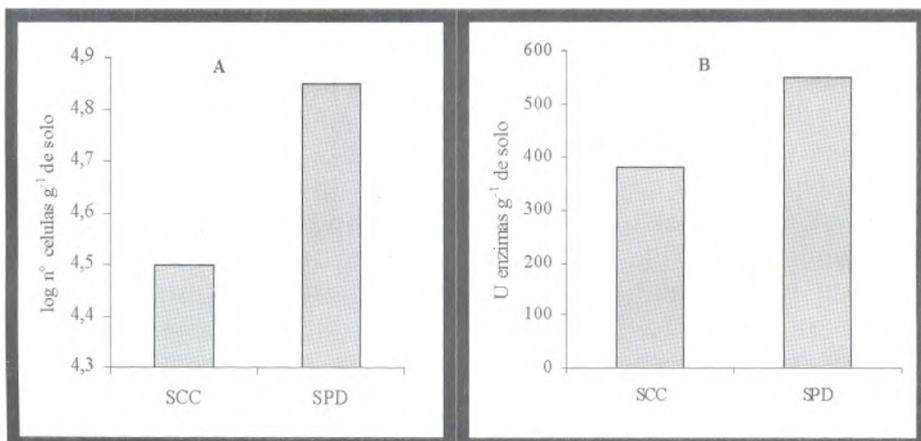


Fig. 9. População de *Bradyrhizobium japonicum* (NMP) em solo em SCC e SPD (17 anos de cultivo) (A); Atividade da B-galactosidade dos extratos de solo das parcelas em SCC e SPD.

Fonte: Hungria et al. (1995).

Degradação de pesticidas

O controle de plantas invasoras no SPD é realizado por meio de aplicações de herbicidas cujo efeito sobre a microbiota do solo é bastante variável, em razão da tolerância e da adaptação diferenciada dos microrganismos aos produtos utilizados. Entre os processos biológicos que determinam a persistência dos herbicidas no solo, a degradação microbiana constitui o de maior importância. Entretanto, a complexa interação entre os microrganismos, os substratos e os constituintes do solo influencia e determina a magnitude da biodegradação dessas moléculas (SOUZA et al., 1999). Esses mesmos autores, estudando a biodegradação do glifosato e do imazapir em dois solos com diferentes texturas e submetidos a diferentes doses, observaram que a respiração microbiana aumentou com a aplicação dos herbicidas e concluíram que a microbiota foi capaz de utilizar o glifosato e o imazapir como fontes de carbono para seu crescimento.

O glifosato é um dos principais herbicidas utilizados em SPD em virtude da sua ação pós-emergente e não seletiva (ARAÚJO; MONTEIRO; ABARKELI, 2001). Araújo et al. (2003) avaliaram a cinética de degradação de glifosato em Latossolo Vermelho, um manejado em SPD (LV11) e outro em SCC (LV0). Os resultados da biodegradação do glifosato, obtidos por meio da liberação de CO_2 pelos microrganismos no período de 32 dias, estão apresentados na Fig. 10. Observa-se que, nas amostras dos solos em que foi aplicado o glifosato no laboratório, a quantidade de CO_2 aos 32 dias foi de 0,49 e 0,46 $\mu\text{g g}^{-1}$ para os solos LV4 e LV3 respectivamente. Nas amostras dos solos em que não foi aplicado o glifosato (controles), a quantidade de CO_2 aos 32 dias foi de 0,40 e 0,38 $\mu\text{g g}^{-1}$ para os solos LV4 e LV3 respectivamente.

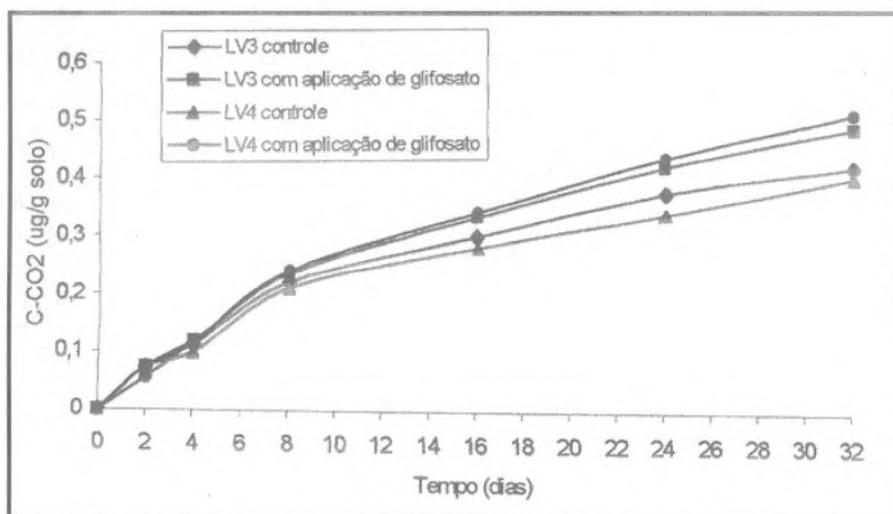


Fig. 10. Atividade microbiana de amostras de Latossolo Vermelho em SCC (LV3) e SPD (LV4), com e sem aplicação de glifosato. Média de cinco repetições. Fonte: Araújo, Monteiro e Abarkeli (2003).

As diferenças encontradas entre as amostras tratadas e os respectivos controles apresentaram significado estatístico. Esses resultados sugerem que a microbiota do solo utilizou o glifosato como fonte de carbono para o seu metabolismo, proporcionando um aumento da respiração microbiana. A maior produção de CO_2 apresentada por solos com aplicação imediata de glifosato está relacionada com a degradação do herbicida pelos microrganismos (WARDLE; PARKINSON, 1990).

Em outro trabalho, Araújo, Monteiro e Abarkeli (2003) observaram que a aplicação de glifosato aumentou a atividade enzimática do solo, medida pela hidrólise do diacetato de fluoresceína (Fig. 11). Além disso, houve um aumento significativo da atividade enzimática no solo em SPD, em razão da maior atividade biológica nesses solos.

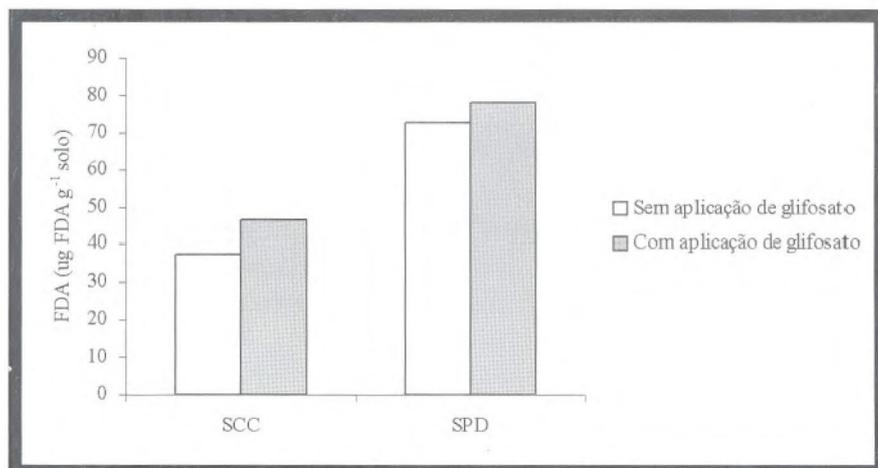


Fig. 11. Atividade enzimática, medida pela hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA), em Latossolo Vermelho em sistema de cultivo convencional (SCC) ou plantio direto (SPD) com e sem aplicação de glifosato.

Fonte: Araújo, Monteiro e Abarkeli (2003).

Micorrizas

A micorriza é uma associação simbiótica não patogênica entre fungos, benéficos e específicos do solo, e raízes de plantas superiores. A associação micorrízica apresenta um grande potencial de exploração na agricultura, tanto em relação ao aumento da capacidade de absorção de P, como de outros nutrientes. A micorrização, por meio do seu efeito físico na extensão do sistema radicular das plantas e dos efeitos fisiológicos de utilização do fósforo, representa um importante mecanismo para a maximização da eficiência de fertilizantes fosfatados (SIQUEIRA et al., 1994).

Estima-se que, para a soja no Cerrado, 260 mil toneladas de P_2O_5 (fertilizante fosfatado) poderiam ser economizadas anualmente, em função do aumento de 15% na eficiência de absorção de fósforo pelas plantas, em decorrência da micorrização (LOPES; SIQUEIRA, 1981). Outros trabalhos mostram que a micorriza pode aumentar a sobrevivência das plantas em períodos secos (COLOZZI FILHO et al., 1994), conferir resistência a patógenos (SCHONBECK; DEHNE, 1989) e incrementar a nodulação e a FBN em leguminosas (ARAÚJO; BURITY; LYRA, 2001).

O desenvolvimento das micorrizas é modificado por fatores químicos, físicos e biológicos do solo, além das práticas de manejo. No SCC, em que ocorre preparo do solo (aração e gradagem), a população micorrízica diminui, pois, segundo Evans e Miller (1990), distúrbios físicos no solo pelo cultivo reduzem severamente as micorrizas em virtude do rompimento das redes de hifas. Além disso, a manutenção do solo descoberto no SCC aumenta a temperatura e diminui a umidade em períodos quentes e secos, interferindo na germinação de esporos, na colonização de raízes e na esporulação dos fungos (SILVEIRA, 1992). De outro lado, as micorrizas atuam na melhoria da qualidade do solo observada no SPD (COLOZZI FILHO; BALOTA; ANDRADE, 1999). Colozzi Filho (1991) observou que em solos submetidos ao SPD (sucessão trigo/soja, trigo/milho e trigo/algodão), a colonização radicular do trigo foi maior, quando comparado ao SCC. Segundo o autor, o não-revolvimento do solo, as rotações de cultura, a vegetação de cobertura e a diminuição da fertilização mineral contribuem para a esporulação e colonização micorrízica.

Considerações finais

Os microrganismos assumem um papel importante no funcionamento do solo. Os processos microbiológicos e bioquímicos são fundamentais para a relação solo-planta, principalmente na disponibilidade de nutrientes. Dessa forma, os diferentes sistemas de manejo e de culturas podem atuar sobre esses processos, exercendo influência sobre a produtividade e a sustentabilidade dos agrossistemas (COLOZZI FILHO; BALOTA; ANDRADE, 1999). O SPD altera positivamente a microbiota do solo e seus processos bioquímicos. A manutenção da palhada na superfície proporciona um ambiente favorável para o aumento da diversidade microbiana do solo. De outro lado, o SCC favorece a diminuição dessa diversidade, contribuindo para a degradação do solo. A utilização de práticas de manejo que aumentem a diversidade biológica deve ser adotada, para proporcionar a exploração dos solos agrícolas de forma sustentável.

Referências

- ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1977. 467 p.
- ARAÚJO, A. S. F. de. **Biodegradação, extração e análise de glifosato em dois tipos de solos**. 2002. 72 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ARAÚJO, A. S. F. de; BURITY, H. A.; LYRA, M. C. C. P. Influência de diferentes níveis de nitrogênio e fósforo em leucena inoculada com *Rhizobium* e fungo micorrízico arbuscular. **Ecosistema**, Espírito Santo do Pinhal, v. 26, n. 1, p. 35-40, 2001.
- ARAÚJO, A. S. F. de; MONTEIRO, R. T. R.; ABARKELI, R. B. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. **Chemosphere**, Oxford, v. 52, n. 5, p. 799-804, 2003.
- ARAÚJO, A. S. F. de; MONTEIRO, R. T. R.; ABARKELI, R. B. Soil microbial activity and glyphosate degradation. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA, 21., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBM, 2001. p. 251.
- ARAÚJO, A. S. F. de; MONTEIRO, R. T. R.; ABARKELI, R. B.; SOUZA, L. S. Biodegradação de glifosato em dois solos brasileiros. **Pesticidas**, Curitiba, v. 13, p. 157-164, 2003.
- ARAÚJO, A. S. F. de; TEIXEIRA, G. M.; CAMPOS, A. X. de; SILVA, F. C.; AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O. Utilização de nitrogênio pelo trigo cultivado em solo fertilizado com adubo verde (*Crotalaria juncea*) e/ou uréia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 284-289, mar./abr. 2005.
- COLOZZI FILHO, A. Efeito do sistema de cultivo e rotação de cultura sobre a população de fungos micorrízicos vesículo-arbusculares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., 1991, Porto Alegre. **Programa e resumos...** Porto Alegre: SBCS, 1991. p. 202.
- COLOZZI FILHO, A.; BALOTA, E.L.; ANDRADE, D.S. Microorganismos e processos biológicos no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: SBCS; Lavras: UFLA, 1999. p. 487-508.
- COLOZZI FILHO, A.; SIQUEIRA, J. O.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; GUIMARÃES, P. T. G.; OLIVEIRA, E. Efetividade de diferentes fungos micorrízicos arbusculares na formação de mudas, crescimento pós-transplante e produção do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 9, p. 1397-1406, 1994.
- D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J. O.; CARNEIRO, M. A. C. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região do cerrado no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 913-923, 2002.

- DICK, R. P. Soil enzymes activities as integrative indicator of soil health. In: PANKHURST, C.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (Ed.). **Biological indicators of soil health**. New York: CAB International, 1997. p. 121-155.
- EVANS, D. G.; MILLER, M. H. The role of the external mycelial network in the effect of soil disturbance upon vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of maize. **New Phytologist**, Oxford, v. 114, n. 1, p. 65-71, 1990.
- GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; MONREAL, C. M.; ELLERT, B. H. Towards a minimum data set to assess soil organic-matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 74, n. 4, p. 367-385, 1994.
- HUNGRIA, M. Coleta de nódulos e isolamento de rizóbio. In: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. (Ed.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Goiânia: EMBRAPA-CNPAP; Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1994. p. 45-61. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 46).
- HUNGRIA, M.; ANDRADE, D. S.; COLOZZI FILHO, A.; BALOTA, E. L.; SANTOS, J. C. Ecologia microbiana em solos da região sul do Brasil. In: HUNGRIA, M.; BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. de S. **Microbiologia do solo: desafio para o século XXI**. Londrina: IAPAR: EMBRAPA-CNPSo, 1995. p. 227-234. Anais do III Simpósio Brasileiro sobre Microbiologia do Solo e IV Reunião de Laboratório para Recomendação de Estirpes de Rhizobium e Bradyrhizobium, Londrina, 6 - 10 de junho de 1994.
- JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. N. (Ed.). **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1981. p. 415-471.
- LOPES, A. S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA, 2004. 110 p.
- LOPES, E. S.; SIQUEIRA, J. O. Vesicular-arbuscular mycorrhizas: their potential in phosphate nutrition in tropical regions. In: RUSSEL, R. S.; IGUE, K.; MEHTA, Y. R. (Ed.). **The soil-root system in relation to Brazilian agriculture**. Londrina: IAPAR, 1981. p. 225-242.
- OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. de; MELLO, J. W. V. de; COSTA, L. M. da. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 393-486.
- PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; McMANUS, C. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 567-573, 2004.
- POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.; CHRISTENSEN, B.T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 159-164, 1987.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: SBCS; Lavras: UFLA, 1999. p. 267-319.

SCHNURER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 43, n. 6, p. 1256-1261, 1982.

SCHONBECK, F.; DEHNE, H. W. VA-mycorrhizae and plant health. In: VANCURA, V.; KUNC, F. (Ed.). **Interrelationships between microorganisms and plants in soil**. Amsterdam: Elsevier, 1989. p. 83-91. (Developments in Soil Science, 18), Proceedings of an International Symposium, Liblice - Czechoslovakia, June 22-27, 1987.

SILVEIRA, A. P. D. Micorrizas. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 257-282.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotecnologia do solo: fundamentos e perspectivas**. Brasília, DF: MEC: ABEAS; Lavras: ESAL: FAEPE, 1988. 235 p.

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S.; GRISI, B. M.; HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. **Microorganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Goiânia: EMBRAPA-CNPAP; Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1994. 142 p. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 45).

SOUZA, A. P. de; FERREIRA, F. A.; SILVA, A. A. da; CARDOSO, A. A.; RUIZ, H. A. Respiração microbiana do solo sob doses de glyphosate e de imazapyr. **Planta Daninha**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 387-398, 1999.

STEVENSON, F. J. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York: J. Wiley, 1986. 380 p.

TATE, R. L. **Soil microbiology**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 398 p.

VASCONCELOS, C. A.; CAMPOLINA, D. C. A.; SANTOS, F. G.; EXELPITTA, G. V.; MARRIEL, I. E. Resposta da soja e da biomassa de carbono do solo aos resíduos de cinco genótipos de sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n.1, p. 69-77, 1999.

WARDLE, D. A.; HUNGRIA, M. A biomassa microbiana do solo e sua importância nos ecossistemas terrestres. In: ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Microorganismos de importância agrícola**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. p. 195-216. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 44).

WARDLE, D. A.; PARKINSON, D. Influence of the herbicide glyphosate on soil microbial community structure. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 122, n. 1, p. 29-37, 1990.

Capítulo V

Fixação biológica do nitrogênio nas culturas da soja e do feijão-caupi

*Ademir Sérgio Ferreira de Araújo
Eulália Maria Sousa Carvalho
Rosa Maria Mota de Alcantara*

Fixação biológica do nitrogênio

O nitrogênio (N) é um elemento essencial para o crescimento vegetal e limitante à produtividade agrícola. As principais fontes do N às plantas são: 1) N do solo, proveniente da decomposição da matéria orgânica e das rochas; 2) N dos fertilizantes; 3) N da fixação biológica do nitrogênio atmosférico (N_2) (HUNGRIA et al., 1994). Ocorre também uma pequena contribuição por descargas elétricas com o N_2 , resultando em nitrato, que é adicionado ao solo e representa uma pequena parte (4%) das entradas de N no sistema. O balanço do N no sistema solo-planta refere-se às entradas e saídas do nutriente. Como os teores de N nos solos geralmente são baixos, torna-se necessária a reposição da quantidade extraída pelas culturas, considerando-se as perdas do elemento no sistema.

O N_2 representa quase 80% do gás atmosférico. Entretanto, as plantas não possuem aparato enzimático para quebrar a tripla ligação da molécula e utilizá-la como fonte de proteína. A quebra da tripla ligação do N_2 é um processo que utiliza alta energia, que pode ser industrial (síntese de NH_3), atmosférica (descargas elétricas) e biológica (complexo enzimático). A síntese da NH_3 é um processo que utiliza energia industrial (alta temperatura e pressão) por meio do petróleo (a síntese de uma tonelada de NH_3 utiliza seis barris de petróleo).

A fixação biológica do nitrogênio (FBN) é um processo biológico de quebra da tripla ligação do N_2 por meio de um complexo enzimático, denominado nitrogenase. O processo ocorre no interior de estruturas específicas, denominadas nódulos, onde bactérias do gênero *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* e *Azorhizobium* convertem o N_2 atmosférico em amônia, que é incorporada em diversas formas de N orgânico para a utilização por plantas da família das leguminosas.

A FBN constitui a principal via de incorporação do N à biosfera, contribuindo com cerca de 65% do total ou 96% da fixação por processos naturais, e é considerada, após a fotossíntese, como o processo biológico mais importante para

as plantas, sendo fundamental para a vida na Terra (HUNGRIA; CAMPO, 2005). A contribuição do N proveniente da FBN para a nutrição da planta é bastante variável e a eficiência do processo depende, principalmente, da escolha adequada dos parceiros simbióticos. A Tabela 1 mostra a contribuição da FBN para a disponibilidade de N em algumas culturas de interesse agrícola.

Tabela 1. Estimativa da contribuição da FBN para a disponibilidade de N em algumas leguminosas.

Leguminosa	N ₂ fixado (kg N ha ⁻¹)
Soja (<i>Glycine max</i>)	60 - 180
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	10 - 110
Feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i>)	70 - 300
Amendoin (<i>Arachis hypogaeae</i>)	70 - 120
Leucena (<i>Leucaena leucocephala</i>)	500 - 600
Guandu (<i>Cajanus cajan</i>)	168 - 280

Fonte: Siqueira e Franco (1988) adaptada pelo autor.

As vantagens ecológicas da FBN em relação à utilização de fertilizantes nitrogenados incluem a economia de petróleo e gás natural (fontes energéticas não renováveis) e diminuição da poluição dos recursos hídricos. As principais vantagens e desvantagens da utilização de fertilizantes nitrogenados e do processo de FBN estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Principais vantagens e desvantagens da utilização de fertilizantes nitrogenados e da FBN.

Vantagem	Desvantagem
Fertilizantes	
1- Disponibilidade imediata para as plantas	1- Gasto elevado para a síntese
2- Menor custo energético para a planta	2- Gasto com tecnologia e mão-de-obra para a síntese
	3- Gasto com transporte até o campo
	4- A eficiência de uso do N pela planta geralmente é baixa.
	5- Poluição de recursos hídricos
FBN	
1- Menor custo para o agricultor lento	1- Plantas com crescimento mais lento
2- Tecnologia limpa	2- Variabilidade de eficiência pelas diferentes estirpes
3- Manutenção da fertilidade do solo	3- Variabilidade de respostas das plantas à inoculação

Fonte: Hungria et al. (1994) adaptada pelo autor.

Processo de formação dos nódulos

A formação dos nódulos é iniciada a partir de um processo de troca de sinais entre a leguminosa hospedeira e o rizóbio. A troca é realizada pela liberação de flavonóides para o solo os quais atraem o rizóbio para próximo da raiz (HUNGRIA, 1994). Segundo o autor, a troca de sinais moleculares que ocorre entre a planta e a bactéria desencadeia uma série de processos que resultam na penetração do rizóbio específico na raiz da planta. Hungria et al. (1994) descreveram com detalhes as etapas do processo de formação dos nódulos: a) quimiotaxia da bactéria em direção às raízes; b) multiplicação do rizóbio na rizosfera; c) aderência do rizóbio às raízes; d) troca de sinais moleculares entre a planta e a bactéria; e) encurvamento do pêlo radicular; f) penetração da bactéria e

formação do cordão infeccioso; g) formação do nódulo; h) liberação das bactérias; i) desenvolvimento da nitrogenase, leg-hemoglobina e enzimas relacionadas com a FBN (Fig. 1).

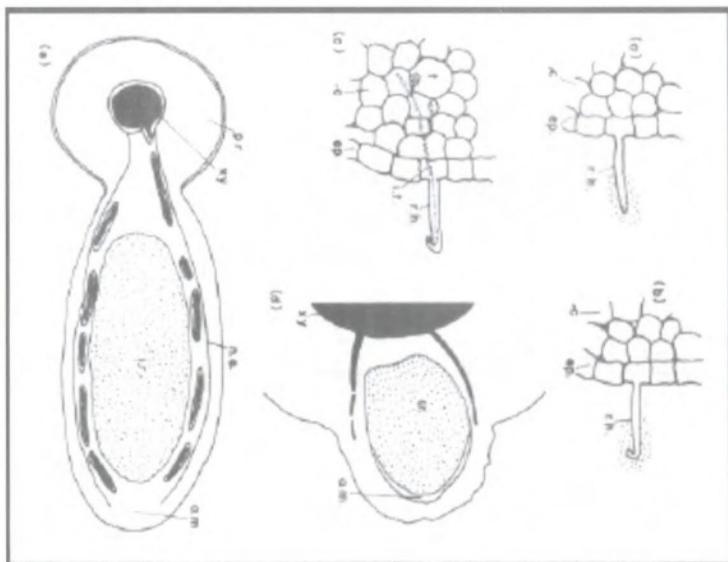


Fig. 1. Etapas do processo de formação de nódulos em leguminosas: a) quimiotaxia da bactéria em direção às raízes e multiplicação do rizóbio na rizosfera; b) aderência do rizóbio às raízes e troca de sinais moleculares entre a planta e a bactéria; c) encurvamento do pêlo radicular e penetração da bactéria com a formação do cordão infeccioso; d) formação do nódulo; e) nódulos com suas estruturas.

Fonte: Freire (1992) adaptada pelo autor.

Antes de iniciar o processo de fixação, ocorre a produção das enzimas e pigmentos, conhecidos por nodulinas, relacionadas com a FBN nos nódulos. A enzima responsável pela quebra da tripla ligação do N_2 à amônia é conhecida por nitrogenase. Outra enzima importante no processo de FBN é a glutamina sintetase (E.C.6.3.1.2), atuando no processo assimilatório e catalisando o primeiro passo na conversão do nitrogênio inorgânico (amônia) para a forma orgânica (glutamina) (GONNET; DIAZ, 2000). A alta atividade da glutamina sintetase (GS) proporciona aumento da FBN em leguminosas, uma vez que já

foi demonstrada em vários trabalhos uma correlação entre a atividade da GS e a FBN em soja (RODRIGUES et al., 1998), feijão-caupi (SILVEIRA et al., 1998) e feijão-comum (SILVEIRA et al., 1999). A leg-hemoglobina é o pigmento cuja função é regular a concentração de oxigênio nos nódulos, impedindo assim a inativação da nitrogenase e, conseqüentemente, efetivando a fixação de nitrogênio pelas bactérias (APPLEBY, 1984).

A avaliação da eficiência da nodulação pode ser feita em laboratório ou em campo. A avaliação da nodulação em campo tem uma importância muito grande para o técnico ou agricultor, pois fornece uma indicação de que o processo de FBN está ocorrendo normalmente. Os indicadores apresentados na Tabela 3 podem auxiliar o técnico ou agricultor na avaliação da nodulação e da FBN.

Tabela 3. Classificação e descrição de resposta de nodulação em leguminosas.

Classificação	Descrição	Diagnóstico
Plantas não noduladas	Sem nódulos e pouco desenvolvidas	Estirpe de rizóbio nativo ou inoculado não compatível Inoculante de má qualidade
Plantas noduladas		
1) Nódulos inefetivos	Raízes com nódulos pequenos e coloração interna branca ou verde Plantas pouco desenvolvidas e cloróticas	Estirpe de rizóbio infectiva, com simbiose inefetiva
2) Nódulos efetivos	Raízes com nódulos grandes, localizados na raiz principal, de cor interna rosa-vermelha. Plantas bem-desenvolvidas e folhas verdes	Estirpe infectiva e simbiose efetiva

Fonte: Freire (1992) adaptada pelo autor.

Além do efeito da estirpe e do inoculante na efetividade da simbiose e eficiência da FBN, outros fatores ambientais podem gerar efeitos negativos sobre o processo. Os fatores que afetam a FBN estão descritos ao final deste capítulo.

Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja

A soja (*Glycine max*) é uma das culturas agrícolas mais importantes para o Brasil, apresentando média de produtividade, nos últimos anos, de aproximadamente 2.500 kg ha⁻¹ (AGRIANUAL, 2000). A importância da cultura da soja no Brasil é cada vez maior, não só pelas divisas ganhas com a exportação, mas também pela elevada taxa de proteína de seus grãos (cerca de 40 %), o que torna o uso dessa leguminosa cada vez mais freqüente, direta ou indiretamente, na dieta do brasileiro (VARGAS; HUNGRIA, 1997).

A cultura da soja apresenta grande demanda de nitrogênio (N), chegando a acumular mais de 150 kg de N ha⁻¹ nos grãos. Considerando-se o valor financeiro relativamente baixo da soja, torna-se praticamente inviável o uso de fertilizantes nitrogenados para complementar o N fornecido pelo solo. Dessa forma, o sucesso da cultura está estreitamente relacionado à eficiência da fixação biológica do N₂ (FBN). Segundo a FAO (1985) as taxas de FBN na cultura da soja situam-se entre 60 e 168 kg de N ha⁻¹. Segundo Hungria et al. (1994), a cultura da soja seria inviável no Brasil sem a FBN e estima-se que essa tecnologia de baixo custo proporcione uma economia de 670 milhões a 1 bilhão e 10 milhões de dólares por ano em adubos nitrogenados.

As bactérias capazes de nodular a soja estão classificadas em duas espécies: *Bradyrhizobium japonicum* e *B. elkanii*. O *B. japonicum* é a bactéria mais utilizada na composição de inoculantes para a cultura da soja. O nome *Bradyrhizobium* é alusivo às taxas de crescimento dessas bactérias, pois "bradus" vem do grego, e significa lento e "Rhizobium" é o nome genérico da bactéria (HUNGRIA et al., 1994).

Seleção de estirpes de *Bradyrhizobium* e genótipos mais eficientes na FBN na região dos Cerrados

A seleção de estirpes mais eficientes e competitivas para a soja vem sendo realizada desde a introdução da cultura no Brasil (FREIRE, 1982). O objetivo da seleção é buscar estirpes dotadas de poder competitivo, capacidade de permanência no solo e alta eficiência fixadora do N_2 em simbiose com cultivares da referida leguminosa. Dessa seleção, recomendam-se estirpes a serem utilizadas para inoculação das leguminosas. As características desejáveis em estirpes de *Bradyrhizobium* que devem ser consideradas nos programas de seleção estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características das estirpes de rizóbio que devem ser consideradas durante os processos de seleção para a recomendação em inoculantes comerciais.

-
1. Capacidade de formar nódulos eficientes, com resultados de desempenho em campo
 2. Habilidade competitiva contra as estirpes naturalizadas do solo
 3. Tolerância aos defensivos agrícolas recomendados, temperaturas elevadas, deficiências hídricas, etc.
 4. Amplo espectro de nodulação perante as cultivares recomendadas
 5. Capacidade de sobreviver no solo durante o ciclo da cultura
 6. Baixa capacidade de sobrevivência no solo após o ciclo da cultura
 7. Boas condições de crescimento em âmbito industrial
 8. Boa sobrevivência durante a distribuição e uso pelos agricultores
-

Fonte: Hungria et al. (1994).

No caso dos solos do Cerrado, onde não há populações nativas de *Bradyrhizobium* capazes de nodular a soja (VARGAS; SHUET, 1980), estão sendo utilizadas as estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080. Essas estirpes apresentam elevados níveis de eficiência fixadora, capazes de aumentar o teto de produtividade da cultura por meio da fixação de quantidades mais elevadas de N_2 (VARGAS et al., 1992). Além disso, as estirpes são mais eficientes em áreas de primeiro cultivo e antigas, se comparadas com as estirpes 29w e 587 (recomendadas anteriormente e ainda utilizadas). Na Tabela 5, estão apresentadas a produtividade alcançada pela soja inoculada com as estirpes SEMIA 5079 e 5080.

Tabela 5. Ganhos de rendimento de grãos de soja inoculada com as estirpes SEMIA 5080 e SEMIA 5079 no Cerrado.

Condições	Produtividade média		
	29w + 587	SEMIA 5080 + SEMIA 5079	Ganhos
	Kg ha ⁻¹		
Solos de 1º cultivo	2005	2286	281
Solos cultivados	2951	3034	83
Médias	2372	2577	205

Fonte: Vargas et al. (2004).

A inoculação no primeiro cultivo é obrigatória e a reinoculação da soja por vários anos consecutivos promove o estabelecimento no solo de populações de rizóbio (VARGAS et al., 2004). Segundo os autores, nas áreas com populações estabelecidas, a resposta à reinoculação não é tão acentuada como nas áreas de primeiro cultivo, e o principal fator responsável por isso é a competição entre as estirpes do solo e aquelas usadas no inoculante pelos sítios de infecção nodular nas raízes, ou seja, pelos locais nas raízes onde serão formados os nódulos. Na Fig. 2, estão apresentados os rendimentos médios (kg ha⁻¹) de soja não inoculada, inoculada com estirpes de *B. japonicum*/*B. elkanii* e não inoculada recebendo 200 kg de N ha⁻¹, parcelados duas vezes, na semeadura e no florescimento (HUNGRIA; CAMPO, 2005).

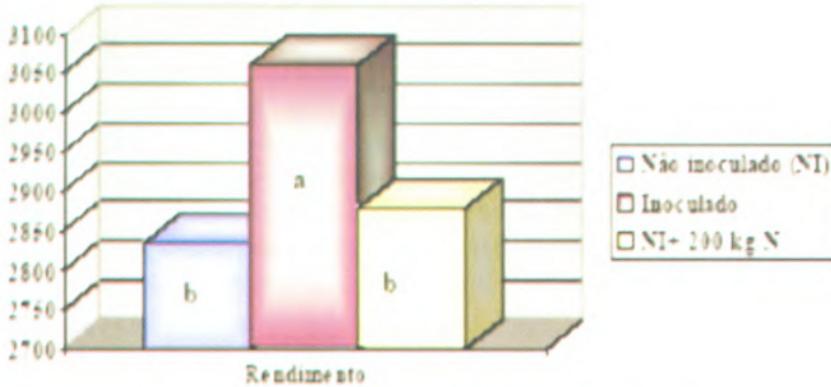


Fig. 2. Rendimento médio (kg ha⁻¹) de soja não inoculada, inoculada com estirpes de *B. japonicum*/*B. elkanii* e não inoculada recebendo 200 kg de N ha⁻¹, parcelados duas vezes, na semeadura e no florescimento. Fonte: Hungria e Campo (2005).

De outro lado, existe alta variabilidade entre genótipos de soja quanto à FBN (DOBEREINER; ARRUDA, 1967). A busca de genótipos que nodulem e fixem N₂ de modo eficiente com as estirpes estabelecidas no solo vem sendo sugerida como uma alternativa para incrementar a produtividade (WEISER; SKIPPER; WOLLUM, 1990). Por ser considerada uma leguminosa com alta eficiência de FBN, poucos são os trabalhos envolvendo o melhoramento do genótipo da soja para essa característica (VARGAS; HUNGRIA, 1997).

Ontogenia da nodulação e fixação biológica do N₂ na cultura da soja

A formação dos nódulos na soja funciona conforme descrito nas etapas do processo de nodulação em leguminosas. Entretanto, na soja nodulada, pode-se observar um período inicial de deficiência de N, que ocorre em razão da falta de sincronização entre o esgotamento das reservas de N nos cotilédones e o início da fixação do nitrogênio. Em condições de campo, a fixação biológica

do N_2 pode iniciar na segunda semana após o plantio. A ontogenia da nodulação e fixação do nitrogênio em soja, cultivar IAC-2, foi estudada por Vargas, Peres e Suhet (1982), que observaram os primeiros nódulos formados aos cinco dias após a emergência das plantas, aumentando em número ao redor de 12 dias. Após esse período inicial, a nodulação e a fixação do nitrogênio se intensificaram até o florescimento, com manutenção da atividade até a formação das vagens (Fig. 3). A partir desse ponto, inicia-se a senescência dos nódulos (inativação da nitrogenase).

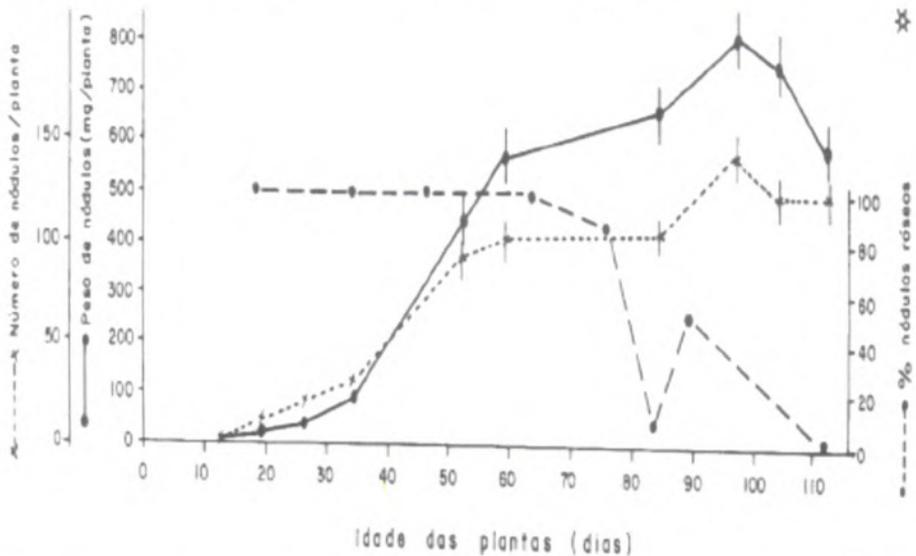


Fig. 3. Nodulação em diferentes estágios de desenvolvimento da soja IAC-2 em solo de primeiro cultivo.

Fonte: Vargas et al. (1982).

Uma avaliação inicial da nodulação, entre 10 e 15 dias após a emergência, pode ser um indicativo da eficiência do processo (VARGAS; HUNGRIA, 1997). Segundo os autores, na época do florescimento, uma planta de soja bem-nodulada deve apresentar no campo entre 15 e 30 nódulos ou entre 100 e 200 mg de nódulos secos. Outras observações descritas na Tabela 3 podem ser utilizadas para avaliar a eficiência da nodulação e da FBN.

Fixação biológica do nitrogênio na cultura do feijão-caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), também conhecido por feijão macassar ou feijão-de-corda, é uma leguminosa comestível, dotada de alto conteúdo protéico e um alimento importante para a população das Regiões Norte e Nordeste do Brasil (GRANJEIRO et al., 2005). A área de cultivo do feijão-caupi no Brasil é superior a 1,6 milhão de hectares, estando as principais regiões produtoras localizadas na região semi-árida do País (MARTINS et al., 2003). Depois do Ceará, o Piauí é o segundo maior produtor da cultura, ocupando 213.001 ha das terras piauienses, com uma produção de 51.675 t, porém com uma produtividade baixa, em média 243 kg ha⁻¹. A região semi-árida do Estado do Piauí responde com uma área de 126.591 ha de feijão-caupi, o que corresponde a cerca de 60% da área produzida no Estado, e uma produção de 19.330 t, correspondendo a 37% do total.

Como várias outras leguminosas, o feijão-caupi realiza simbiose com bactéria específica (*Bradyrhizobium* sp.), normalmente presente nos solos tropicais, apresentando capacidade de fixação biológica do N₂. Esse processo traz diversas vantagens que vão desde o aumento da produção vegetal até a contribuição para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, a recuperação de áreas degradadas e o incremento da fertilidade e da matéria orgânica do solo. Entretanto, a sua principal aplicabilidade em curto prazo está associada à economia no uso de fertilizantes nitrogenados industrializados (RUMJANEK et al., 2005).

Seleção de estirpes e genótipos mais eficientes na FBN do feijão-caupi

Estimativas da contribuição da FBN para a cultura do feijão-caupi em campo são variáveis, tendo-se obtido valores numa faixa de 40% a 90% do total de N acumulado pela cultura. Essa variabilidade pode ser atribuída a diversos fatores. Um deles está

relacionado com a capacidade que a cultura tem de ser nodulada por diferentes grupos de rizóbio, muitos deles não apresentando alta eficiência na fixação do nitrogênio. O feijão-caupi é considerado uma leguminosa eficiente na nodulação com as estirpes nativas que geralmente não respondem à inoculação, apresentando boa nodulação e eficiência na FBN, mesmo em solos de primeiro cultivo (VARGAS et al., 2004). Entretanto, as estirpes nativas geralmente são de eficiência variável.

Trabalhos realizados em alguns países tropicais mostraram a ocorrência de variação na eficiência das estirpes quanto à capacidade de fixar nitrogênio no feijão-caupi. No Brasil, as informações também são divergentes, principalmente em razão das diferentes condições de clima e solo, as quais afetam a estirpe, a planta hospedeira, a nodulação e a própria fixação do N_2 (STANFORD; VASCONCELOS; ALMEIDA, 1988).

Além da eficiência simbiótica, a capacidade de sobrevivência no solo e a habilidade competitiva com a população rizobiana nativa ou naturalizada do solo são características altamente desejáveis em estirpes de rizóbios recomendadas para inoculação em leguminosas. Alguns trabalhos já vêm selecionando estirpes para inoculação do feijão-caupi, inclusive as isoladas a partir de amostras de solo do Semi-Árido brasileiro. Martins et al. (2003), ao avaliarem algumas dessas estirpes em condições de campo do Semi-Árido, obtiveram uma produtividade de $693 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, resultado similar ao tratamento que recebeu fertilizante nitrogenado.

Os primeiros estudos desenvolvidos por Wilson (1940) sobre FBN demonstraram que a eficiência da fixação também depende do genótipo da planta. O feijoeiro nodulado pode alcançar produtividade até de $2.500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, quando se utilizam cultivares e estirpes mais adequadas (HUNGRIA et al., 1997; MENDES et al., 1994). Anteriormente, Araújo e Pereira (1983) observaram que, para as mesmas estirpes utilizadas, houve uma variação na nodulação e produção de grãos de duas cultivares de feijão-caupi. Além disso, a produtividade das cultivares inoculadas foi semelhante às parcelas com adubação mineral.

Ontogenia da nodulação e fixação biológica do N₂ na cultura do feijão-caupi

A relação entre a nodulação e o desenvolvimento do feijão-caupi é importante para a avaliação da fixação biológica do N₂. A partir dessa relação, define-se o período do ciclo da planta em que ocorre maior intensidade de fixação do nitrogênio. O feijão-caupi inicia a nodulação entre 8 e 10 dias após a emergência das plantas (XAVIER et al. 2007). Vasconcelos, Alves e Lima (1976) observaram que, em um solo arenoso, o início da nodulação em duas cultivares de feijão-caupi ocorreu aos 15 dias após a emergência das plantas, cujo período compreendido entre 35 e 45 dias (florescimento) foi o que apresentou maior nodulação. Em outro trabalho, Silveira et al. (1998) avaliaram a nodulação e a fixação do nitrogênio no feijão-caupi, utilizando a estirpe CB-756, e observaram que as maiores taxas de crescimento dos nódulos e de acúmulo de N na planta ocorreram durante a fase de florescimento em paralelo com a maior atividade da nitrogenase. Em um trabalho em andamento (XAVIER et al., 2007), tem-se observado que a nodulação de duas cultivares de feijão-caupi aumenta até o período de florescimento (entre 35 e 45 dias após a emergência). A partir desse ponto, os nódulos iniciam o processo de senescência.

Fatores que afetam a fixação biológica do nitrogênio

Temperatura e umidade

As bactérias fixadoras de N₂ sobrevivem numa ampla faixa de temperatura. Nas regiões tropicais, a faixa de temperatura ótima para a nodulação e a FBN encontra-se entre 25 e 32 °C. Entretanto, pode ocorrer uma variação maior entre as diferentes espécies cultivadas. Os extremos de temperatura são prejudiciais ao processo de nodulação. Temperaturas baixas retardam o processo de nodulação e em temperaturas altas os nódulos formados são ineficientes (FRANCO; NEVES, 1992). Em um trabalho para selecionar estirpes de *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* tolerantes a

altas temperaturas, Silva Júnior et al. (1996) obtiveram um total de 26 estirpes, isoladas da região semi-árida, que apresentaram resultados acima da média para a nodulação e atividade da nitrogenase.

Nas associações com leguminosas, a deficiência hídrica diminui a infecção dos pêlos absorventes pelo rizóbio, chegando até a inibir completamente a produção dos nódulos. Após estresse hídrico, nódulos de crescimento indeterminado podem reiniciar o crescimento e atividade, enquanto nódulos de crescimento determinado, dependendo da intensidade do estresse, senescem e novos nódulos têm que ser formados (SIQUEIRA; FRANCO, 1988). Silveira, Costa e Oliveira (2001) avaliaram a nodulação e a atividade dos nódulos de feijão-caupi submetidos a estresse hídrico e observaram que houve declínio na massa dos nódulos após o estresse hídrico. Além disso, houve uma diminuição da atividade da glutamina sintetase e do conteúdo de leg-hemoglobina dos nódulos.

Acidez do solo

A acidez do solo afeta a nutrição das plantas, a sobrevivência e a multiplicação do *Bradyrhizobium*, o processo de nodulação e a própria fixação do nitrogênio (STANFORD; VASCONCELOS; ALMEIDA, 1988). Nos solos ácidos, além da deficiência de Ca^{2+} e Mg^{2+} , podem ocorrer problemas de toxidez por Al^{3+} e Mn^{2+} (ARAÚJO, 1994). A deficiência de Ca^{2+} nos solos ácidos provoca uma diminuição da nodulação, pois o nutriente é importante para manter a integridade da raiz e favorecer o encurvamento do pêlo radicular. A calagem reduz os efeitos da acidez e da toxicidade por Al^{3+} e Mn^{2+} sobre a nodulação das leguminosas, além de beneficiar a cultura pela adição de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Disponibilidade de nutrientes no solo

Dos nutrientes minerais, o N é o que tem maior efeito sobre a fixação biológica do N_2 . O processo ocorre com eficiência em condições de baixa disponibilidade de N no solo. O crescimento dos nódulos é mais sensível ao excesso de N que à atividade da nitrogenase, e ambos são muito mais sensíveis que a infecção e eventos iniciais da formação dos nódulos (FRANCO; NEVES, 1992). O excesso de NO_3^- diminui a intensidade da deformação do pêlo radicular, diminui a adesão da bactéria à parede do pêlo e reduz o número de cordões de infecção (SIQUEIRA; FRANCO, 1988).

De outro lado, há recomendações de uso de pequenas doses de N (20 a 30 kg N ha⁻¹) aplicadas no plantio, também chamadas doses de "arranque", cuja finalidade é disponibilizar N às plantas até o início da nodulação e da FBN. As justificativas para a utilização de adubos nitrogenados no plantio da soja foram descritas em Hungria et al. (1999). Ainda em relação à soja, os autores citam a adubação nitrogenada, que não proporciona incrementos significativos na produtividade da cultura. Apenas com a adição de N mineral, ocorrerá substituição da fonte nitrogenada utilizada para suprir a necessidade da planta. De qualquer forma, segundo Hungria et al. (1999), a recomendação para a cultura da soja é que não se aplique qualquer fonte de fertilizante nitrogenado. Visando avaliar a resposta da soja em áreas de plantio direto e convencional, a pequenas doses de N no plantio, Mendes, Hungria e Vargas (2003) utilizaram quatro doses de N (0, 20, 30 e 40 kg ha⁻¹ de N) na forma de uréia, aplicadas no plantio. Todos os tratamentos foram inoculados com as estirpes SEMIA 5080 e SEMIA 5079. Os dados estão apresentados na Tabela 6 e mostram que a adição de pequenas doses de N não promoveu aumentos nos rendimentos de grãos da soja. Os resultados confirmam que, na região dos Cerrados, quando a simbiose é eficiente, não é necessário adicionar fertilizante nitrogenado no plantio da soja, mesmo em áreas de plantio direto.

Tabela 6. Efeitos das doses iniciais de N na nodulação por planta (número de nódulos, NN; peso seco dos nódulos, PSN) e na produção de grãos da cultivar de soja Emgopa 316 cultivada em sistema plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).

Dose de N Kg ha ⁻¹	Plantio direto			Plantio convencional		
	Nodulação		Produtividade kg.ha ⁻¹	Nodulação		Produtividade kg.ha ⁻¹
	Pré-florescimento NN	PSN mg		Pré-florescimento NN	PSN mg	
0	118	359	3.224	144	425	3.514
20	95	289	3.320	119	443	3.495
30	129	373	3.305	117	413	3.578
40	96	274	3.337	115	366	3.646

Fonte: Mendes, Hungria e Vargas (2003).

Em relação ao feijão-caupi, de acordo com Minchin, Summerfield e Neves (1981), quando bem-inoculado e nodulado, pode dispensar outras fontes de N e, ainda assim, atingir alta produtividade, diminuindo significativamente o custo de produção. No Brasil, o feijão-caupi não costuma receber adubação nitrogenada, porém, caso a produtividade atual fosse mantida às custas de aplicação de adubo nitrogenado, seria necessário um investimento equivalente a cerca de US\$ 13 milhões somente para a Região Nordeste brasileira, o que indica a magnitude da contribuição da FBN para essa cultura em condições de campo (RUMJANEK et al., 2005). Xavier et al. (2006) avaliaram a nodulação e o rendimento do feijão-caupi com e sem inoculação, sob diferentes doses de N, e observaram que o elemento, aplicado em altas doses, prejudicou o processo de nodulação e não proporcionou aumentos significativos do rendimento de grãos, comparados com fixação biológica do N₂.

O fósforo (P) é um nutriente limitante da produção das culturas e é de grande importância para o estabelecimento de uma boa nodulação. A deficiência do P afeta a sobrevivência da bactéria, todos os estádios de formação dos nódulos e a atividade das enzimas relacionadas com a FBN (HUNGRIA et al., 1997).

Entre os micronutrientes importantes para o processo de fixação de nitrogênio, citam-se o Molibdênio(Mo), o Ferro(Fe) e o Cobalto(Co). O Mo é o elemento-chave contido na nitrogenase, responsável pela transferência final dos elétrons da redutase da nitrogenase (Fe-proteína) para o N_2 , com a sua redução a $2NH_3$ (SIQUEIRA; FRANCO, 1988). O Co tem efeito específico sobre o crescimento da bactéria e na formação da leg-hemoglobina. A leg-hemoglobina é uma proteína que contém ferro (APPLEBY, 1984) e depende da presença do cobalto para a síntese da cobamida que participa dos passos metabólicos para a sua formação (KLIEWER; EVANS, 1963).

Adição de resíduos urbanos e industriais no solo

O aumento da atividade humana e industrial traz como consequência a geração cada vez maior de resíduos orgânicos, principalmente lodo de esgoto, lixo urbano e resíduos industriais. A utilização destes resíduos como fonte de nutrientes para as plantas e condicionadores dos solos constitui-se em uma alternativa viável na preservação da qualidade ambiental (ARAÚJO, 2004). Esses resíduos, conhecidos por biossólidos, podem trazer benefícios ou malefícios ao processo de fixação do nitrogênio, devendo ser utilizados de forma racional. Vieira (2001) avaliou o efeito do lodo de esgoto sobre a fixação do nitrogênio em soja e verificou que não houve efeito prejudicial do biossólido sobre o processo de nodulação e acumulação de N pela planta.

Outros trabalhos foram desenvolvidos para verificar o efeito de um composto orgânico proveniente de lodo têxtil sobre a nodulação e a fixação do nitrogênio em soja e feijão-caupi (ARAÚJO, 2004; ARAÚJO; MONTEIRO, 2004; ARAÚJO; MONTEIRO; CARVALHO, 2007). Os resultados mostraram que a aplicação do composto na dose recomendada não trouxe efeitos negativos sobre a nodulação e a fixação do N. Os dados mostraram que, em doses elevadas do composto, ocorreu diminuição nas variáveis analisadas. Na Fig. 4, estão apresentados os resultados do efeito do composto de lodo têxtil sobre a nodulação e a fixação do nitrogênio em soja, medida pela atividade da glutamina sintetase.

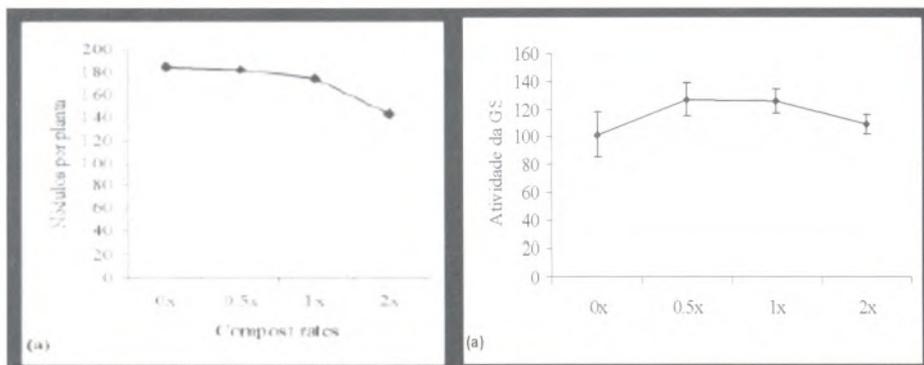


Fig. 4. Número de nódulos e atividade da glutamina sintetase (GS) em soja submetida a doses crescentes de composto de lodo têxtil.

Fonte: Araújo, Monteiro e Carvalho (2007) adaptada pelo autor.

Recentemente, Teixeira et al. (2005) avaliaram o efeito do lodo de curtume sobre a nodulação do feijão-caupi e observaram que a aplicação da dose recomendada (equivalente a 250 mg kg Cr) não apresentou efeitos negativos sobre o processo de formação de nódulos. De outro lado, o aumento da dose de aplicação do lodo prejudicou a nodulação do feijão-caupi.

Aplicação de pesticidas

A inoculação das leguminosas é efetuada colocando-se a bactéria diretamente sobre as sementes, que muitas vezes são tratadas com inseticidas e fungicidas. Além disso, pode haver necessidade de aplicação de herbicidas antes do plantio. Nesses casos, alguns pesticidas podem matar as células bacterianas, diminuir a nodulação e a FBN. De uma maneira geral, os fungicidas à base de metais pesados e a maioria dos inseticidas organoclorados e organofosforados prejudicam a nodulação (VARGAS; HUNGRIA, 1997). Tu (1981) avaliou o efeito de cinco fungicidas (Benomyl, Captan, Maneb, Thiram, Zineb) em sementes de alfafa e observou que o Thiram foi tóxico para o crescimento da bactéria em disco de papel filtro. Em relação ao

desenvolvimento das plantas em vasos, o autor observou que, em elevados níveis, os fungicidas suprimiram a nodulação, quando comparadas com plantas não tratadas ou tratadas com doses baixas.

Em outro trabalho, Araújo, A.S.F. de e Araújo, R.S. (2006) avaliaram o efeito de seis fungicidas sobre a sobrevivência da bactéria e a nodulação do feijão-comum. Os autores observaram que a sobrevivência da estirpe de *Rhizobium tropici* inoculada foi afetada negativamente por todos os fungicidas utilizados no tratamento das sementes tanto no tempo zero, quanto após 24 horas do contato do inoculante com o fungicida (Tabela 7). A exceção se deu ao fungicida Vitavax-Thiram que não apresentou efeito negativo sobre a sobrevivência da bactéria, comparado com o controle, 24 horas após o tratamento das sementes. De uma forma geral, a taxa de sobrevivência da bactéria inoculada diminuiu após 24 horas da inoculação.

Tabela 7. Sobrevivência do *Rhizobium tropici* inoculado em sementes de feijão tratadas com fungicidas.

Tratamento	0 hora (cel. semente ⁻¹)	24 horas (cel. semente ⁻¹)
Inoculação	1,3 x 10 ⁵ aA	2,7 x 10 ⁴ aB
Inoc + Benlate 500	0	0
Inoc + Captan 750 TS	1,0 x 10 ³ b	0
Inoc + Vitavax 750 PM	0	0
Inoc + Rhodiauran 700	8,3 x 10 ² cB	5,5 x 10 ³ bA
Inoc + Terraclor 750 PM	4,0 x 10 ³ bA	1,0 x 10 ² cB
Inoc + Vitavax-Thiram PM	5,2 x 10 ² cB	2,7 x 10 ⁴ aA

Fonte: Araújo, A.S.F. de e Araújo, R.S. (2006).

De acordo com Hungria, Campo e Mendes (2001), tendo em vista a dificuldade de compatibilizar a inoculação com o tratamento das sementes com fungicidas, o mais importante é avaliar cada situação. Segundo os autores, a utilização de sementes com alta qualidade fisiológica e fitossanitária deve ser recomendada nesses casos. Se as sementes forem de boa qualidade, as condições de umidade do solo forem favoráveis e em áreas sem histórico de doenças, deve-se evitar o uso de fungicidas (CAMPO; HUNGRIA, 2000). Em caso contrário, deve-se dar preferência às combinações de fungicidas menos tóxicas. De qualquer forma, uma boa nodulação depende de um grande número de células viáveis. Portanto, na presença de fungicidas, o aumento da dose do inoculante proporciona um número maior de células nas sementes (VARGAS et al., 2004).

Associação com micorrizas

A associação micorrízica apresenta um grande potencial de exploração na agricultura, em virtude do aumento da capacidade de absorção de P e de outros nutrientes (ARAÚJO; BURITY; LYRA, 2001a). A micorrização, por meio de seu efeito físico na extensão do sistema de absorção das plantas e dos efeitos fisiológicos de utilização de fósforo, representa um importante mecanismo para a maximização da eficiência de fertilizantes fosfatados (SIQUEIRA et al., 1994). Paulino, Piccini e Barea (1986) relatam que as micorrizas podem auxiliar as leguminosas nos requerimentos energéticos para a nodulação e fixação do nitrogênio, sobretudo porque as plantas micorrizadas absorvem o P do solo, que é utilizado no processo de fixação. Araújo, Burity e Lyra (2001b) avaliaram a influência da dupla inoculação *Rhizobium* e micorrizas na nodulação e crescimento de leucena e observaram que a presença das micorrizas aumentou significativamente o número de nódulos em leucena (Fig. 5). Os autores concluíram que a dupla inoculação, bactéria e micorrizas, contribuiu de forma direta para a nodulação e fixação do nitrogênio pela leucena, incrementando o crescimento da planta.

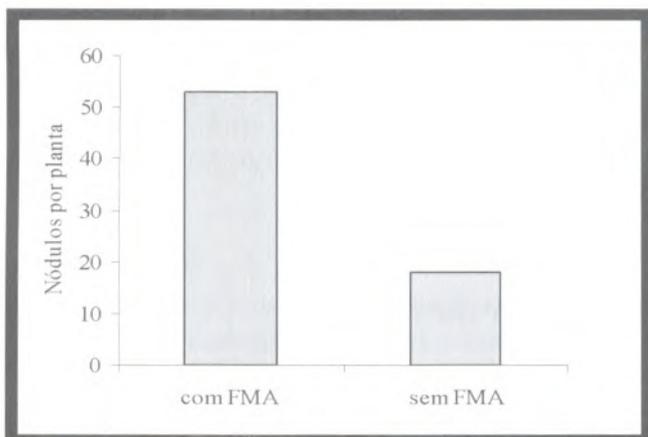


Fig. 5 . Efeito da associação *Rhizobium* e micorrizas no número de nódulos em leucena, aos 90 dias.

Fonte: Araújo, Burity e Lyra (2001b).

Inoculação de leguminosas

A inoculação consiste na técnica de se colocar em contato com a semente da leguminosa uma população de bactérias fixadoras específicas capazes de nodular a planta, formando uma simbiose eficiente.

O inoculante é um produto biológico que contém rizóbios, utilizado pelo agricultor para a inoculação das sementes. A inoculação pode ser feita nas sementes ou diretamente no solo. No Brasil, as instituições de pesquisa selecionam as estirpes mais eficientes para cada cultura e as colocam à disposição das indústrias de inoculantes. Deve-se dar preferência a inoculantes à base de turfa, um tipo de solo orgânico resultante da decomposição de restos vegetais e cujo pH é previamente corrigido para 6,5 a 7,0 (VARGAS et al., 2004). Segundo os autores, a turfa é considerada o melhor substrato para fabricação de inoculantes, em razão da proteção que confere às células do rizóbio. Existem ainda no mercado formas líquidas e sementes revestidas contendo o inoculante.

A principal característica do inoculante é a quantidade de células viáveis de rizóbio. O número mínimo de células deve ser de 10^8 células por mililitro de inoculante. Deve-se considerar que no solo existe uma população nativa de rizóbios que vão competir com a bactéria introduzida, devendo, pois, aplicar-se um número muito grande de células rizobianas.

Aquisição e utilização do inoculante

- Na aquisição e utilização dos inoculantes, alguns cuidados devem ser tomados:
- Adquirir inoculante específico para cada cultura.
- Guardar em local fresco ou, preferivelmente, em geladeira.
- Verificar o prazo de validade do produto.
- Não abrir a embalagem antes do seu uso.
- Inocular à sombra ou em local protegido da luz solar.
- Não inocular a seco.
- Não utilizar equipamentos que tenham estado em contato com combustíveis, fertilizantes ou pesticidas.
- Fazer a correção do solo.
- Verificar o número do lote e a autorização do MARA para a fabricação do inoculante.
- Não utilizar fertilizantes nitrogenados junto ao inoculante.

A técnica de inoculação está resumidamente descrita abaixo (VARGAS et al., 2004). A inoculação deve ser feita à sombra, nas horas mais frescas do dia. Recomenda-se o uso de 500 g de inoculante para cada 50 kg de sementes grandes (soja, amendoim, feijão), 30 kg de sementes médias (lentilha, leucena) ou 20 kg de sementes pequenas (desmódio) independentemente de a área ter sido inoculada ou não. Utilizar solução açucarada (100 g de açúcar por 1.000 mL de água) para conferir aderência do inoculante às sementes. Em seguida, adicionar a solução açucarada ao

inoculante, formando uma pasta homogênea, e misturar às sementes. Espalhar as sementes e deixar secar à sombra, em superfície seca e limpa. Semear em no máximo 48 horas.

Considerações Finais

A fixação biológica do nitrogênio é uma alternativa importante para o aumento da produtividade das culturas, manutenção da fertilidade do solo e economia de milhares de dólares por ano. No caso da soja, no Brasil, já existe independência completa em relação à adubação nitrogenada. Para o feijão-caupi, ainda existe a necessidade de fertilização suplementar. Algumas práticas agrícolas associadas à sustentabilidade dos sistemas agrícolas, como o plantio direto, favorecem a população do rizóbio, aumentando a contribuição da FBN (HUNGRIA et al., 1999). Torna-se necessária a conscientização dos pequenos produtores para a utilização dessa tecnologia de baixo custo e altamente eficiente na disponibilidade de N para as plantas.

Referências

- AGRIANUAL: ANUÁRIO DA AGRICULTURA BRASILEIRA. São Paulo: FNP Consultoria, p. 499, 2000.
- APPLEBY, C. A. Leghemoglobin and Rhizobium respiration. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 35, p. 443-478, June 1984.
- ARAÚJO, A. S. F. de. **A compostagem do lodo têxtil e seu efeito sobre indicadores biológicos**. 2004. 89 f. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ARAÚJO, A. S. F. de; ARAÚJO, R. S. Sobrevivência e nodulação do *Rhizobium tropici* em sementes tratadas com fungicidas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 973-976, 2006.
- ARAÚJO, A. S. F.; BURITY, H. A.; LYRA, M. C. C. P. Influência de diferentes níveis de fósforo na associação *Rhizobium* – fungo micorrizico arbuscular em algaroba (*Prosopis juliflora*). **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2001b.

ARAÚJO, A. S. F. de; BURITY, H. A.; LYRA, M. C. C. P. Influência de diferentes níveis de nitrogênio e fósforo em leucena inoculada com *Rhizobium* e fungo micorrízico arbuscular. **Ecosistema**, Espírito Santo do Pinhal, v. 26, n. 1, p. 35-40, 2001a.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Efeito do lodo textil compostado sobre a fixação do nitrogênio em soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 26.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 10.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 8.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO- FERTIBIO 2004, 5., 2004, Lages, SC. **Anais...** Lages: SBCS, 2004. 1 CD-ROM.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R; CARVALHO, E. M. S. Effect of textile sludge composted on growth, nodulation and nitrogen fixation of soybean and cowpea. **Bioresource Technology**, Essex, v. 98, n. 5, p. 1028-1032, 2007.

ARAUJO, R.S. Fixação biológica do nitrogênio em feijão. In: ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Microorganismos de importância agrícola**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. p.91-120. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 44).

ARAUJO, R. S.; PEREIRA, P. A. A. **Fixação biológica de nitrogênio nas culturas de feijão e caupi**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1983. 32 p.

CAMPO, R. J.; HUNGRIA, M. **Compatibilidade de uso de inoculantes e fungicidas no tratamento de sementes de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. 32p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 26).

DOBEREINER, J.; ARRUDA, N. B. Interrelações entre variedades e nutrição na nodulação e simbiose da soja (*Glycine Max* L). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 2, p. 475-487, 1967.

FAO. **Inoculantes para leguminosas y su uso**. Roma, 1985. 61 p.

FRANCO, A. A.; NEVES, M. C. P. Fatores limitantes à fixação biológica de nitrogênio. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 257-282.

FREIRE, J. R. Fixação do nitrogênio pela simbiose rizóbio/leguminosas. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 257-282.

FREIRE, J. R. J. Research into the rhizobium/leguminosae symbiosis in Latin América. **Plant and Soil**, The Hauge, v. 67, n. 1/3, p. 227-239, 1982.

GONNET, S.; DIAZ, P. Glutamine synthetase and glutamate synthase activities in relation to nitrogen fixation in *Lotus* spp. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 12, n. 3, p. 195-202, dez. 2000.

GRANGEIRO, T. B.; CASTELLÓN, R. E. R.; ARAÚJO, F. M. M. C. de; SILVA, S. M. de S. e; FREIRE, É. de A.; CAJAZEIRAS, J. B.; ANDRADE NETO, M.; GRANGEIRO, M. B.; CAVADA, B. S. Composição bioquímica da semente. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. de A.; RIBEIRO, V. Q. (Ed.). **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2005. p. 337-365

HUNGRIA, M. Sinais moleculares envolvidos na nodulação das leguminosas por rizóbio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 339-364, 1994.

HUNGRIA, M.; ANDRADE, D. S.; COLOZZI-FILHO, A.; BALOTA, E. L. Interação entre microorganismos do solo, feijoeiro e milho em monocultura ou consórcio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 32, n. 8, p. 807-818, 1997.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J. Fixação biológica do nitrogênio em sistemas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBCS: Embrapa Solos-UEP Recife: UFRPE, 2005. 1 CD-ROM.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. de C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 48 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 35; Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 13).

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T.; ANDRADE, D. S.; CAMPO, R. J.; CHUEIRE, L. M. O.; FERREIRA, M. C.; MENDES, I. C. Fixação biológica do nitrogênio em leguminosas de grãos. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: SBCS; Lavras: UFLA, 1999. p. 597-620.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T.; SUHET, A. R.; PERES, J. R. R. Fixação biológica do nitrogênio em soja. In: ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Microorganismos de importância agrícola**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. p. 9-90. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 44).

- KLIEWER, P.; EVANS, D. Cobamide coenzyme contents of soybean nodules and nitrogen fixing bacteria in relation to physiological conditions. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 38, n. 1, p. 99-104, 1963.
- MARTINS, L. M. V.; XAVIER, G. R.; RANGEL, F. W.; RIBEIRO, J. R. A.; NEVES, M. C. P.; MORGADO, L. B.; RUMJANEK, N. G. Contribution of biological nitrogen fixation to cowpea: a strategy for improving grain yield in the semi-arid region of Brazil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 38, n. 6, p. 333-339, Oct. 2003.
- MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Resposta da soja à adubação nitrogenada na semeadura e inoculação com *Bradyrhizobium* em sistema de plantio direto e convencional em um latossolo da região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 81-87, 2003.
- MENDES, I. C.; SUHET, A. R.; PERES, J. R. R.; VARGAS, M. A. T. Eficiência fixadora de estirpes de rizóbio em duas cultivares de feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 1-5, 1994.
- MINCHIN, F. R.; SUMMERFIELD, R. J.; NEVES, M. C. P. Nitrogen nutrition of cowpeas (*Vigna unguiculata*): effects of timing of inorganic nitrogen applications on nodulation, plant growth and seed yield. **Tropical Agriculture**, London, v. 58, n. 1, p. 1-11, Jan. 1981.
- PAULINO, V. T.; PICCINI, D. F.; BAREA, J. M. Influencia de fungos micorrízicos vesiculo-arbusculares e fosfato em leguminosas forrageiras tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 2, p. 103-108, 1986.
- RODRIGUES, J. L. M.; MELLOTO, M.; OLIVEIRA, J. T. A.; SILVEIRA, J. A. G. Efficiency of soybean nodules in relation to nodulin activities and hydrogenase expression. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 10, n. 3, p. 173-178, 1998.
- RUMJANEK, N. G.; MARTINS, L. M. V.; XAVIER, G. R.; NEVES, M. C. P. Fixação biológica de nitrogênio. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. de A.; RIBEIRO, V. Q. (Ed.). **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2005. p. 349-420.
- SILVA JÚNIOR, A. F. M.; SILVA, L. E. S. F.; ARAÚJO, A. S. F.; LYRA, M. C. C. P.; BURITY, H. A. Seleção de estirpes de *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* tolerantes a altas temperaturas. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 1996, Recife. **Anais. .. Recife: UFRPE, 1996. p. 81.**

SILVEIRA, J. A. G.; CONTADO, J. L.; RODRIGUES, J. L. M.; OLIVEIRA, J. T. A. Nodulin activities in relation to nodule development and nitrogen fixation in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Physiology Molecular Biology of Plants**, Netherlands, v. 5, n. 1, p. 45-52, 1999.

SILVEIRA, J. A. G.; CONTADO, J. L.; RODRIGUES, J. L. M.; OLIVEIRA, J. T. A. Phosphoenolpyruvate carboxylase and glutamine synthetase activities in relation to nitrogen fixation in cowpea nodules. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 10, n. 1, p. 19-23, 1998.

SILVEIRA, J. A. G.; COSTA, R. C. L.; OLIVEIRA, J. T. A. Drought-induced effects and recovery of nitrate assimilation and nodule activity in cowpea plants inoculated with *Bradyrhizobium* spp. Under moderate nitrate level. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 187-194, 2001.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotecnologia do solo: fundamentos e perspectivas**. Brasília, DF: MEC: ABEAS; Lavras: ESAL: FAEPE, 1988. 235 p.

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; GRISI, B. M.; HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Goiânia: EMBRAPA-CNPAF; Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1994. 142 p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 45).

STANFORD, N. P.; VASCONCELOS, I.; ALMEIDA, R. T. Fixação biológica de nitrogênio em caupi na região nordeste brasileira. In: ARAÚJO, J. P. P. de; WATT, E. E. (Org.). **O caupi no Brasil**. Brasília, DF: IITA: EMBRAPA, 1988. p.477-504.

TEIXEIRA, K. R. G.; GONÇALVES FILHO, L. A. R.; CARVALHO, E. M. S.; ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B. efeito do lodo de curtume sobre a nodulação e produção de matéria seca em caupi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBCS: Embrapa Solos-UEP Recife: UFRPE, 2005. 1 CD-ROM.

TU, C. M. Effect of fungicidal seed treatments on alfalfa growth and nodulation by *Rhizobium meliloti*. **Chemosphere**, Oxford, v. 10, n. 2, p. 127-134, 1981.

VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1997. p. 297-359.

VARGAS, M. A. T.; MENDES, I. C.; CARVALHO, A. M.; LOBO-BURLE, M.; HUNGRIA, M. Inoculação de leguminosas e manejo de adubos verdes. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 97-128.

VARGAS, M. A. T.; MENDES, I. de C.; SUHET, A. R.; PERES, J. R. R. **Dois novos estirpes de rizóbio para a inoculação da soja**. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1992. 3 p. (EMBRAPA-CPAC. Comunicado Técnico, 62).

VARGAS, M. A. T.; PERES, J. R. R.; SUHET, A. R. Adubação nitrogenada, inoculação e épocas de calagem para a soja em um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, n. 8, p. 1127-1132, 1982.

VARGAS, M. A. T.; SUHET, A. R. Efeito de tipos e níveis de inoculantes na soja cultivada em um solo de cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 15, n. 3, p. 343-347, 1980.

VASCONCELOS, I.; ALVES, J. F.; LIMA, I. T. Nodulação do feijão de corda *Vigna sinensis* (L.) Savi, ao longo do ciclo cultural da planta. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 6, n. 1, p. 11-15, 1976.

VEIRA, R. F. Sewage sludge effects on soybean growth and nitrogen fixation. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, v. 34, n. 3, p. 196-200, Sep. 2001.

XAVIER, T. F.; ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B.; CAMPOS, F. L. Adubação nitrogenada sobre a nodulação do Feijão-caupi. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 6., 2006, Teresina. **Tecnologias para o agronegócio: anais**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2006. 1 CD-ROM. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 121).

XAVIER, T. F.; ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B.; CAMPOS, F. L. Ontogenia da nodulação em dois cultivares de feijão-caupi. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 561-564, mar./abr. 2007.

WEISER, G. S.; SKIPPER, H. D.; WOLLUM, A. G. Exclusion of inefficient *Bradyrhizobium japonicum* serogroups by soybean genotypes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 121, n. 1, p. 99-105, Jan. 1990.

WILSON, P. W. **Biochemistry of symbiotic nitrogen fixation**. Madison: University of Wisconsin, 1940. 302 p.

Capítulo VI

Manejo sustentável do solo em agroecossistemas de base ecológica na região Meio-Norte do Brasil

*Francisco da Chagas Oliveira
Luiz Fernando Carvalho Leite
José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior*

Introdução

A Região Meio-Norte do Brasil, compreendida pelos Estados do Piauí e Maranhão, é possuidora de grande diversidade de recursos naturais, fato atribuído à sua localização geográfica na confluência entre a Caatinga, a Floresta Amazônica e os Cerrados (NASCIMENTO; RENVOIZE, 2001).

Os principais tipos vegetacionais são as **florestas**, que, de acordo com os diferentes níveis de umidade, tipo de solo e relevo, dividem-se nos subtipos caducifólia, subcaducifólia e dicótilo-palmácea, que são comuns nos dois Estados, e subperenifólia (tropical), subperenifólia (equatorial) e florestas de várzeas, que ocorrem somente no Maranhão; **cerrados**, que dominam as chapadas, ocorrendo no Maranhão, em uma mancha na Região Nordeste, e na grande área que se estende da fronteira com o Tocantins até o limite com o Piauí, onde neste dominam toda a região sul e avançam em direção ao norte; **caatinga**, onde as mais extensas e mais características áreas ocorrem na região sudeste do Piauí, nos limites com a Bahia, Pernambuco e Ceará, região de menor precipitação do Estado, de onde, avançam para o norte, acompanhando a porção oriental do Estado e até mesmo estendendo-se ao centro e noroeste, apresentando áreas de transição com outros tipos de vegetação, transições que ocorrem inclusive, no Maranhão, porém em pequena escala.

Em ambos os Estados, nas áreas de transição com outros tipos de vegetação, ocorrem as formações floresta/cerrado, cerrado/floresta, cerrado/caatinga e caatinga/cerrado.

Tanto no Piauí como no Maranhão, a classe de solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo, que constitui cerca de 45% e 35% da área total de cada Estado respectivamente (REATTO et al., 1997). Outras classes de solo comumente encontradas são, na ordem de ocorrência: Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolos Litólicos, Argissolo Vermelho-Escuro e Neossolos Quartzarênicos no Maranhão; no Piauí, Neossolos Litólicos, Argissolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho-Escuro, Neossolos Litólicos e Plintossolo.

Com exceção dos Neossolos Litólicos, que ocorrem em áreas de relevo suave-ondulado até montanhoso, os demais se verificam em áreas planas a suavemente onduladas. Todos são caracterizados pela baixa fertilidade natural, altos teores de alumínio e elevada acidez.

Nesta região, concentra-se um grande número de famílias que vivem do extrativismo, da agropecuária e que cultivam a terra utilizando os métodos tradicionais de cultivo e de subsistência, intensificando a pressão sobre os recursos naturais, em conseqüência de novas demandas e do aumento da população.

No caso da exploração pecuária, o superpastoreio tem modificado a composição florística do estrato herbáceo, quer pela época quer pela pressão de pastejo. A exploração agrícola, com práticas de agricultura itinerante, as quais constam do desmatamento e da queimada desordenados, tem modificado tanto o estrato herbáceo como o arbustivo-arbóreo. E, por último, a exploração madeireira que já tem causado mais danos à vegetação lenhosa da caatinga do que à própria agricultura migratória.

Agricultura familiar e uso do solo na Região Meio-Norte

O tipo de agricultura praticada pelo pequeno produtor na Região Meio-Norte, denominada itinerante ou migratória, ou de corte e queima, é caracterizada pela desmata, queima e plantio por um período de dois anos e subsequente pousio para recuperação da sua capacidade produtiva (Fig. 1).



Fig. 1. Preparo de área com uso do fogo na região Meio-Norte. Jatobá do Piauí, 2006.

As conseqüências desse modelo se fazem sentir, principalmente, nos recursos naturais, como perdas irrecuperáveis da biodiversidade, aceleração dos processos de erosão e declínio da fertilidade do solo, onde a desertificação já se faz presente em aproximadamente 15% da região, e da qualidade da água pela sedimentação, que traz como conseqüência última o assoreamento de rios e açudes (ARAÚJO FILHO; CARVALHO, 1997).

Atualmente, o aumento da demanda por alimentos e a diminuição do tamanho das propriedades, fatos que vêm exigindo menor período de repouso das áreas de plantio, resultam no uso mais intensivo da terra, tornando-se insuficiente o tempo de recomposição natural da fertilidade do solo, que ocorre entre seis e dez anos de pousio.

Portanto, as práticas em uso não têm sustentabilidade ecológica e seus impactos e conseqüências sócio-econômicos se fazem sentir pela aceleração da migração e degradação dos ecossistemas, fazendo-se necessário o desenvolvimento de

sistemas de produção sustentáveis como alternativas para o uso do solo, que propiciem a sustação da degradação ambiental e a recuperação da produtividade em níveis economicamente rentáveis e ecologicamente sustentáveis.

Sistemas de produção sustentáveis para a agricultura familiar

Consórcios em sistemas de produção

Em unidades de produção familiar, a utilização de consórcios envolvendo culturas anuais, como feijão, arroz, mandioca e milho, e culturas perenes tem crescido nos últimos anos. Esses sistemas de consórcios são empregados empiricamente há muito tempo, de modo a melhorar a eficiência das culturas, bem como otimizar o uso da área.

Um dos principais fatores para a expansão do consórcio nos sistemas de produção de culturas anuais, e culturas anuais com perenes, é a tentativa de se evitarem os riscos agrícolas, principalmente o fogo e uma seca prolongada, promovendo o uso do solo de modo mais eficiente e melhorando a viabilidade econômica com uma grande variação de produtos.

Diversos são os tipos de consórcio que podem ser integrados nos sistemas de produção, entre os quais: 1) cultivo misto – plantio simultâneo de duas ou mais culturas anuais na mesma área, sem organizá-las em fileiras distintas; 2) cultivo intercalar – plantio simultâneo de duas ou mais culturas na mesma áreas com uma ou mais culturas plantada em fileiras, podendo a cultura plantada em fileiras ser uma perene (Fig. 2); 3) cultivo de substituição – plantio de duas ou mais culturas anuais na mesma área, em faixas diferentes, de modo que uma seja plantada depois que a cultura anterior tiver alcançado a fase reprodutiva, sem o ponto de colheita; 4) cultivo em faixas – plantio simultâneo de duas ou mais culturas na mesma área, em faixas diferentes, suficientemente amplas para permitir o manejo independente de cada cultura.



Fig. 2. Consórcio intercalar entre a cultura do milho e do feijão-guandu. Comunidade Morrinhos, Santa Rosa do Piauí-PI, 2006.

A implantação de sistemas de consórcio deve-se basear em estudos regionais e características peculiares dos pequenos produtores, procurando melhorar alguns aspectos que possam aumentar a rentabilidade dos sistemas.

Em estudos realizados com a finalidade de avaliar o comportamento produtivo de leguminosas para adubação verde no cultivo de milho nos Municípios de Monsenhor Gil e Palmerais, no Médio Parnaíba Piauiense, foram conduzidos dois ensaios por Melo et al. (1997), em Latossolo Amarelo de baixa fertilidade, sem adubação química. Utilizaram-se quatro leguminosas: mucuna preta (*Stizolobium aterrimum*), crotalária (*Crotalaria spectabilis*), feijão-bravo (*Canavalia obtusifolia*) e feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), como cobertura verde, em sistema exclusivo e intercalado ao milho.

No sistema intercalado, o milho foi semeado no início da estação chuvosa, com espaçamento entre fileiras de 1,0 m e entre covas de 0,50 m, com uma planta por cova após desbaste.

As leguminosas foram semeadas 30 dias depois do milho, com fileiras espaçadas de 0,50 m das fileiras do milho, com 50 sementes por metro linear para crotalária e duas sementes por cova (espaçadas de 0,50 m) para as demais leguminosas. No sistema exclusivo, as leguminosas foram semeadas no mesmo dia do milho, com os mesmos espaçamentos do sistema intercalado.

Os resultados, nos dois municípios, mostraram que não houve diferenças na produtividade de grãos de milho no sistema isolado e intercalado, revelando que a cobertura verde não prejudicou seu desenvolvimento.

Em regiões onde as adversidades de clima são fatores limitantes para o desenvolvimento de culturas anuais em determinado período, o uso de sistemas de consórcio envolvendo culturas anuais e perenes torna-se uma ferramenta importante para o manejo do solo, visto que as condições prejudiciais a uma cultura podem ser benéficas à outra.

O perigo do fogo é eminente quando se desenvolve o monocultivo em áreas potencialmente de risco, em decorrência da grande formação de material vegetal pela cultura, bem como do seu manejo inicial para sua implantação. O uso repetido do fogo anualmente, como prática natural do homem do campo, leva a vários problemas, como destruição da microbiota do solo, aumento da compactação, volatilização de nutrientes essenciais, destruição de inimigos naturais e outros, sendo mínimo o seu benefício, quando se relaciona à fertilidade do solo e ao desenvolvimento da cultura. Quando se consorciavam culturas anuais com culturas perenes, uma barreira física contra o fogo é criada, visto que, durante o ciclo de vida da cultura perene, não se requer o manejo com fogo para limpeza da área e melhoria na nutrição das plantas.

Apesar de se trabalhar no sistema de consorciação com culturas de características fisiológicas e morfológicas diferentes, técnicas podem ser empregadas durante o ciclo das culturas que estão inseridas nos sistemas de consorciação, tais como, o plantio

direto, a rotação de culturas, principalmente leguminosas com incorporação ao final do seu ciclo, o manejo adequado de plantas daninhas por meio de cobertura vegetal densa e cobertura morta, melhoria na retenção da umidade do solo, bem como o aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas do sistema econômico.

Atualmente os consórcios são praticados obedecendo a critérios que seguem desde a orientação técnica do produtor, mercado, distância do centro consumidor, culturas econômicas (principais) e secundárias, épocas de plantio e, principalmente, disponibilidade de mão-de-obra na região. Por ser um sistema de manejo adotado na agricultura há muito tempo, encontra-se solidificado e atendendo a objetivos específicos, que têm acrescentado muito ao desenvolvimento do agricultor familiar.

Sistemas de produção vegetal e animal integrados

A Embrapa Meio-Norte vem desenvolvendo trabalhos de pesquisa-ação junto a comunidades rurais, visando à construção de alternativas tecnológicas adequadas às condições sócio-econômicas dos agricultores familiares da Região Meio-Norte de forma participativa com os agricultores. Com esse enfoque, os sistemas de produção vegetal e animal existentes são baseados nas atividades desenvolvidas na própria comunidade, visando ao seu fortalecimento para a produção de alimento de melhor qualidade, garantindo a segurança alimentar das famílias, e de produtos voltados ao mercado para atender a outras necessidades, cujas premissas para sua viabilização são baseadas em princípios agroecológicos, objetivando a manutenção da capacidade produtiva dos solos, como o aproveitamento dos recursos endógenos, por meio da integração dos sistemas de produção, com interação entre plantas e animais, práticas do uso de adubação verde, fixação biológica do nitrogênio, reciclagem de nutrientes, rotação e consorciamento de culturas e o uso de plantas mais eficientes.

Na Comunidade Boi Manso, no Município de Regeneração, na Microrregião do Médio Parnaíba Piauiense, considerada referência para o desenvolvimento da região a partir de trabalhos desenvolvidos pela Embrapa Meio-Norte, encontram-se agroecossistemas manejados ecologicamente, onde se destaca a prática da adubação verde, que é obtida por meio da rotação de culturas com leguminosas. Tal prática favorece a reciclagem de nutrientes do solo, além de permitir a fixação biológica do nitrogênio atmosférico. Nessa Comunidade, está sendo utilizado o feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Mills.) (Fig. 3), o qual apresenta boa tolerância a deficit hídrico, além de ter elevada capacidade de produzir biomassa rica em nitrogênio (Fig. 4), resultando em melhoria das condições químicas, biológicas e sobretudo físicas do solo.



Fig. 3. Rotação de culturas com feijão-guandu. Comunidade Boi Manso, Regeneração- PI, 2005.

Além da rotação de culturas com leguminosas, os sistemas de produção propostos desenvolvidos de forma integrada com a criação de animais permitem que os dejetos destes últimos, devidamente compostados, sejam utilizados na adubação do solo destinado ao cultivo vegetal, aumentando a eficiência da interação entre animais e plantas e melhorando as condições de fertilidade do solo.



Fig. 4. Cobertura do solo produzida pelo feijão-guandu. Comunidade Boi Manso, Regeneração-PI, 2002.

Avaliação do manejo da fertilidade

Apesar da importância dos sistemas com base agroecológica, são escassos ainda, na Região Meio-Norte, trabalhos de pesquisa que visem quantificar os efeitos desses sistemas sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. No Município de Regeneração-PI, Araújo et al. (2005) avaliaram as propriedades químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistemas de manejo alternativos, com rotação e sucessão de culturas, e convencional, com corte e queima.

Os sistemas estudados foram: 1) floresta nativa de cerrado; 2) área desmatada e queimada (sistema convencional) com três anos de cultivo; 3) área de mandioca + arroz com um ano de cultivo; 4) área de mandioca + arroz /pousio/ + mandioca + arroz + feijão-guandu com três anos de cultivo; 5) área de mandioca + arroz + feijão-guandu com cinco anos de cultivo. Os teores de P disponíveis na camada de 0-5 cm foram maiores ($p < 0,05$) na floresta nativa de cerrados (FN) ($26,83 \text{ mg dm}^{-3}$), quando comparados com os demais sistemas (Tabela 1), o que está associado aos processos de reciclagem e mineralização de compostos orgânicos especialmente ocorrentes em camadas superficiais.

Na profundidade de 0-5 cm, os teores de cálcio trocável foram maiores ($p < 0,05$) no sistema convencional ($3,28 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), quando comparados com os sistemas Mandioca+Arroz ($1,46 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Mandioca+Arroz+Feijão-Guandu ($1,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Isso pode ter sido decorrente do processo de queima da biomassa e a conseqüente disponibilização de nutrientes contidos nas cinzas.

Os estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) não sofreram alterações significativas nos sistemas de manejo estudados em relação à floresta nativa de cerrados, exceto aqueles obtidos na camada de 0-5 cm, em que o sistema do terceiro ano diferiu dos demais, apresentando valores abaixo dos obtidos pelos demais sistemas. Essa diferença pode estar relacionada ao fato de que essa área passou um ano em pousio, sem que houvesse aporte de material orgânico ao solo.

Tabela 1. Características químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em diferentes sistemas de manejo e floresta nativa de cerrados. (Araújo et al., 2005)⁽¹⁾

Sistema ⁽²⁾	pH -----H ₂ O-----	P -----mg dm ³ -----	K	Ca ⁺²	Mg ⁺² -----c mol _c dm ⁻³ -----	Al ⁺³	H + Al	COT	NT
FN	4,9ab	26,83a	0,11a	1,50ab	0,97ab	0,74a	6,44a	20,79a	1,79a
SC	5,60a	12,20b	0,11a	3,28a	1,89a	0,35a	4,68ab	20,27a	1,74a
M + A	5,04ab	11,59b	0,26a	1,46b	0,71b	0,60a	4,22b	19,50a	1,68a
M + A/P/FG	4,81ab	8,52b	0,16a	1,57ab	1,01ab	0,54a	3,99b	15,54b	1,33b
M + A + FG	4,8b	10,33b	0,25a	1,15b	1,16ab	0,70a	4,71ab	20,07a	1,73a
				5-10 cm					
FN	4,79a	8,82a	0,05a	0,80ab	0,64a	1,12a	3,78a	20,91a	1,64a
SC	5,01a	5,97ab	0,08a	1,51a	0,69a	0,55b	4,13a	19,06a	1,57a
M + A	4,78a	5,95ab	0,03a	1,06ab	0,61a	0,61b	4,24a	18,28a	1,38a
M + A/P/FG	4,40a	6,49ab	0,06a	0,74ab	0,52a	0,86ab	4,64a	16,04a	1,42a
M + A + FG	4,49a	4,43b	0,02a	0,25b	0,44a	0,86ab	4,95a	16,51a	1,80a
				10-20 cm					
FN	4,78a	4,97a	0,03a	0,40a	0,54a	0,75a	4,58a	13,94a	1,14a
SC	4,70a	2,84b	0,06a	0,82a	0,31ab	0,70a	4,26a	13,25a	1,36a
M + A	4,48a	1,66b	0,04a	0,30a	0,26ab	0,80a	4,23a	15,86a	1,06a
M + A/P/FG	4,31a	4,35a	0,04a	0,42a	0,38a	0,83a	4,45a	12,29a	1,27a
M + A + FG	4,35a	2,03b	0,02a	0,28a	0,04b	0,73a	4,07a	14,78a	1,20a
				20-40 cm					
FN	4,44a	1,94b	0,02a	0,20b	0,56a	0,68a	3,82a	12,45a	0,85a
SC	4,58a	3,08a	0,05a	0,44a	0,31a	0,73a	3,87a	9,86a	1,16a
M + A	4,32 a	0,36c	0,02a	0,21b	0,25a	0,67a	3,13a	13,44a	1,00a
M + A/P/FG	4,32a	1,79b	0,02a	0,14b	0,19a	0,60a	3,95a	11,74a	0,80a
M + A + FG	4,48a	1,21b	0,02a	0,28b	0,22a	0,61a	4,09a	9,15a	1,07a

⁽¹⁾Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey. FN: floresta nativa; ⁽²⁾SC: sistema convencional; M + A: Mandioca + Arroz; M + A/P/FG: Mandioca + Arroz/Pousio/Feijão-Guandu; M + A + G: Mandioca + Arroz + Feijão-Guandu.

Os sistemas de manejos alternativos não promoveram aumento significativo dos teores de nutrientes e dos estoques de COT e NT em relação à floresta nativa de cerrados, havendo, portanto, a necessidade de se utilizarem na adubação verde espécies que aportem maior quantidade de resíduos ao solo. Além disso, verificou-se que o sistema convencional, com corte e queima, apresentou maiores valores de nutrientes, quando comparados com os sistemas de cultivos estudados, em razão da mineralização da matéria orgânica catalizada pelo fogo. No entanto, em médio e longo prazos, a tendência é de que se diminua a qualidade do solo.

No sistema de manejo proposto, com o uso da rotação de culturas e adubação verde, destaca-se como prática muito importante a eliminação do processo de queima da biomassa após o período de pousio. Nesse caso, evita-se fazer a derruba e a queima da vegetação da capoeira que se formaria na área e utiliza-se o corte ou ainda a trituração da biomassa da leguminosa, a qual é deixada para se decompor no solo. Esse processo expõe muito menos o solo à erosão e evita as perdas de vários nutrientes durante a queima da biomassa, principalmente o nitrogênio e o enxofre.

Em relação à necessidade de maior aporte de carbono, a mistura de espécies, além de melhorar as características físicas do solo (agregação, estruturação), produz resíduos com relação C/N intermediária, favorecendo a mineralização paulatina do nitrogênio e promovendo, ao longo dos anos, um maior equilíbrio e acúmulo de carbono no perfil do solo (CALEGARI et al., 1998).

Sistemas Agroflorestais (SAF)

Sistemas agroflorestais são formas de uso e manejo dos recursos naturais em que espécies lenhosas (árvores, arbustos, palmeiras) são utilizadas em consórcio com cultivos agrícolas e/ou com animais, em uma mesma área, de forma simultânea ou em uma seqüência temporal (MONTAGNINI, 1992).

Os sistemas agroflorestais podem ser compreendidos, do ponto de vista agrônomo, como sistemas de consórcio entre dois ou mais componentes, em que pelo menos um deles seja uma planta lenhosa e perene. O componente arbóreo pode desempenhar tanto funções de produção (madeira, fruto, resina, látex, etc.) como de serviço (proteção, sombreamento, adubação) ou mesmo ambas as funções simultaneamente (OLIVEIRA et al., 2005).

Outro critério para identificar um sistema agroflorestal é que pelo menos um dos componentes seja manejado para produção agrícola, inclusive pastagens. Finalmente, para considerar um sistema de produção como agroflorestal, devem necessariamente ocorrer interações ecológicas e econômicas positivas entre os diversos componentes; um sistema agroflorestal geralmente tem dois ou mais produtos; o ciclo completo de um sistema agroflorestal é sempre maior que um ano; mesmo o mais simples dos sistemas agroflorestais é mais complexo economicamente e ecologicamente que um sistema de monocultura.

Os sistemas agroflorestais são classificados de diferentes maneiras, segundo sua estrutura no espaço, seu desenho ao longo do tempo, sua importância relativa e a função dos diferentes componentes, assim como os objetivos da produção e suas características sociais e econômicas. Oliveira et al. (2005) classificam, de forma geral, segundo a natureza dos componentes e os tipos de combinações entre eles, em:

- Sistemas silviagrícolas ou agrossilviculturais: caracterizados pelo consórcio de espécies arbóreas com cultivos agrícolas e/ou perenes.
- Sistemas silvipastoris: preconizam a inserção de espécies arbóreas na atividade pecuária ou a criação de animais em povoamentos florestais. De forma bem-simplificada, é o consórcio de espécies arbóreas e pastagens.
- Sistemas agrossilvipastoris: caracterizados pelo consórcio do componente arbóreo com cultivos agrícolas e animais.

Manejo da fertilidade do solo

Os sistemas agroflorestais devem ser manejados, para que o próprio sistema produza ou mantenha boa parte dos recursos dos quais a produção depende, já que sua implantação visa atingir um maior grau de sustentabilidade em relação aos sistemas de produção convencionais (agrícolas, pecuários e florestais). Em parte, esse elevado grau de auto-sustentabilidade deriva de três características principais associadas aos sistemas agroflorestais: maior aporte de matéria orgânica ao solo, maior grau de diversidade biológica e intensificação dos processos naturais de ciclagem biogeoquímica.

Além disso, apresenta vantagens, tais como: utilização mais eficiente do espaço, redução efetiva da erosão, sustentabilidade da produção e estímulo à economia de produção, com base participativa (MEDRADO, 2000).

Experiências com SAFs vêm sendo desenvolvidas no norte do Estado do Piauí, no Município de Esperantina, em área de Cerrados (Fig. 5). Em virtude de toda a complexidade, da gama de situações e interações possíveis, será feita uma abordagem direcionada para o recurso solo em sistemas agroflorestais, com ênfase especial no manejo da fertilidade.



Fig. 5. Sistema agroflorestal com nove anos de idade. Comunidade Vereda dos Anacleto, Município de Esperantina-PI, 2006.

Com o objetivo de avaliar a qualidade do solo, realizou-se um trabalho buscando quantificar as alterações dos teores de nutrientes e dos estoques de carbono e nitrogênio em sistemas agroflorestais de diferentes idades, comparados com o sistema tradicional de agricultura de corte e queima (ACQ), tendo como referência de um estado de equilíbrio uma área de floresta nativa de cerrados (FN) (SOUSA et al., 2006)

Esse estudo teve por referência o trabalho desenvolvido na região norte do Estado do Piauí pelo Centro de Educação Popular Esperantinense (CEPES), organização não governamental que tem como um de seus objetivos o desenvolvimento de agricultores familiares a partir do fomento de tecnologias agroecológicas.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. Foram estudados, além da floresta nativa de cerrados, dois sistemas de manejo: agricultura de corte e queima com três anos de adoção e pousio de dois a três anos, e sistema agroflorestal com nove anos de adoção, constituído pelas culturas do milho, banana

e abobrinha associadas com espécies florestais nativas da região como palmeira, mandacaru, jatobá, gonçalo alves e ipê, além de espécies frutíferas como goiaba, banana e pinha.

Com exceção da camada de 0 - 5 cm, os valores do pH foram maiores nos solos em SAF e FN do que naqueles em ACQ; os teores de Al trocável foram maiores no solo em ACQ, nas camadas de 5 - 10 cm ($0,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e 10 - 20 cm ($1,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 2). Isso pode ser atribuído aos maiores estoques de carbono presentes nos solos em FN e SAF (Tabela 3), complexando com maior eficiência o Al, diminuindo, portanto, sua atividade na solução do solo.

Tabela 2. Características químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo em floresta nativa, agricultura de corte e queima e sistema agroflorestal com nove anos de adoção, em áreas dos Cerrados do norte do Piauí⁽¹⁾.

Sistema ⁽²⁾	Característica química				
	pH H ₂ O	Al ⁺³	Ca ⁺² cmol _c dm ⁻³	Mg ⁺²	K ⁺
			0 - 5 cm		
FN	6,01b	0,00a	6,78a	1,27b	0,30b
ACQ	7,22a	0,00a	7,91a	1,76	0,23b
SAF	6,04b	0,00a	5,25b	1,09b	0,68a
			5 - 10 cm		
FN	6,15a	0,00b	3,80a	0,43a	0,16a
ACQ	5,45b	0,40a	1,64b	0,26a	0,22a
SAF	5,93a	0,00b	4,26a	0,78a	0,33a
			10 - 20 cm		
FN	5,76a	0,10b	3,23a	0,37a	0,10a
ACQ	4,93b	1,10a	0,84b	0,10a	0,11a
SAF	5,74a	0,10b	2,89a	0,50a	0,16a

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, nas colunas, dentro de cada camada de solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾FN: floresta nativa; ACQ: agricultura de corte e queima; SAF: sistema agroflorestal.

Na camada de 0 - 5 cm, o teor de Ca foi maior nos sistemas FN e ACQ (Tabela 2). De outro lado, nas camadas 5 - 10 cm e 10 - 20 cm, os maiores teores foram observados nos sistemas FN e SAF. Os maiores valores desse elemento na camada superficial no sistema ACQ podem ser decorrentes das cinzas presentes, as quais podem atuar como corretivo, conforme estabelecido por Vieira, Ferreira e Homma (2006).

O Mg apresentou teores maiores no sistema ACQ ($1,76 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), na profundidade de 0 - 5 cm, não diferindo significativamente dos tratamentos FN e SAF nas demais profundidades (Tabela 2). Quanto aos teores de K, o SAF apresentou valores superiores aos demais tratamentos em todas as profundidades, sendo significativo apenas na profundidade de 0 - 5 cm (Tabela 2).

Na camada 0 - 5 cm, os teores de P disponíveis foram maiores no solo em ACQ do que naquele em FN e SAF (Tabela 3). Entretanto, na camada 10 - 20 cm, o SAF apresentou teores maiores ($5,95 \text{ mg dm}^{-3}$) do que os demais sistemas. Os teores superiores apresentados pelo sistema ACQ na profundidade de 0 - 5 cm em relação aos demais ocorreram em consequência da utilização da capoeira que estava em pousio e que tem como principal objetivo o acúmulo de biomassa e nutrientes, além da fertilização natural do solo após o corte e a queima da sua biomassa vegetal. O tratamento FN apresentou maiores valores em relação ao estoque de COT ($12,45 \text{ Mg ha}^{-1}$) e NT ($1,12 \text{ Mg ha}^{-1}$) apenas na camada de 0 - 5 cm. Isso ocorreu provavelmente em razão do acúmulo de material vegetal, como folhas, ramos e raízes em decomposição, existente nas florestas e mais significativo do que nas áreas cultivadas (Tabela 3). Já nas outras camadas, esse tratamento só diferiu significativamente nos estoques de COT, na profundidade de 5 - 10 cm do tratamento ACQ ($4,56 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Quanto aos estoques de NT, nas camadas de 5 - 10 cm e 10 - 20 cm, os maiores valores foram observados nos tratamentos FN e SAF (Tabela 3). Maiores valores de C e N no solo em SAF, em relação à ACQ, são associados ao maior aporte de resíduos, de forma contínua, e à maior eficiência do processo de ciclagem

de nutrientes, o que tem tornado esse sistema, após nove anos de adoção, excelente alternativa para melhoria da qualidade do solo e do ambiente da região em estudo.

Tabela 3. Teores e estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), teores de fósforo disponíveis (P) e a relação C/N em Latossolo Vermelho-Amarelo em floresta nativa, agricultura de corte e queima e sistema agroflorestal com nove anos de adoção, em áreas de Cerrado no norte do Piauí⁽¹⁾.

Sistemas ⁽²⁾	Teor		P	Estoque		Relação C/N
	COT	NT		COT	NT	
	dag kg ⁻¹		mg dm ⁻³	Mg ha ⁻¹		
0 – 5 cm						
FN	2,26a	0,20a	3,13c	12,45a	1,12a	11,3
ACQ	1,1c	0,11b	32,52a	6,05c	0,61b	10
SAF	1,5b	0,17a	8,52b	8,25b	0,92b	6,8
5 – 10 cm						
FN	1,13b	0,15a	1,76b	6,21a	0,84a	7,53
ACQ	0,83c	0,07b	3,75a	4,56b	0,40b	11,86
SAF	1,41a	0,17a	4,69a	7,75a	0,95a	8,29
10 – 20 cm						
FN	0,7a	0,12a	1,56b	3,87a	0,68a	5,83
ACQ	0,7a	0,08b	1,91b	3,87a	0,44b	8,75
SAF	0,89a	0,13a	5,95a	4,88a	0,70a	6,85

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra nas colunas, dentro de cada camada de solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾FN: floresta nativa; ACQ: agricultura de corte e queima; SAF: sistema agroflorestal.

Os SAFs propiciaram aumento dos teores de nutrientes e dos estoques de carbono e nitrogênio. Esses sistemas têm melhorado, portanto, a qualidade dos solos e podem ser considerados excelentes alternativas para áreas de Cerrados do norte piauiense.

Plantio direto na palha da carnaúba

Plantio direto é a tecnologia que consiste em plantar as lavouras sem fazer o revolvimento ou preparo do solo, como tradicionalmente se faz, e com a presença de cobertura morta ou palha. A essência é ter palha ou cobertura no momento do plantio. As vantagens são inúmeras: a palha contribui para o aumento da proteção do solo contra a erosão, promove maior infiltração de água no solo, reduz a temperatura do solo, aumenta a quantidade de matéria orgânica e, conseqüentemente, melhora seus atributos físicos e biológicos, além de reduzir a ocorrência de plantas invasoras. Ela leva o produtor a proteger sua área, para que não ocorra a queimada.

Iniciativa dessa forma de produção vem sendo realizada em unidades familiares de produção, na Microrregião de Campo Maior, no Norte do Estado do Piauí, onde agricultores familiares desenvolvem trabalhos com base em princípios agroecológicos, tendo a cultura da melancia como principal produto comercial, cujo sistema de produção é apoiado em tecnologias de cobertura do solo, com a utilização de palha da palmeira carnaúba (*Copernicia prunifera*) e fertilização dos solos com esterco de animais, principalmente caprinos e ovinos, em rotação com culturas anuais de milho e feijão (Fig. 6). A utilização desse sistema permitiu uma redução brusca do uso do fogo para preparo de áreas de plantio, favorecendo uma melhor conservação do solo. Além disso, possibilita a manutenção da capacidade produtiva do solo, criando alternativas sustentáveis à agricultura itinerante e reduzindo a necessidade de se realizar a derruba anual de novas áreas de mata.



Fig. 6. Cobertura do solo no cultivo de melancia em sistema plantio direto, em roça de agricultor familiar. Município de Jatobá do Piauí-PI, 2006.

No entanto, tais tecnologias atendem às exigências dos agricultores em termo de custo de produção, porém, há necessidade do desenvolvimento de pesquisas na área científica e tecnológica, para resolver gargalos de produção, como o atendimento aos requisitos mínimos, para que a cultura da melancia se desenvolva plenamente, atingindo os objetivos de ótima produtividade, garantindo a viabilidade econômica desse sistema de produção e sua competitividade em igualdade de condições com os sistemas convencionais de produção, por meio do desenvolvimento de sistema de produção de melancia em manejo agroecológico em diferentes vias, socialmente apropriado, ecologicamente sustentável e de custo/benefício mais favorável.

Considerações finais

A sociedade brasileira vive um momento histórico marcado por um crescente processo de ecologização e de conscientização com respeito ao imperativo sócio-ambiental que deve orientar o desenvolvimento rural. Esse processo determina a necessidade de mudanças nas políticas públicas de maneira que sejam incorporados instrumentos capazes de reorientar as práticas produtivas e os estilos de agricultura hoje dominantes. O ideal da sustentabilidade requer estratégias que levem a estilos de desenvolvimento que sejam orientados à construção de processos produtivos ambientalmente sustentáveis, economicamente rentáveis, socialmente incluídos e equitativos e culturalmente aceitáveis. Tais processos devem fortalecer a segurança alimentar e nutricional da nossa população e, portanto, assegurar a produção de alimentos saudáveis, de melhor qualidade biológica e livres de qualquer contaminação.

Auxiliar na montagem de sistemas produtivos ambientalmente sustentáveis e economicamente rentáveis é um dos maiores desafios que os agricultores colocam aos especialistas em solos.

Referências

ARAÚJO, A. R.; LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SAGRILO, E.; ARAÚJO, F. S.; LOPES, A. N. C. Propriedades químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas de rotação e sucessão de culturas e floresta nativa de Cerrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBSC: Embrapa Solos-UEP Recife: UFRPE, 2005. 1 CD-ROM.

ARAÚJO FILHO, J. A. de; CARVALHO, F. C. de. **Desenvolvimento sustentado da caatinga**. Sobral: EMBRAPA-CNPC, 1997. 19 p. (EMBRAPA-CNPC. Circular Técnica, 13).

CALEGARI, A.; HECKLER, J. C.; SANTOS, H. P.; PITOL, C.; FERNADES, F. M.; HERNANI, L. C.; GAUDÊNCIO, C. A. Culturas, sucessões e rotações. In: SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. (Org.). **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998. p. 59-80. (Coleção 500 perguntas 500 respostas).

MEDRADO, M.J.S. Sistemas agroflorestais aspectos básicos e indicações. In: GALVAO, A. P. M. (Org.). **Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: um guia para ações municipais e regionais**. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Colombo: Embrapa Florestas, 2000. p. 269-312.

MELO, F. B.; CARDOSO, M. J.; ITALIANO, E. C.; RIBEIRO, V. Q. Comportamento produtivo de leguminosas para adubação verde em sistema intercalar na cultura do milho. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA AGROPECUÁRIO DO PIAUÍ, 8., 1994, Teresina. **Pesquisa e Desenvolvimento para o Meio-Norte: anais**. Teresina: EMBRAPA-CPAMN; São Luis: EMAPA, 1997. p. 51-55. (EMBRAPA-CPAMN. Documentos, 16).

MONTAGNINI, F. I. (Ed.). **Sistemas agroflorestais: princípios y aplicaciones en los trópicos**. 2. ed. San José, Costa Rica: Organización para Estudios Tropicales, 1992. 622 p.

NASCIMENTO, M. do P. S. C. B. do; RENVOIZE, S. A. **Gramíneas forrageiras naturais e cultivadas na Região Meio-Norte**. Teresina: Embrapa Meio-Norte; Kew: Royal Botanic Gardens, 2001. 196 p.

OLIVEIRA, T. K.; FURTADO, S. C.; MACEDO, L. G.; AMARAL, E. F. do; FRANKE, I. L. Manejo da fertilidade do solo em sistemas agroflorestais. In: WADT, P. G. S. (Ed.). **Manejo do solo e recomendação de adubação para o estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. p. 376-411.

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MADEIRA NETO, J. da S. Principais classes de solos com ocorrência de cerrado no Meio-Norte (Maranhão, Piauí) e sua potencialidade agrícola. In: SIMPÓSIO SOBRE OS CERRADOS DO MEIO-NORTE, 1., 1997, Teresina. **Cerrados: sua biodiversidade é uma benção da natureza - anais**. Teresina: EMBRAPA-CPAMN, 1997. p. 39-44. (EMBRAPA-CPAMN. Documentos, 27).

SOUSA, F. P.; LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. C.; DANTAS, J. S.; LIMA, S. S. Qualidade de solo em áreas sob agricultura de corte e queima e sistemas agroflorestais nos cerrados do Norte piauiense. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju. **Resumos e palestras...** Aracaju: SBCS: UFS: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. 1 CD-ROM.

VIEIRA, I. C. G.; FERREIRA, L. V.; HOMMA, A. K. O. **Programa de C & T para recuperação de áreas alteradas no arco do desmatamento da Amazônia: relatório final**. Disponível em: http://www.sbpcnet.org.br/documentos/Relatorio_final-SBPC-Amazonia.pdf. Acesso em: 22 abr. 2006.