

Fertilidade do Solo e Manejo da Acidez e da Adubação em Sistema Plantio Direto

Dr. Pedro Alexandre Varella Escosteguy, Dr. Leandro Souza da Silva,
Dr. Álvaro Vilela de Resende e Me. Sandra Mara Vieira Fontoura

1 - Evolução dos atributos químicos do solo nas fases do SPD em sistemas de produção agrícola

Nos primeiros anos após a adoção do sistema plantio direto (SPD), em relação ao sistema de preparo convencional de solo (SPC), os teores dos nutrientes e de outros atributos químicos variam de forma marcante no perfil do solo, conhecida por ser a fase de implantação do sistema. No SPD, os teores de matéria orgânica (MO) do solo aumentam gradativamente nas camadas mais superficiais (0-5 ou 0-10 cm), de forma mais intensa em regiões mais frias e áreas com maior aporte de resíduos vegetais. Esse aumento resulta, principalmente, do não revolvimento do solo, já que esse é mobilizado apenas na linha de semeadura, e da menor perda de solo por erosão. O teor de MO aumenta até atingir uma concentração de equilíbrio entre as taxas de adição e de humificação de carbono orgânico, principal elemento constituinte, representando cerca de 58% da MO do solo. Esse equilíbrio depende das características de cada ambiente e do manejo adotado pelo produtor. Durante essa fase, outras propriedades químicas, físicas e biológicas do solo vão sendo modificadas, até que atinjam um patamar de menor variação, caracterizando a fase de consolidação do SPD.

O acréscimo de MO, que pode acontecer já nos primeiros anos do SPD, ocorre associado com o aumento do pH e teores de nutrientes também nas camadas superficiais, resultado da aplicação de corretivos de acidez e fertilizantes na superfície ou na linha de semeadura e sem o revolvimento do solo. O aumento da atividade biológica e da ciclagem de nutrientes, a maior capacidade do solo em tamponar a acidez e em reter cátions em formas trocáveis (maior capacidade de troca de cátions, ou CTC), e

a menor atividade de formas tóxicas de alumínio (Al) na solução do solo, sucedem os acréscimos de MO, nutrientes e de pH observado nos primeiros anos do SPD. Por outro lado, nessa fase, temporariamente, ocorre maior imobilização de nitrogênio (N), e que pode se estender por muitos anos, até que o SPD esteja consolidado. O tempo de consolidação desse sistema varia com as condições edafoclimáticas de cada local e do sistema de manejo, e pode demorar até dez anos até que ocorra a condição de plantio direto consolidado.

1.1 - Solos do Cerrado

Nos solos do Cerrado, a adoção do SPD foi mais recente, comparativamente à região Sul do Brasil, e a evolução do sistema de acordo com as premissas de não revolvimento do solo, com cobertura permanente de palhada e rotação de culturas, ainda esbarra em limitações. As principais dificuldades de implantação dentro do conceito pleno de SPD podem ser atribuídas à ocorrência de uma estação seca com duração de vários meses na entressafra, o que restringe as possibilidades de introdução de uma maior quantidade de espécies para cultivo ao longo do ano, as quais serviriam para incrementar o aporte de resíduos vegetais (palhada) e a diversificação de sistemas de produção.

A rigor, a estação chuvosa nos principais polos agrícolas do Cerrado permite apenas cultivos de safra (primavera/verão) e segunda safra (verão/outono). Atualmente, a modalidade amplamente predominante consiste no sistema soja/milho segunda safra, enquanto algodão, trigo, feijão e sorgo participam em menor proporção. Assim, a rotação de culturas não tem sido um padrão modal no Cerrado e muito do que entra nas estatísticas como área de SPD, na realidade, trata-se apenas de semeadura direta. Também nesse sentido, a recorrência da sucessão soja/milho segunda safra tem aproximado as lavouras à condição semelhante à monocultura.

Além da limitada diversificação de culturas, que reduz o aporte de restos culturais, as temperaturas médias mais elevadas contribuem para o contraste entre o Cerrado e o Sul do Brasil no tocante às possibilidades de aumento da MO do solo pelo SPD. Mesmo sem o revolvimento do solo, a decomposição da palhada é acelerada sob condições de alta temperatura e umidade na época chuvosa. Desse modo, o acúmulo de restos culturais não se sustenta e costuma ser insuficiente até mesmo para uma adequada proteção do solo contra a erosão. Mesmo em sistemas com maior adição de resíduos, os incrementos nos níveis de MO tendem a ocorrer em mais longo prazo de adoção do SPD no Cerrado, estendendo a fase de implantação do sistema. De acordo com Bayer et al. (2006), o acúmulo médio de C até a profundidade de 20 cm em áreas sob SPD é da ordem de 350 e 480 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para condições tropicais e subtropicais no território brasileiro, respectivamente. Nesse contexto, estima-se que seria necessária a adição anual ao redor de 12,5 t ha⁻¹ de biomassa seca de restos culturais para manter a sustentabilidade do SPD em lavouras no Norte do Mato Grosso (Sá et al., 2015) e cerca de 10 t ha⁻¹ nas áreas do Rio Grande do Sul (Bayer et al., 2019).

O desafio dos produtores no Cerrado para alcançar um SPD de qualidade é grande, mas tem progredido a percepção de que investir em intensificação e diversificação de sistemas dá retorno, mesmo quando envolve espécies sem remuneração direta, como no caso das plantas de cobertura. Com essa perspectiva, vem aumentando as áreas com inserção de crotalárias, nabo forrageiro, milheto e gramíneas forrageiras tropicais, aproveitando as últimas chuvas antes do período seco ou mesmo em consórcios com as culturas de grãos. Os benefícios incluem ciclagem de nutrientes, maior adição de C ao sistema, prevenção da compactação e controle fitossanitário (nematóides, mofo branco, etc).

Casos de sucesso têm sido o cultivo consorciado de espécies de braquiária e *Panicum* com o milho verão ou segunda safra, objetivando aumentar a produção de palhada no SPD ou viabilizar o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP). O bioma Cerrado abrange entre 50 e 60 milhões de hectares de pastagens cultivadas, em que cerca de 80% destes possuem algum grau de degradação, conforme estimativas disponíveis. Sendo a MO o pilar da sustentabilidade da fertilidade do solo e sua perda um dos principais fatores que acentuam a degradação, fica claro o papel da ILP e do SPD na reversão desse problema que é alvo de severas críticas pela comunidade internacional, com repercussões geopolíticas e econômicas relevantes para o Brasil.

1.2 - Terras Altas do Sul do Brasil

As áreas com cultivo de cereais e pastagens em terras altas do Sul do Brasil normalmente são caracterizadas por uma boa distribuição de chuvas durante praticamente todo o ano, possibilitando adequado suprimento de água às culturas no verão e no inverno. Em termos de manejo de solos, com destaque para a região Centro-Sul do PR e Planalto do RS, a fase inicial de desenvolvimento da agricultura foi baseada no SPC, com intenso revolvimento do solo por meio de aração e gradagens, principalmente para implantação da soja no verão. As consequências do revolvimento do solo, associado à ocorrência de chuvas intensas foram graves, com elevadas perdas de solo fértil por erosão hídrica. Como isso resultou na degradação do solo, houve uma grande preocupação com a melhoria do manejo de solo na região. Nesse contexto, a área com SDP na região Centro-Sul do PR passou de 5% na década de 70, para 30% na década de 80 e mais de 95% a partir de 1995 (Fontoura et al., 2015).

Em termos de qualidade do manejo de solos, tão importante quanto a adoção do SPD, foi a ampliação da área cultivada com cereais de inverno, pastagens ou plantas de cobertura, que foi fundamental para formação de palhada para cobrir o solo sob SPD. Além disso, outro grande avanço em termos de manejo de solos na região foi a ampliação da área com rotação de culturas de soja (2/3) - milho (1/3). Dessa forma, o SPD tem contribuído para a melhoria da estabilidade de agregados, maior armazenamento de água, aumento dos teores de MO, dos valores da capacidade de troca de cátions (CTC) e do aumento dos teores de P, K, Ca e Mg no solo, em comparação ao SPC, refletindo em incremento na produtividade da soja, milho e cereais de inverno (Fontoura e Bayer, 2008).

1.3 - Terras Baixas do Sul do Brasil

Nas terras baixas do RS e SC, o cultivo do arroz irrigado é a principal atividade econômica, às vezes associado com pastagens na pecuária de corte extensiva ou, mais recentemente, em rotação com cultivos de sequeiro como a soja. Essas terras se situam em áreas de relevo plano à suave ondulado, com baixa suscetibilidade à erosão e facilmente mecanizáveis, mas com restrições físicas e difícil drenagem. O sistema tradicional de cultivo de arroz irrigado foi o preparo convencional com intensa mobilização do solo, tendo em vista a necessidade de preparar a área para a semeadura e a construção das taipas de irrigação. Esse sistema promoveu, ao longo do tempo, uma degradação dos atributos físicos do solo e, na maioria dos solos sob esse sistema, os teores de MO e a disponibilidade de P são baixos, enquanto a disponibilidade de K é média (Marchesan et al., 2019).

Como as áreas de cultivo de arroz irrigado não estão sujeitas à erosão, como nas terras altas, não existe um apelo ao uso de sistemas conservacionistas. Entretanto, nas

últimas décadas, a baixa rentabilidade da lavoura arrozeira, entre outros fatores, tem proporcionado a expansão significativa de outros sistemas de manejo, como o cultivo mínimo ou o plantio direto, além da rotação do arroz com a soja. Essa expansão tem sido motivada pela redução de custos e controle mais efetivo do arroz vermelho, sem que os requisitos da mínima movimentação do solo, da cobertura permanente do solo e da rotação de culturas sejam plenamente adotados, como no SPD em terras altas. Assim, o SPD, como preconizado para as terras altas, é pouco utilizado para o cultivo do arroz irrigado.

O manejo conservacionista do arroz em terras baixas passou a envolver o preparo antecipado do solo e das taipas das áreas de pousio ou pós-colheita das áreas de arroz no verão. Essa operação, associada com a possibilidade da semeadura da cultura diretamente sob a resteva dessecada de plantas espontâneas ou cultivadas no inverno, reduziu expressivamente as operações de mobilização do solo no manejo do arroz irrigado, razão pela qual os termos “cultivo mínimo” e “plantio direto” são frequentemente adotados para caracterizar este novo sistema, mas ele também pode ser denominado de “plantio direto com preparo de verão” tendo em vista a realização de revolvimento prévio do solo. Baseado nesse contexto, os impactos da recente adoção dos sistemas conservacionistas e da rotação de culturas em arroz irrigado ainda são pouco percebidos ou menos intensos nas terras baixas como um todo do que aqueles detectados em terras altas.

2 - Variabilidade espacial e amostragem de solo em SPD

Conforme comentado no item 1, os teores de MO e de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg, principalmente) concentram nas camadas mais superficiais (0-5 ou 0-10 cm) de solos manejados com o SPD. Inicialmente, também é gerada maior acidez nessas camadas, resultante das reações do ciclo do N no solo (nitrificação), da respiração de microrganismos e do sistema radicular das plantas, e da decomposição dos compostos orgânicos. Contudo, ela pode ser corrigida com a calagem aplicada em superfície, proporcionando um aumento do pH superficial em comparação com as camadas da subsuperfície. Por outro lado, a correção da acidez da subsuperfície (neste capítulo considerada a camada mais profunda que 10 cm, em solos do extremo Sul do Brasil; ou mais profunda que 20 cm, no PR e Cerrado) tende a ser pouco ou lentamente afetada por essa prática. A acidez nessas camadas é típica de solos argilosos e ácidos sob SPD, especialmente aqueles que não foram corrigidos com a incorporação prévia de calcário, ou a dose incorporada foi insuficiente, na implantação do SPD. Outros aspectos relacionados à acidez em subsuperfície e ao manejo da calagem e da gessagem constam no item 4.1 deste Capítulo.

Como o solo no SPD passa a ser mobilizado somente na linha de semeadura e no sulco de deposição de fertilizantes, a concentração de nutrientes pouco móveis, como o P, aumenta em camadas superficiais, pois essa não é misturada e homogeneizada como na camada arável (cerca de 0-20 cm) do sistema convencional. O acúmulo de resíduos vegetais e de MO, incrementando a CTC, associados à aplicação de fertilizantes e de corretivos de acidez na superfície do solo, também contribuem para a formação de camada contendo maior concentração de nutrientes nos primeiros centímetros do perfil do solo. A maior concentração de nutrientes na camada mais superficial também pode resultar da compactação, especialmente de solos argilosos, ocasionada pelo tráfego de máquinas, o que diminui a percolação da solução do solo ao longo do perfil.

Assim, a maior variabilidade vertical dos atributos químicos de solo é uma característica do SPD que, tipicamente, proporciona maior acúmulo de nutrientes nas camadas mais superficiais. Por outro lado, em solos manejados com o SPC, o preparo da camada arável torna os atributos químicos do solo mais homogêneos até a profundidade revolvida, permitindo que uma amostragem do solo na camada de 0 a 20 cm represente bem as condições da lavoura.

A variação vertical dos nutrientes em solos sob o SPD varia com a quantidade aplicada, a solubilidade e reatividade das formas iônicas que ocorrem na solução do solo. Em função disso, a variabilidade do P (fosfatos), em geral, é maior que a do Ca (cátion divalente) e a variabilidade desses dois nutrientes é maior que a do Mg (cátion divalente) e que a do K (cátion monovalente); isso também ocorre com o enxofre (S, na forma de sulfato) e o boro (B, na forma de boratos). Contudo, esses nutrientes são mais solúveis que o P, Ca, Mg e K, o que facilita a correção da disponibilidade e de S e B no solo da camada de 0-20 cm ou abaixo, mesmo com aplicações superficiais dos fertilizantes.

Além da estratificação vertical, a adoção do SPD também promove um aumento da estratificação horizontal dos atributos químicos do solo. Essa varia, principalmente, com a forma de aplicação dos fertilizantes e dos corretivos de acidez, além da rotação de culturas (diferentes espaçamentos entre as linhas de semeadura), a fase de evolução do SPD e a dose e o tipo de fertilizante aplicado. Em geral, a variabilidade horizontal é maior em solos com baixa fertilidade e adubados com a aplicação de fertilizantes na linha de semeadura, comparada à aplicação a lanço. Entretanto, isso se refere à aplicação a lanço efetuada com equipamentos bem regulados, o que nem sempre ocorre. É comum, por exemplo, a aplicação de doses baixas ($< 2,0 \text{ t ha}^{-1}$) de calcário a lanço utilizando distribuidores de discos centrifugos, o que ocasiona variabilidade de distribuição desse corretivo na faixa de aplicação (alto coeficiente de variação). Nessa situação, a variabilidade horizontal dos indicadores de acidez do solo pode aumentar. De forma similar, o mesmo pode ocorrer com a aplicação a lanço de fertilizantes granulados com teores elevados de partículas pequenas ($< 1 \text{ mm}$) ou em forma de pó, como se verifica frequentemente com a aplicação de cloreto de potássio em doses menores que 150 kg ha^{-1} . De modo geral, a desuniformidade do tamanho ou da densidade dos grânulos de fertilizantes aplicados a lanço resulta em variabilidade horizontal da fertilidade do solo no SPD.

Apesar do SPD gerar uma variabilidade horizontal em solos adubados com a aplicação de fertilizantes na linha de semeadura, essa variabilidade tende a diminuir com os anos de uso dessa prática. Isso resulta da aplicação de fertilizantes em diferentes localizações, tendo em vista a não coincidência das linhas de semeadura em diferentes cultivos e do diferente espaçamento entre as espécies de inverno e de verão tradicionalmente cultivadas. Assim, após alguns anos de adoção do SPD com aplicação de fertilizantes na linha de semeadura, a importância dessa prática na variabilidade espacial e na amostragem do solo é reduzida, pois os teores dos nutrientes já foram corrigidos com certa uniformização da fertilidade, o que resulta em menor necessidade de aplicação de fertilizantes. Em solos corrigidos, as doses de fertilizantes fosfatados e potássicos são dimensionadas para manter a disponibilidade alta desses nutrientes no solo, ou para repor o que é exportado com as colheitas, diminuindo, em relação a solos ainda não corrigidos (Sousa e Lobato, 2004; NRS/SBCS, 2016; NEPAR/SBCS, 2019).

2.1 - Solos do Cerrado

A variabilidade vertical dos atributos químicos deve ser considerada na camada diagnóstica ao amostrar o solo, pois ela é determinante nas recomendações de calagem e de adubação. No Cerrado, as camadas diagnósticas de 0-10 e de 10-20 cm são utilizadas por alguns produtores para o manejo da fertilidade do solo no SPD, embora não haja tabelas de interpretação específicas para cada uma dessas camadas. Por outro lado, outros utilizam a camada de 0-20 cm com certa frequência e consideram que esse procedimento atende satisfatoriamente aos objetivos de monitoramento temporal da fertilidade do solo nas lavouras.

Contudo, é reconhecida a existência do gradiente de fertilidade no perfil em solos manejados com o SPD. Desse modo, amostragens estratificadas são recomendadas, sobretudo, para aferição esporádica do grau de estratificação da fertilidade entre as camadas de 0-10 e de 10-20 cm. Esse procedimento é especialmente importante para subsidiar a tomada de decisão para adubação fosfatada a lanço em superfície do solo, a qual é desaconselhável quando o teor de P na camada de 10-20 cm for menor que o nível crítico. Cabe ainda destacar que, em solos do Cerrado, a coleta de amostras a maiores profundidades, nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, é um pré-requisito para diagnóstico da necessidade de gessagem e o dimensionamento da dose de gesso, visando o manejo da acidez subsuperficial (Sousa et al., 2016).

2.2 - Terras Altas do Sul do Brasil

No RS e em SC, a primeira recomendação de amostragem de solo, para culturas de grãos em SPD, preconizava a coleta de camadas estratificadas (0-5 e 5-20 cm; CFS-RS/SC, 1995). Contudo, como o sistema de recomendação de adubação da época era para o SPC, as doses de correção de P e de K eram para a camada arável (0 a 20 cm). Posteriormente, essas doses foram ajustadas para a correção de solos sob SPD, e a camada de 0 a 10 cm solo foi preconizada para a amostragem nesse sistema (CQFS-RS/SC, 2004). Esse ajuste foi baseado na similaridade das curvas de rendimento das culturas de grãos em ambos os sistemas de produção (Anghinoni e Salet, 1998). Além disso, esse ajuste evitou que novos ensaios de calibração fossem realizados, o que demandaria tempo e custo elevado. Assim, foi possível atender a forte demanda do setor produtivo, da época, por tabelas de adubação aplicáveis ao SPD.

No RS e em SC, preconiza-se que os níveis de acidez e de nutrientes do solo da camada de 0 a 20 cm sejam corrigidos, quando da implantação do SPD (NRS/SBCS, 2016). No entanto, isso não ocorreu em todas as áreas em que esse sistema tem sido implantado. Nessas áreas, a amostragem da camada de 0 a 10 cm deve ser complementada com a amostragem da camada 10 a 20 cm. Assim, é possível monitorar a acidez e os teores de nutrientes em subsuperfície, complementando a tomada de decisão da calagem e da adubação no RS e em SC (NRS/SBCS, 2016).

Em solos com fertilidade construída ao longo da evolução do SPD, a camada de 0 a 20 cm pode ser utilizada para avaliar os atributos químicos do solo, como é indicado no PR, pois a estratificação horizontal e vertical dos nutrientes tende a diminuir. Complementarmente, nesse Estado, indica-se ainda a coleta da camada de 20 a 40 cm, para avaliar a acidez e os nutrientes em subsuperfície e decidir se é necessário corrigir essa parte do perfil do solo (Fontoura et al., 2015; NEPAR/SBCS, 2019).

2.3 - Terras Baixas do Sul do Brasil

Em áreas de arroz irrigado, a análise de solo tem sido indicada anualmente (SOSBAI, 2018). Em áreas de terras baixas do Sul do Brasil, tendo em vista a pouca expressão do cultivo de arroz irrigado sem algum revolvimento do solo, a camada de 0 a 20 cm é indicada para a amostragem do solo, independentemente do sistema de manejo adotado. Nesse caso, recomenda-se que se aproveite algum eventual momento de revolvimento do solo para a incorporação de corretivos, quando necessários (SOSBAI, 2018).

2.4 - Tipos de amostragem de solo

No que se refere ao tipo de amostragem, os procedimentos tradicionais de obtenção de uma amostra composta pela coleta de 10 a 20 subamostras, em glebas de 10 a 20 ha e coleta manual, foram sendo substituídos, a partir do início da década de 2000, pela amostragem sistemática, mecanizada e georreferenciada da agricultura de precisão. Essa consiste em dividir as áreas em grades (“malhas”) com tamanho de 1 até 2 a 4 ha, mas, geralmente, com coleta de menor número de subamostras por “malha” (5 a 8). Os resultados das análises de solo de cada grade são interpolados por modelos matemáticos para gerar os mapas que refletem a variabilidade espacial de atributos analisados nas lavouras (Resende e Coelho, 2017).

Esse procedimento permite o conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo e, dessa forma, a aplicação de insumos (corretivos e fertilizantes) à taxa variável, conforme a variabilidade encontrada na lavoura. Embora os custos sejam relativamente maiores (maior número de amostras, assistência técnica especializada), estes podem ser compensados com uma aplicação mais racional dos insumos (quantidades ajustadas à realidade da área) e maior homogeneidade da produtividade da área após a correção da variabilidade encontrada. Entretanto, cabe salientar que a produtividade das culturas em SPD não é resultado exclusivamente dos atributos químicos e o monitoramento das condições físicas (ex. densidade, resistência à penetração, taxa de infiltração) e biológicas (ex. fixação biológica de nitrogênio, atividade microbiana, teores de enzimas específicas), bem como o atendimento aos demais fatores de produção, também são fundamentais para o sucesso dos empreendimentos.

Além da amostragem ao acaso ou da sistemática, o solo pode ser coletado com o procedimento de amostragem direcionada. Esse procedimento consiste em amostrar, de forma independente, subáreas ou zonas homogêneas de manejo, identificadas dentro de uma área maior, e tem sido utilizado de forma crescente no SPD. Outros procedimentos de coleta de solo, que são menos utilizados, são a amostragem intensificada e a amostragem do perfil cultural. Na amostragem intensificada, coleta-se um maior número de subamostras (40 a 60) por gleba homogênea, enquanto na amostragem do perfil cultural, são abertas pequenas trincheiras, amostrando camadas que correspondem ao perfil de distribuição do sistema radicular da cultura e realizando uma análise expedita da estrutura do solo. Os diferentes tipos de amostragem ainda podem ser utilizados em conjunto com algumas técnicas de detecção da variabilidade espacial dos nutrientes no solo, como os índices de vegetação (ex., NDVI), sensores de solo (ex., condutividade elétrica), etc.

Independente do procedimento de amostragem, a maior variabilidade espacial dos atributos químicos dos solos manejados com o SPD indica que a avaliação da fertilidade deve ser realizada com maior frequência e maior detalhamento, quando

pertinente, para identificar estratos horizontais e verticais de variação espacial, em relação ao SPC. Nesse sentido, tem sido indicada a frequência de análise de solo a cada dois cultivos adubados ou dois anos, quando a correção do solo estiver em andamento, ou a cada dois a três anos, em solos já corrigidos. Qualquer que seja a situação, as amostragens de solo também devem ser tão mais frequentes quanto mais intensivo for o sistema de produção (ex: duas ou mais colheitas por ano, cultivos de alto rendimento/exportação de nutrientes, remoção de plantas inteiras para ensilagem ou forrageamento animal).

Como comentado anteriormente, as camadas diagnósticas e a frequência de amostragem utilizadas para avaliar a fertilidade do solo podem variar entre regiões. Isso está relacionado com as diferenças dos sistemas de recomendações de calagem e adubação, que são regionalizados e construídos (ou adaptados) para o SPD. Assim, é importante considerar qual o sistema de recomendação (tabelas de interpretação de análises de solo e de recomendação da calagem e da adubação) utilizado pelo usuário, a fim de que possa utilizar a camada de solo indicada para a região.

3 - Matéria orgânica e ciclagem de nutrientes no SPD

Como comentado no item 1.1, o uso contínuo e bem manejado do SPD resulta em aumento do teor de MO do solo, adicionando carbono ao solo via raízes e resíduos culturais. Nesse sistema de manejo, o teor de MO do solo aumenta de modo diretamente proporcional ao acréscimo de restos culturais inseridos no sistema de produção. Conforme mencionado no item 1.1, são necessárias entre 10 a 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca desses materiais, dependendo do ambiente de produção, para manter os teores de MO do solo.

Embora seja reconhecido o papel do SPD no aumento da MO do solo, a sua simples adoção como estratégia isolada pode não produzir os efeitos positivos esperados em relação ao acúmulo de carbono no solo, especialmente em clima tropical em que as taxas de decomposição dos resíduos culturais são mais elevadas. Assim, são necessários sistemas de cultivo diversificados e com alto nível de adição de resíduos culturais, incluindo resíduos oriundos de plantas leguminosas. A capacidade de produção de biomassa e a velocidade de decomposição dos restos culturais de gramíneas e de leguminosas são muito distintas. Em geral, as primeiras contribuem com maiores quantidades de resíduos, de alta relação C/N, de maior resistência à decomposição, enquanto o inverso se aplica ao segundo grupo.

Caso o sistema de produção envolva a alternância entre gramíneas e leguminosas, tem-se a combinação de quantidade e qualidade de substratos orgânicos que favorecem o incremento de C e de N necessários à formação da MO do solo, além de melhorar a ciclagem de nutrientes (Yagi et al., 2005; Siqueira Neto et al., 2009; Aita et al., 2014; Urquiaga et al., 2014). Amado et al. (2002) sugerem que o uso de leguminosas, combinado com maior diversidade de espécies em sucessão ou rotação de culturas, aumenta de forma significativa o acúmulo de C e N no solo. Da mesma forma, Sisti et al. (2004) demonstraram que, após 13 anos de cultivo de trigo/soja/ervilhaca, o estoque de carbono (C) do solo aumentou em 1,3 t C ha⁻¹ sob SPD em comparação com o SPC, enquanto no sistema apenas com trigo/soja nenhum acúmulo foi verificado, mesmo em SPD. Esses resultados ressaltam a importância da rotação de culturas e do alto aporte de resíduos vegetais quando se visa o acúmulo da MO do solo em SPD e, conseqüentemente, os demais benefícios do sistema.

Embora no SPD haja menor demanda de aporte de resíduos culturais para manter o teor de MO do solo quando comparado com o SPC, em áreas com sucessão soja-pousio de inverno ou soja-aveia cobertura, a adição de matéria seca é insuficiente para manter os teores de MO do solo, principalmente, nas regiões mais quentes e de baixa altitude. Áreas sem plantas de cobertura de inverno ou com aveia-preta de baixa produção de biomassa ($< 4,0 \text{ t ha}^{-1}$ de matéria seca), em que não são aplicados fertilizantes nitrogenados e/ou fungicidas, ou áreas em que não houve a semeadura dessa espécie (aveia espontânea ou “guacha”), em que as cultivares de soja produzem pouca biomassa da parte aérea, também contribuem para o decréscimo ou a não evolução da MO do solo. Esses fatores, em conjunto ao não uso das práticas de conservação de solo preconizadas, restringem a evolução da fertilidade ou a consolidação do SPD.

A concentração de nutrientes nos restos culturais oscila conforme as características das espécies componentes do sistema (Tabela 1), a região e o ambiente de cultivo, as condições de crescimento e a forma como são manejadas. A quantidade de biomassa produzida interfere na concentração ou diluição dos nutrientes contidos, de modo que não é possível assumir indicadores padronizados de ciclagem, embora alguns valores possam ser obtidos nas Tabelas 1 e 2. Dessa forma, o ideal é que, sempre que necessário obter indicadores locais, se realize análise da palhada após as colheitas na propriedade. Assim, pode-se estimar de forma mais realista os créditos de nutrientes oriundos da ciclagem e considerá-los para definição de manejo das adubações (Resende et al., 2019).

Um aspecto importante é que determinadas espécies vegetais possuem qualidades específicas, que as tornam especialmente aptas a absorver e reciclar nutrientes, enquanto algumas também têm outras qualidades como ação descompactadora ou supressora de pragas, doenças e plantas daninhas. O reconhecimento dessas capacidades pode ser útil no aprimoramento do manejo cultural, por meio da escolha das espécies mais convenientes para compor a diversificação no SPD. Não por acaso, além do milheto, a inclusão de gramíneas forrageiras (braquiária, *Panicum*) em sistemas de produção de grãos tem se disseminado, sobretudo na região do Cerrado. Essas plantas desenvolvem sistema radicular abundante e profundo, captando nutrientes no perfil de solo abaixo da zona de exploração radicular das culturas comerciais e colocando-os ao alcance para os cultivos subsequentes. O nabo forrageiro é reconhecido por aliviar a compactação do solo e melhorar o suprimento de K e N ao cultivo seguinte, embora não seja uma leguminosa (Tabela 2). Já, algumas crotalárias associam a fixação biológica de nitrogênio (FBN), a ciclagem de K e outros nutrientes e a redução de problemas com nematoides.

A produção de grãos no SPD inicialmente foi suportada com o uso de quantidades elevadas de fertilizantes, o que pode ser considerado insustentável em muitas situações. Mais recentemente, algumas alternativas foram desenvolvidas para aumentar a eficiência desse sistema, potencializando a fertilidade do solo e o aproveitamento de fertilizantes e prevenindo as perdas de nutrientes. Entre as alternativas desenvolvidas, destaca-se o uso de consórcio de plantas de coberturas (mix de culturas), que tem aumentado nos últimos anos em áreas com SPD. Entre as vantagens atribuídas a esse tipo de cultivo se destacam a diversificação biológica, a produção de matéria seca (MS) e, conseqüentemente, a ciclagem de nutrientes (Tabela 3).

Tabela 1. Conteúdo equivalente de macro e micronutrientes, nos grãos ou caroço e nos restos culturais, por tonelada de produto colhido de diferentes culturas no Brasil.

	Macronutriente						Micronutriente					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	kg t ⁻¹ de produto colhido						g t ⁻¹ de produto colhido					
Algodão em caroço												
Caroço e fibras	35,0	11,0	17,0	2,4	7,3	3,2	22	8	104	13	-	28
Restos culturais	35,0	6,0	41,0	20,2	6,4	2,1	98	35	526	59	-	25
Cevada												
Grão	15,6	6,2	6,6	0,4	1	0,9	5	5	63	16	0,3	18
Restos culturais	7,5	1,3	15,7	2,6	1,1	0,7	5	4	126	18	0,4	10
Feijão												
Grão	25,0	9,1	17,7	2,2	2,0	2,1	23	7	140	116	-	22
Restos culturais	13,8	2,3	22,5	15,5	2,9	2,3	24	8	231	205	-	34
Milho												
Grão	14,0	6,0	4,4	0,1	1,1	1,0	5	2	15	5	0,6	18
Restos culturais	14,4	0,3	13,6	4,9	2,7	1,0	13	7	205	58	0,3	27
Soja												
Grão	54,0	11,0	22,0	2,8	2,5	2,8	31	12	65	39	5	41
Restos culturais	24,0	5,0	36,0	19,3	8,2	1,4	51	8	310	159	2	34
Sorgo granífero												
Grão	20,8	12,2	10,3	3,7	2,7	1,4	25	9	23	68	-	28
Restos culturais	18,0	5,2	26,0	8,7	2,5	1,6	47	34	969	201	-	70
Trigo												
Grão	20,0	7,3	4,2	0,2	0,8	1,2	3	3	14	13	-	15
Restos culturais	8,0	1,6	19,7	2,2	1,5	2,3	17	3	360	93	-	5

Fonte: Adaptado de Resende et al. (2019), a partir de dados de várias publicações.

Tabela 2. Produção de matéria seca (MS), acúmulo e concentração de nutrientes por crotalária (*Crotalaria juncea*) e milheto (*Pennisetum americanum*) no Mato Grosso do Sul e por ervilhaca (*Vicia sativa* L.) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus*), no Rio Grande do Sul, em dois anos agrícolas.

Espécie/ Ano	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹									
Crotalária/ 2001	9,8	169	32	240	97	53	18,6	0,12	1,30	0,71	0,26
Crotalária/ 2002	8,6	189	23	223	83	41	13,4	0,09	1,70	0,52	0,21
Milheto/ 2001	7,7	68	24	194	32	21	11,1	0,05	4,82	0,69	0,23
Milheto/ 2002	6,4	64	14	171	24	18	5,1	0,04	2,01	0,36	0,16
Ervilhaca/ 1995	3,3	98	15	156	34	9					
Ervilhaca/ 1996	6,5	198	24	239	59	22					
Nabo forrag. 1995	4,6	110	27	204	85	27					
Nabo forrag. 1996	7,2	166	17	204	106	42					
Concentração											
	kg t ⁻¹						g t ⁻¹				
Crotalária/ 2001		17,3	3,3	24,6	9,9	5,4	1,9	12	133	73	27
Crotalária/ 2002		22,0	2,7	25,9	9,6	4,7	1,6	10	198	60	24
Milheto/ 2001		8,9	3,1	25,1	4,1	2,8	1,4	6	624	89	30
Milheto/ 2002		10,1	2,2	26,9	3,8	2,8	0,8	6	316	57	25
Ervilhaca/ 1995		30,0	4,6	47,7	10,4	2,8					
Ervilhaca/ 1996		30,5	3,7	36,8	9,1	3,4					
Nabo forrag. 1995		23,7	5,8	43,9	18,3	5,8					
Nabo forrag. 1996		23,1	2,4	28,4	14,7	5,8					

Fonte: Adaptado de Florin et al. (1998) e Silva et al. (2006).

Tabela 3. Produção de matéria seca (MS), concentração (%) e acúmulo (kg ha^{-1}) de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na parte aérea de plantas de coberturas, aos 90 dias após a semeadura. Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2020.

Cobertura	MS		N		P		K	
	t ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	%	$\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$	
Aveia-branca	4,3	1,63	70	0,26	26	3,25	168	
Aveia-preta	4,6	2,12	98	0,28	29	2,58	142	
Centeio	6,5	1,08	70	0,15	22	0,85	66	
Nabo forrageiro	11,6	2,06	239	0,30	80	1,98	276	
Mix 1	13,4	1,96	263	0,41	126	2,68	431	
Mix 2	14,1	2,20	310	0,45	145	3,48	589	
Mix 3	14,6	2,37	346	0,55	184	3,34	585	
Mix 4	14,7	2,96	435	0,32	108	2,57	453	

Mix 1: 17,5% de aveia-preta, 15% de nabo, 17% de centeio, 50,5% de aveia branca. Mix 2: 53% de aveia-branca, 17,5% de aveia-preta, 17% centeio, 7,5% ervilhaca comum, 5% nabo forrageiro. Mix 3: 65% de aveia preta, 20% de centeio, 15% de nabo. Mix 4: 65% de aveia-preta, 22,5% de centeio, 7,5% ervilhaca comum, 5% de nabo forrageiro.

Fonte: Viebrantz e Escosteguy(2021).

Os resultados apresentados na Tabela 3 evidenciam que a quantidade de MS e a ciclagem de N, P e K são maiores com os mix de cobertura (aveia, nabo, ervilhaca e centeio), em relação à monocultura de gramínea, como a aveia-preta. Além disso, os resultados indicam que a composição ou a proporção das espécies que compõem o mix influenciam a produção de MS e a ciclagem desses nutrientes, como se observa em relação aos Mix 2 e 3 que proporcionaram maior ciclagem de N, P e K, em relação as demais coberturas avaliadas.

Em terras baixas, como o cultivo tradicional de arroz irrigado ocorria com intenso revolvimento do solo, praticamente não havia a presença dos resíduos culturais de cultivos anteriores na semeadura do arroz. Com a adoção do cultivo mínimo ou o plantio direto, a semeadura da cultura passou a ocorrer com a presença dos resíduos dessecados da vegetação espontânea de inverno ou previamente cultivada (embora poucas opções se adaptem aos solos com excesso de umidade). Apesar dos benefícios para a ciclagem de nutrientes, um dos impactos da presença de grande quantidade de resíduos culturais no alagamento do arroz é a ocorrência de ácidos orgânicos de cadeia curta (acético, propiônico, butírico, entre outros) devido aos processos de decomposição anaeróbica do carbono após o alagamento do solo (Silva et al., 2008). Esses ácidos podem causar distúrbios às plantas de arroz na fase de estabelecimento da lavoura e também justificaram a pouca adesão ao SPD pleno em terras baixas. Assim, os preparos antecipados do cultivo mínimo (ou plantio direto com preparo de verão) ajudam também a eliminar o excesso de resíduos culturais por favorecer a decomposição aeróbica, de modo que a semeadura do arroz sob a resteva ocorra em níveis de resíduos que não chegam a comprometer o estabelecimento da lavoura.

4 - Técnicas utilizadas para o manejo da fertilidade química em SPD

4.1 - Correção da acidez

A acidez do solo resulta de processos naturais e do uso antrópico do solo, que liberam os íons ácidos hidrogênio (H^+) e Al^{+3} , e/ou removem os cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2}), substituindo-os pelos íons ácidos (Bolan et al., 2003). A principal causa natural da acidez é a água da chuva, que atua em longo prazo (centena a milhares de anos). Porém, a acidificação pode ser gerada em curto prazo, pelo uso agrícola. Geralmente, isso ocorre devido aos efeitos da mineralização da MO e da nitrificação do N, além das aplicações de fertilizantes amoniacais, como p. ex. o sulfato de amônio. Adicionalmente, a geração do gás carbônico resultante do aumento da atividade biológica também acidifica o solo. Como mencionado no item 1.1, a mineralização da MO na fase de implantação do SPD é menor, resultando em maior acúmulo de N imobilizado em formas orgânicas e, conseqüentemente, menor nitrificação. Assim, até que o acúmulo de MO atinja o equilíbrio entre as taxas de adição e mineralização de C, a geração de acidez desta fonte é menor no SPD do que no SPC. A menor erosão no SPD também contribui para isso.

As causas de acidez antrópica variam com o ambiente de produção (solo e tipo de uso, espécie de planta, produtividade, clima, etc) e o manejo de solo, ou seja, são específicas de cada gleba de cultivo agrícola. Por exemplo, a conversão do N amoniacal (N na forma de NH_4^+), resultante da mineralização da MO ou adicionado por outras fontes, em nitrato (NO_3^-), libera H^+ para a solução e pode acidificar o solo, conforme abordado anteriormente. Contudo, essa causa de acidez é mais acentuada em solo com baixa capacidade de tamponar o aumento de H^+ , como os solos com baixa CTC, baixos teores de MO e de argila, e sem adição de calcário, dependendo ainda da quantidade de N mineralizada ou aplicada ao solo e da quantidade em que esse nutriente é removido pelas culturas agrícolas. Nesse sentido, essa fonte de acidez deve ser considerada uma causa potencial e cálculos baseados na equivalência química da reação de neutralização do H^+ com o $CaCO_3$ devem ser ajustados com base na análise da real acidez potencial do solo.

Em lavouras de grãos, especialmente com o predomínio da soja que não recebe aplicação de N, os processos de acidificação não são suficientes para baixar o pH do solo de forma acentuada em curto prazo. Por outro lado, em áreas com maior presença de milho ou com a produção de feno, silagem ou com pastejo intensivo, a quantidade de N aplicada é geralmente maior e intensifica a acidificação do solo. A diferença entre ambientes de produção pode ser também ilustrada com os resultados da análise de solo de amostras coletadas em lavouras manejadas com o SPD, nas regiões do Sul e do Cerrado do país (Tabela 4). Os resultados dessa tabela mostram que tanto os valores de referência (VR) dos indicadores de acidez (pH em água, V%, Al% e teores de Al, Ca, Mg) e a capacidade tampão do solo (indicada pela CTC potencial) como a percentagem das amostras de solos com resultados em valores abaixo destes variam entre os solos dessas regiões. Entretanto, os resultados dessa tabela mostram que a maioria dos solos do Sul do Brasil e do Cerrado tem valores de pH em água < 6,0 ou 5,5, respectivamente, ou baixa saturação por bases < 75 ou 60%, respectivamente; indicando o predomínio de solos com acidez moderada a acentuada e que essa é uma das principais limitações químicas do solo.

Tabela 4. Valores de referência limitantes (VRL) de atributos químicos de solos e percentual de amostras de solos (%) com limitações químicas, avaliadas em levantamentos de algumas lavouras com plantio direto do Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS) e do Cerrado brasileiro.

Atributo	PR (0-20 cm)		RS (0-10 cm)		RS (Várzea)		Cerrado (0-20 cm)	
	VRL	%	VRL	%	VRL	%	VRL	%
pH (H ₂ O)	≤ 4,9 ⁽¹⁾	18	< 5,5 < 6,0	49 93	< 5,5	77	< 5,5	12,9
V (%)	< 60	40	< 65 < 75	40 76	< 40	31	< 60	80,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	≤ 2	0	< 4,0	20	≤ 4,0	71	< 1,5	6,8
Mg (cmol _c dm ⁻³)	≤ 1,0	0	< 1,0	6	< 1,0	52	< 0,5	11,5
Al (cmol _c dm ⁻³)	≤ 1,5	0	≤ 1,1				> 0,2	2,7
AI (%)	> 20	0	> 10	84		54		
MO (%)	≤ 2,4	2	≤ 2,4	20		71	< 2,0	7,3
P (mg dm ⁻³)	≤ 18; ≤ 12; ≤ 9 em solos com < 25; 25 e 40 e > 40% de argila, respectivamente	60	≤ 9; ≤ 12; ≤ 18; ≤ 30, em solos com > 60; 41-60; 21-40 e < 20% de argila, respectivamente	44	≤ 6; sem considerar o teor de argila	39	≤ 6,0	25,3
K	≤ 0,21 cmol _c dm ⁻³	14	≤ 60; ≤ 90; ≤ 120; ≤ 135 mg dm ⁻³ , em solos com CTC ^{pH7,0} > 7,6; 7,6-15; 15,1-30 e > 30 cmol _c dm ⁻³ , respectivamente	10	≤ 60; ≤ 90; ≤ 120; ≤ 135 mg dm ⁻³ , em solos com CTC ^{pH7,0} > 7,6; 7,6-15; 15,1-30 e > 30 cmol _c dm ⁻³ , respectivamente		< 0,2 cmol _c dm ⁻³	18,4
CTC ^{pH7,0} (cmol _c dm ⁻³)	≤ 14	18	≤ 15	72			≤ 8,6	69,1
S (mg dm ⁻³)	≤ 3	0	≤ 10	26			< 4	54,4

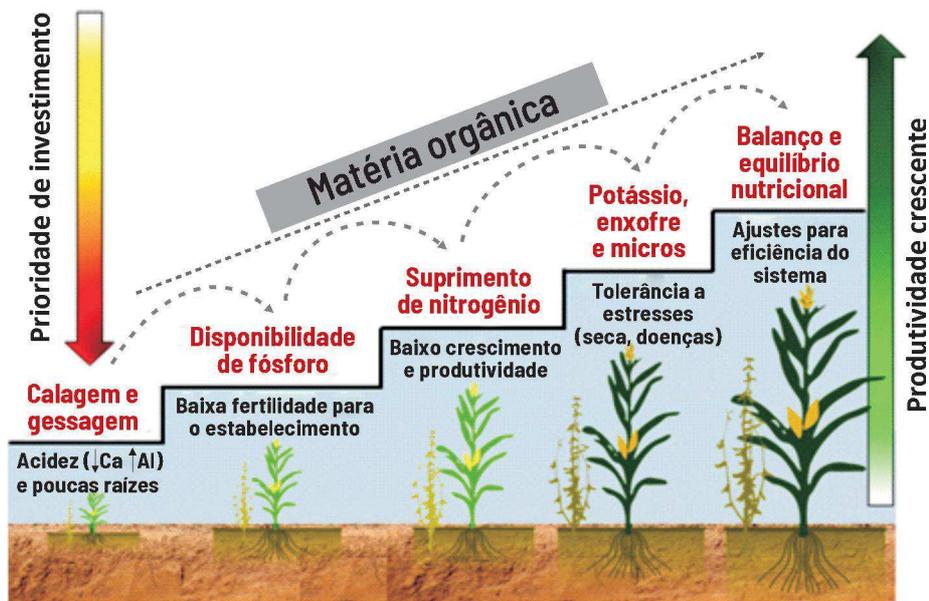
VRL: pH em CaCl₂; RS: adaptado de NRS/SRCS (2016); RS/Várzea, arroz: adaptado de SOSBAI (2018); Cerrado: adaptado de Sousa e Lobato (2004) e CFSEMG (1989). Os teores de S em lavouras, em geral, são maiores em profundidade abaixo de 20 cm. **Fonte:** Paraná: 466 amostras, coletadas em 2016 em, fazendas de Cooperativas da Cooperativa Agrária Agroindustrial, representando 115 mil ha de lavouras na região Centro-Sul do Paraná; RS: Laboratório de Análise de Solos da Universidade de Passo Fundo (não publicado); 4.800 amostras, coletadas em 2014, em glebas de 1 a 5 ha, no Pântano Médio do RS; RS/Várzea, arroz: SOSBAI (2018); Levantamento de 30,97 amostras de solos publicações em Boeni et al. (2010); Cerrado: dados de empresa CAPPU - Centro de Tecnologia Agrícola e Ambiental/Embrapa Milho e Sorgo (não publicado), 78.122 amostras, coletadas entre 2006 e 2012, representando cerca de 160 mil ha de lavouras nos estados de MG, GO, DF e BA.

Em solos ácidos (pH em água < 5,5), a produtividade das culturas é limitada, principalmente, devido à fitotoxidez de Al e de manganês (Mn), além de ferro (Fe) em arroz irrigado; à menor disponibilidade de nutrientes e atividade biológica (Robson, 2012). A acidez do solo pode ser neutralizada com a adição de bases, que geram OH⁻, como o CaCO₃ adicionado com o calcário. A dose desse corretivo, necessária para corrigir a acidez, aumenta com o poder tampão do solo (quantidade de base para elevar uma unidade de pH) e varia com a cultura, o sistema de cultivo, além do tipo de manejo de solo (Sousa e Lobato, 2004; NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBCS, 2016). Como indicam os menores valores de CTC e dos indicadores de acidez ativa e potencial (Tabela 4), a acidez e o poder tampão da acidez são menores nos solos do Cerrado, que assim, necessitam de menores doses de calcário, em relação aos do Sul do Brasil.

O efeito tóxico do Al é menor em solos sob SPD, em relação ao SPC (Salet, 1998), ocasionando menor resposta das culturas à calagem e, conseqüentemente, necessidade de quantidades mais baixas de calcário em solos sob esse sistema. No entanto, isso se aplica a solos em que o SPD foi iniciado corretamente com correção da acidez em subsuperfície e se encontra consolidado com acúmulo de MO suficiente para amenizar a toxicidade do Al pela formação de complexos estáveis com ligantes orgânicos. Além da menor toxidez do Al, a redução da dose de calcário no SPD também resulta da aplicação desse corretivo na superfície do solo, o que restringe as reações de correção da acidez à camada superficial (< 10 cm). Atenção especial deve ser dada quando as quantidades aplicadas de calcário são menores que 2 t ha⁻¹, utilizando distribuidores de disco centrífugos e mal regulados. Nessa situação, a distribuição do corretivo pode ser muito desuniforme (Boller, 2009), já que o calcário é composto de aproximadamente 50% de partículas finas (< 0,30 mm), o que, juntamente com a baixa umidade desse produto, aumenta a deriva (Mattei et al., 2020). A umidade do solo também influencia os efeitos da toxidez do Al nas plantas, os quais são acentuados com o estresse hídrico, que assim torna mais evidente a resposta das culturas à calagem, especialmente em áreas com maior gradiente vertical, conforme abordado no item 1.

4.1.1 - Solos do Cerrado

Os impeditivos relacionados às condições de acidez do solo representam a limitação primária ao uso agrícola de solos originalmente ácidos, como os da região Sul do Brasil e do Cerrado e, portanto, a prática da calagem é a providência inicial indispensável para que todo o manejo subsequente da fertilidade seja bem-sucedido (Figura 1). Em geral, a deficiência de Ca e/ou a toxidez de Al simplesmente impedem o desenvolvimento normal de raízes das culturas na camada arável e também em subsuperfície nos solos que nunca receberam corretivos de acidez, comprometendo a absorção de nutrientes e água. Esse efeito é o principal problema, embora o baixo pH, a deficiência de Mg e a toxidez por Mn também sejam características prejudiciais às culturas em solos ácidos do Cerrado.



Elaboração: Álvaro Resende.

Figura 1. Diagrama ilustrativo da sequência de limitações a serem superadas no manejo da fertilidade do solo, indicando as prioridades de intervenção na abertura de áreas para agricultura e estabelecimento do SPD no Cerrado. Elaboração: Álvaro Resende.

No Cerrado, preconiza-se controlar a acidez, mantendo a saturação por bases entre 50 a 60% (Sousa e Lobato, 2004). Atualmente, as tecnologias de controle da acidez que, em áreas novas, envolvem incorporação de calcário pelo menos até 20 cm de profundidade, associada à aplicação de gesso (incorporado ou não) visando o controle da acidez abaixo da zona de reação do calcário, estão consolidadas na região do Cerrado. Dessa forma, a calagem e a gessagem são práticas mutuamente complementares e não substitutivas. O uso conjunto dessas práticas está relacionado à baixa mobilidade dos carbonatos de Ca e de Mg, constituintes do calcário e que, por isso, têm efeito restrito à camada de incorporação desse corretivo. Já o sulfato de Ca, que compõe o gesso, e os produtos de sua reação no solo, tem maior mobilidade no solo, quando associados à água que percola no perfil.

As recomendações de calagem para os solos de Cerrado eram, inicialmente, para elevar a saturação por bases (V) a 50%, em lavouras de sequeiro; ou a 60%, em sistemas irrigados. Valores maiores do que estes poderiam induzir deficiência de micronutrientes catiônicos (Cu, Fe, Mn e Zn), devido à elevação excessiva do pH, conhecida por supercalagem (Sousa e Lobato, 2004). De fato, a deficiência de Mn é frequentemente a mais visível nas lavouras de soja nestas condições. Essa deficiência era comum, sobretudo, nos locais de depósito de calcário no campo. Os produtores se acostumaram, então, a realizar pulverizações foliares com Mn, para contornar os eventuais problemas decorrentes de aplicação recente de doses mais elevadas de calcário.

Uma observação prática relevante é que nas áreas novas, a quantidade de calcário recomendada pelos métodos que constam nos manuais de fertilidade do solo de Cerrado (CFSEMG, 1999; Sousa e Lobato, 2004) dificilmente permitiam que se atingis-

se o valor de saturação por bases desejado (ex: $V = 50\%$, na camada de 0-20 cm). Isso pode ser atribuído ao fato de que o real poder tampão da acidez dos solos seja maior que o estimado utilizando a CTC potencial calculada com base nas análises de rotina em laboratório. Adicionalmente, às vezes é possível que o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) do calcário aplicado seja menor do que o valor informado pelo fornecedor, o que aumentaria a quantidade a aplicar para se atingir a saturação por bases desejada. Como consequência dessas situações, muitos técnicos e consultores utilizam um fator de correção para aumentar a dose de calcário (ex: multiplicar por 1,5 a dose inicialmente calculada), em solos de áreas recém-abertas ao cultivo.

Mais recentemente, levantamentos realizados em lavouras reforçam os indicativos de que índices de saturação por bases maiores que os valores de referência (Resende et al., 2016) descritos nos manuais de fertilidade do solo, incluindo teores de Ca maiores que $0,8 \text{ cmolc dm}^{-3}$, abaixo de 40 cm (Sako et al., 2015), estão relacionados com maior potencial produtivo das culturas. Assim, vem se consolidando, com sucesso, critérios de dimensionamento da calagem buscando alcançar e manter valores de saturação por bases próximos de 70% até 20 cm de profundidade nas lavouras do Cerrado. No tocante aos micronutrientes, as preocupações foram mitigadas com a evolução da mecanização e dos pulverizadores, trazendo facilidade cada vez maior de se realizarem adubações foliares complementares ao longo do ciclo das culturas nessa região. Nesse contexto, certamente tem-se também o papel do SPD, que acaba atuando como agente tamponante, tanto da disponibilidade de micronutrientes (MO como fonte) quanto dos efeitos de possíveis “excessos” na aplicação de calcário ao solo (maior CTC) (Bayer et al., 2009).

Complementarmente à calagem, a prática da gessagem nos solos do Cerrado tem proporcionado bons resultados no controle da acidez em subsuperfície, quando dimensionada a partir de critérios diagnósticos, como a ocorrência de teor de Ca $< 0,5 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ou de saturação por Al (m) $> 20\%$, em camadas abaixo de 20 cm. Assim, a correta opção pela gessagem depende de se amostrar o solo nas camadas de 20-40 cm e 40-60 cm, conforme abordado no item 2.1. Atendido pelo menos um dos critérios mencionados, o cálculo mais simplificado da necessidade de gessagem, em kg ha^{-1} , consiste em multiplicar o teor de argila do solo (em %) por 50. Uma vez aplicado a lanço, mesmo sem incorporação, o gesso irá se dissolver e movimentar em profundidade com a água, processo que é estimulado pela presença de calcário e fosfato na camada superficial do solo, ficando então retido nas porções subsuperficiais do perfil (Sousa et al., 2016). Assim, a gessagem contribui para o fornecimento de Ca e a redução da toxidez por Al, em camadas mais profundas do que aquela corrigida com a calagem. Os benefícios da gessagem são percebidos principalmente quando ocorrem veranicos durante o ciclo. Ao estimular o aprofundamento do sistema radicular, a gessagem permite que as culturas encontrem água em camadas mais abaixo no perfil e tolerem por mais tempo o estresse por déficit hídrico, conforme abordado anteriormente.

Áreas manejadas em SPD no Cerrado favorecem maior efeito residual da calagem, por apresentar menor intensidade nos processos de reacidificação. Com base em experimentação com as culturas de soja e milho por 15 anos, Sousa et al. (2010) estimaram que a dose anual de calcário (PRNT=100%) necessária para corrigir a acidez gerada seria de 154 e 116 $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos SPC e SPD, respectivamente, correspondendo a uma diferença de 25%. De acordo com Sousa et al. (2016), a reaplicação de calcário no SPD deve ser realizada quando a saturação por bases for menor que 40%, na camada de 0-20 cm, realizando distribuição a lanço em superfície. Tanto a calagem quanto a gessagem tem efeito residual que perdura por vários anos nos ambientes de produção no Cerrado.

4.1.2 - Terras Altas do Sul do Brasil

Embora a sensibilidade ao Al varie com a cultura e cultivares de uma mesma espécie, no Sul do Brasil se preconiza neutralizar as formas tóxicas desse elemento, mantendo o pH em água do solo entre 5,5 a 6,0 e ou saturação por bases maior que 65%, para a maioria das culturas de grãos cultivadas nessa região (Fontoura et al., 2015; NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBCS, 2016). Nessa condição, o teor e a saturação por Al trocável serão baixos, ou não haverá formas tóxicas desse elemento.

Como em solos sob SPD a incorporação de calcário é inviável, a correção da acidez em subsuperfície deve ser efetuada quando esse sistema de manejo for implantado (NRS/SBCS, 2016). Alguns resultados obtidos em solos argilosos do RS sob SPD sugerem que a aplicação superficial de calcário não corrige a acidez em subsuperfície, mesmo após muitos anos desse modo de aplicação (Tabela 5) (Escosteguy et al., 2013). Já quando a incorporação desse corretivo foi efetuada na implantação desse sistema, e, posteriormente, a calagem em superfície foi efetuada para neutralizar a acidez superficial, a acidez do solo foi mantida em níveis toleráveis ao longo do tempo.

Essa limitação do calcário aplicado em superfície, em solos sob SPD, pode ser atribuída a vários fatores que restringem a mobilidade física ou química do calcário, como os relacionados com o solo, a qualidade dos corretivos e a prática da calagem. Entre os fatores do solo, destacam-se os que influenciam o tamponamento da acidez, como o teor de argila e de MO; a compactação, como a estrutura e a consistência do solo; a capacidade de adsorção de cátions (textura, CTC e MO), etc. Entre os fatores relacionados aos corretivos de acidez, destacam-se os relacionados a eficiência de neutralização (qualidade do corretivo), como a granulometria, o poder de neutralização e a solubilidade. A limitação da aplicação de calcário em superfície, em solos sob SPD, ainda pode ser atribuída a erros de distribuição e da dose utilizada a campo (Fiorin, 2022). Em função dessa dificuldade, alguns produtores optam pela gessagem do solo como estratégia para amenizar os efeitos da acidez em subsuperfície, já que o gesso pode aumentar o teor de Ca e diminuir a saturação por Al em profundidade, conforme abordado anteriormente. Por outro lado, na ausência de fatores que restringem a mobilidade física ou química do calcário, a calagem superficial pode diminuir a acidez em subsuperfície, como indicam os resultados obtidos em um Latossolo Bruno, em Guarapuava, PR, com baixa acidez (Al trocável < 0,30 cmol_c dm⁻³), após onze anos da aplicação do calcário (Fontoura et al., 2019).

Com a aplicação de calcário em superfície em solos argilosos cultivados com grãos, a correção da acidez é lenta (Tabela 6). Esse efeito varia com o tipo de solo, a qualidade e a dose de calcário e a quantidade de água que percola no perfil. Em solos argilosos típicos do Planalto Médio do RS, como o da Tabela 6, o efeito em profundidade avança, em geral, de 2 a 5 cm ano⁻¹. Comportamento similar é observado nos solos argilosos do Cerrado (Miranda et al., 2005).

Em Latossolos do Sul do Brasil sob SPD, a resposta de culturas de grãos à aplicação de gesso varia com o tipo de planta (gramínea x leguminosa), o nível da acidez em subsuperfície e a ocorrência de estiagem ou seca (Tiecher et al., 2018). Esses autores revisaram resultados de 72 safras de vários experimentos realizados nessa região e constataram que a aplicação de gesso proporciona maior rendimento de gramíneas, como o milho e o trigo. Isso foi observado em solos com a saturação por Al > 10% e o teor de Ca trocável < 3,0 cmol_c dm⁻³, na camada de 20 a 40 cm, independente de ocorrer déficit hídrico durante a safra, indicando que a acidez em subsuperfície foi o fator preponderante em restringir a produtividade. Possivelmente, esse efeito do gesso está

Tabela 5. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico típico com e sem incorporação de calcário, no estabelecimento do sistema de plantio direto. Amostragem de solo realizada após 25 anos do início desse sistema. Tapejara, Rio Grande do Sul.

Camada	Argila	pH	Ind. SMP	P	K	MO	Al	Ca	Mg	H+Al	CTC	Saturação	
cm	(%)			mg dm ⁻³		(%)		cmol _c dm ⁻³				Bases	Al
Com incorporação de calcário na implantação do SPD													
0 - 10	42,0	6,0	6,3	11,1	160	4,0	0,0	7,2	3,7	3,1	14,4	78	0
10 - 20	54,1	5,6	6,0	8,1	69	2,6	0,0	4,7	3,3	4,4	12,5	65	0
Sem incorporação de calcário na implantação do SPD													
0 - 10	47,0	5,3	5,7	9,0	225	3,4	0,4	3,6	1,9	6,2	12,2	49,7	6,15
10 - 20	54,1	5,0	5,4	5,3	81	2,0	1,2	1,8	1,3	8,8	11,99	27,6	26,6

Fonte: Escosteguy et al. (2013).

Tabela 6. Valores de pH em água de um Latossolo Vermelho distrófico típico há quarenta anos sob o sistema de plantio direto, após seis e trinta meses da aplicação de 4,0 t ha⁻¹ de calcário na superfície do solo. Ronda Alta, Rio Grande do Sul.

Camada cm	Valores de pH em água	
	Após seis meses	Após trinta meses
0 - 1	6,2	5,5
1 - 2	5,3	6,4
2 - 5	5,2	5,1
5 - 10	4,5	4,7

Fonte: Escosteguy, P.A.V. (Não publicado).

relacionado com o maior crescimento das raízes, aumentando, conseqüentemente, a eficiência da adubação nitrogenada e a produção de grãos das gramíneas.

Contrastando com o milho e o trigo, ou outras espécies de gramíneas, os trabalhos revisados por Tiecher et al. (2018) mostram aumento do rendimento de grãos da cultura da soja, em resposta à gessagem, somente em solos com restrição simultânea por acidez e por déficit hídrico. Em solos sem essa última restrição, a resposta dessa cultura ao gesso pode ocorrer quando a saturação por Al for > 40%, na camada de 20 a 40 cm (Pias et al., 2020). Por outro lado, em solos do Sul do Brasil, sob SPD, e com baixa acidez em subsuperfície (saturação por Al < 10% e Ca > 3,0 cmol_c dm⁻³), não há incremento no rendimento de grãos da soja, mesmo em condição de baixa disponibilidade de água no solo (Tiecher et al., 2018). Nessa condição, doses altas de gesso (6,0 a 15 t ha⁻¹) podem decrescer o rendimento de grãos, possivelmente, ao induzir a deficiência de K ou de Mg nessa cultura.

Assim, os resultados dos experimentos revisados por esses autores indicam que a avaliação dos critérios diagnósticos para tomada de decisão da aplicação de gesso (saturação por Al > 10%; Ca < 3,0 cmol_c dm⁻³, na camada de 20-40 cm) devem ser complementados, avaliando-se ainda o tipo de cultura e a ocorrência de déficit hídrico.

Contudo, isso se aplica, principalmente, a Latossolos. Já em outros solos do Sul do Brasil (Neossolos, Chernossolos e Argissolos, etc), incluindo aqueles ocorrentes em terras baixas (Planossolos, Gleissolos, etc), esses critérios e camadas diagnósticas ainda necessitam ser definidos para uma tomada de decisão mais segura da necessidade de gessagem às culturas.

4.1.3 - Terras Baixas do Sul do Brasil

Em terras baixas do Sul do Brasil, o cultivo de arroz irrigado possui particularidades em relação aos cultivos não irrigados por alagamento do solo que se refletem nas técnicas de correção da acidez do solo a serem empregadas. Um dos principais impactos da aplicação de uma lâmina de água no solo é a correção natural do pH pelo curso das reações de redução, em virtude da ausência de O_2 no solo e a consequente alteração do metabolismo microbiano aeróbico para anaeróbico, cujas reações de redução de compostos consomem H^+ , fenômeno conhecido por “autocalagem” do solo (Marchesan et al., 2019).

Dessa forma, a aplicação de calcário para a elevação do pH não se justifica, exceto quando o sistema de semeadura do arroz é realizado em solo seco e a irrigação é realizada após 15-20 dias da emergência das plantas (semeadura em solo seco). Neste caso, o calcário é recomendado caso o pH em água seja inferior a 5,5 em dose suficiente para elevação do pH até esse valor, de forma a eliminar os efeitos deletérios da acidez (especialmente Al tóxico) enquanto as plantas ainda não se beneficiam da “autocalagem” do solo. No caso da semeadura no sistema pré-germinado, em que as plantas se estabelecem em um solo já alagado, não há recomendação da calagem para elevação do pH, exceto para o fornecimento de Ca e Mg quando a saturação por bases (V%) for $< 40\%$. Para maiores detalhes sobre a recomendação da calagem para arroz irrigado, consulte SOSBAI (2018).

Tendo em vista que os sistemas de cultivo de arroz, mesmo naqueles considerados conservacionistas, preconizam o revolvimento do solo em algum momento, a aplicação de calcário deve ser realizada de modo incorporado, aproveitando as operações de mobilização do solo. Nos casos de arroz irrigado em rotação de culturas com espécies de sequeiro, a calagem deve ser utilizada considerando as recomendações para as espécies mais sensíveis, o que pode implicar na elevação do pH até 6,0.

4.2 - Adubação fosfatada e potássica

A disponibilidade natural de P é baixa na maioria dos solos do Brasil, incluindo as regiões Sul e o Cerrado. Os solos argilosos dessas regiões, em geral, são ricos em óxidos com alta capacidade de adsorção de P, e que retêm esse nutriente em formas menos disponíveis às plantas (Fink et al., 2016). A adsorção desse nutriente pelos óxidos é acentuada pela acidez do solo, logo, a correção de P e da acidez são práticas relevantes para a produção vegetal adequada, em qualquer sistema de manejo de solo (Figura 2).

Os teores elevados de óxidos com alta capacidade de adsorção de P, juntamente com a acidez acentuada, dos solos argilosos do Sul e do Cerrado do Brasil, dificultam a correção da disponibilidade desse nutriente, como ilustram os resultados da Tabela 4 para amostras de lavouras com vários anos de SPD. Conforme indicam os resultados dessa tabela, um percentual expressivo de amostras tem teores não corrigidos desse nutriente. As amostras de solos do Planalto do RS, utilizadas para os dados dessa tabe-

la, ainda foram analisadas na camada de 10-20 cm, constatando-se que cerca de 60% das amostras ainda têm teores de P não corrigidos nessa camada (dados não apresentados).

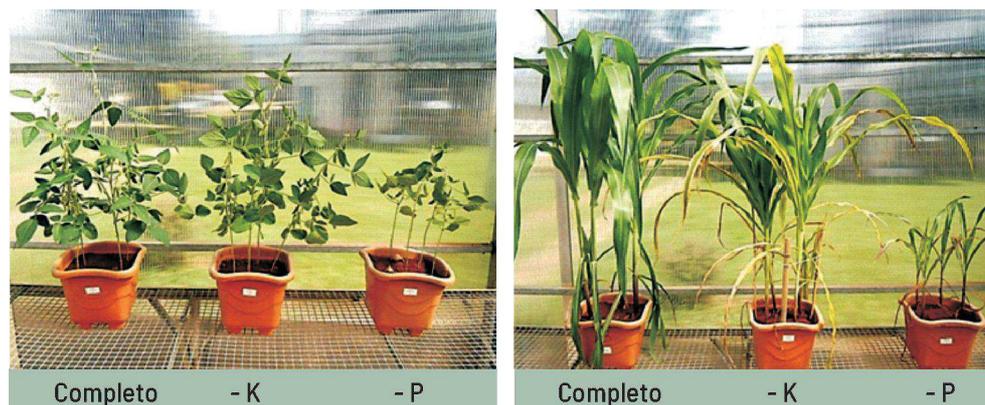


Figura 2. Desenvolvimento das culturas de soja e de milho em primeiro cultivo num latossolo argiloso, típico de Cerrado, submetido a tratamentos com correção da acidez e adubação com macro e micronutrientes (Completo), com omissão do fornecimento de potássio (-K) e com omissão de fósforo (-P). Fotos: Álvaro Resende.

A baixa disponibilidade de P do solo, comum em lavouras manejadas com o SPD, pode ser identificada com a análise de solo. Com essa ferramenta de diagnóstico, pode-se avaliar a necessidade e a quantidade de fertilizante fosfatado, indicadas para as culturas agrícolas em solos sob SPD, consultando as recomendações de adubação regionais (Sousa e Lobato, 2004; Fontoura et al., 2015; NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBCS, 2016).

Em solos argilosos e ácidos, adubados pela primeira vez com fertilizantes fosfatados, a eficiência de uso desses fertilizantes é baixa, variando entre 20 a 30%, mesmo com a correção da acidez e aplicando quantidades elevadas de fosfato e que superam a quantidade absorvida pelas plantas. Assim, em áreas novas de implantação do SPD, ou em solos com baixos teores de P sob esse sistema de manejo, a correção dos teores desse nutriente nas recomendações de adubação do Sul e do Cerrado do Brasil (Sousa e Lobato, 2004; Fontoura et al., 2015; NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBCS, 2016) prevê a aplicação de doses elevadas de P.

Tal qual o calcário, a mobilidade de P no solo é muito baixa e, em solos argilosos e ácidos, é importante corrigir a acidez e os teores desse nutriente quando da implantação do SPD, incorporando o calcário e o fertilizante fosfatado antes de se iniciarem os cultivos (Sousa e Lobato, 2004; NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBCS, 2016). Contudo, a dose de P aplicada na camada arável deve ser adequada conforme a capacidade de adsorção do solo, pois a homogeneização do fertilizante fosfatado e da MO nessa camada ocasiona maior adsorção desse nutriente (Nunes et al., 2011).

Em SPD consolidado, o fertilizante fosfatado seja na forma de fertilizante simples ou na forma de formulação NPK, deve ser aplicado na linha semeadura, distribuídos cerca de 2,5 a 5 cm ao lado e abaixo da semente, em solos com o teor de P não corrigidos (Classes de disponibilidade Muito Baixa, Baixa e Média). Em áreas com cultivos

de verão e de inverno, a aplicação de P na semeadura de inverno possibilita distribuir melhor o fertilizante fosfatado em linhas de menor espaçamento (ex: cultivo de trigo), diluindo-o no solo, com menores riscos de perda por escoamento.

A dinâmica do K no solo também é alterada com a adoção do SPD, intensificando a estratificação desse nutriente no perfil do solo, que acumula mais na camada superficial, seja devido à reciclagem pela palhada e deposição superficial ou pela adubação. Além disso, o manejo em SPD favorece o incremento de MO do solo e da CTC, o que pode influenciar o tamponamento de K, podendo ser necessário maiores teores de K trocável no solo para um adequado suprimento às culturas.

4.2.1 - Solos do Cerrado

Como representado na Figura 1, uma vez corrigida a acidez, a disponibilidade de P é o fator que mais restringe o desenvolvimento e produtividade das culturas nos solos de Cerrado, enquanto a disponibilidade de K geralmente pode ser considerada uma limitação de segundo momento, na fase de abertura de área (Figura 2), haja vista que as reservas naturais desse nutriente podem suprir parte da demanda dos primeiros cultivos. Assim, as respostas iniciais à adubação potássica são menos comuns ou de menor magnitude que as obtidas para a calagem e a fosfatagem (Lopes e Guilherme, 2016). Entretanto, práticas de construção da fertilidade do solo com fosfatagem e potassagem corretivas são requeridas no estabelecimento do SPD, sobretudo para cultivos intensivos e visando alta produtividade.

A fosfatagem corretiva é essencial nos solos de Cerrado para elevar a disponibilidade de P à níveis que viabilizem o desenvolvimento normal das culturas, gerando um efeito residual de P no solo, que, complementado pelas adubações de manutenção ao longo do tempo, garante o suprimento conforme a demanda do sistema de produção. A fosfatagem corretiva pode ser realizada com uma única aplicação de fertilizante, dimensionada buscando alcançar, de imediato, teor no solo interpretado como adequado, mas envolve custos relativamente mais elevados. Outra opção é realizar essa correção de forma gradual, aplicando-se doses de P um pouco acima das requeridas para manutenção das culturas nos cinco primeiros cultivos (Sousa et al., 2004).

O mesmo raciocínio se aplica à potassagem corretiva, porém, com o diferencial de que essa prática não se justifica para solos mais arenosos ($CTC < 4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), condição em que há maior potencial de perdas de K por lixiviação (Vilela et al., 2004). Devido à dinâmica mais simples, com menor retenção à fase sólida do solo e alta mobilidade, a difusão de K é maior, favorecendo sua homogeneização vertical e horizontal. Comparativamente ao P, a disponibilidade de K no solo pode aumentar rapidamente com as adubações ou baixar devido à absorção pelas culturas. Por essas razões, a potassagem corretiva é uma medida menos crítica e adotada com menor frequência.

Na Tabela 7 são apresentados valores de referência de disponibilidade de P e K, conforme a textura dos solos de Cerrado, bem como de outros atributos, para subsidiar o monitoramento da fertilidade visando estabelecer ambientes de alto potencial produtivo e viabilizar cultivos intensivos. Em geral, esses níveis de fertilidade são suficientes para sustentar safras com um custo otimizado das adubações de manutenção. Níveis mais elevados de P e K podem ser constituídos, dependendo de características texturais e mineralógicas do solo e de condições climáticas, de sub-regiões do Cerrado. Entretanto, essa possibilidade deve ser encarada como uma meta criteriosa, podendo ser interessante quando se trata de áreas próprias, mas pouco conveniente para situações de arrendamento de curto prazo.

Tabela 7. Indicadores de atributos químicos em solos da região do Cerrado, na camada de 0 a 20 cm, acima dos quais admite-se a condição de fertilidade construída.

Argila	MO	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Mn	Zn	V
g kg ⁻¹	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³		mg dm ⁻³					%
≤ 150	10	25	40	2,4	1,0	9	0,5	0,8	5,0	1,6	50
160 a 350	20	20									
360 a 600	30	12	80								
> 600	35	6									

P, K, Cu, Mn e Zn determinados com o extrator Mehlich-1. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂ e interpretação considerando a média dos valores obtidos em amostras coletadas nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm. Teor de B determinado por extração com água quente, com interpretação considerando o valor do pH(água) do solo próximo de 6,0.
 Fonte: Adaptado de Sousa e Lobato(2004) e Benites et al. (2010).

Quando as análises de solo apresentam disponibilidade de P e K próxima ou acima dos teores indicados na Tabela 7, as doses a aplicar nas adubações periódicas passam a depender basicamente da exigência das culturas e da expectativa de produtividade. Ou seja, a atenção no dimensionamento deve se voltar principalmente à planta, uma vez que o solo já atua como fonte e não mais dreno desses nutrientes. Nessa condição de fertilidade também passa a haver maior flexibilidade quanto ao modo de aplicação, no sulco ou a lanço, e à época, antecipada ou em cobertura, conforme interesses técnicos ou operacionais. Essas escolhas podem, ainda, estar atreladas à adoção da adubação de sistema, cujo adequado planejamento leva a ganhos de eficiência no uso de fertilizantes (Resende et al., 2016). Dependendo do objetivo, a adubação de sistemas com P e K pode ser feita direcionando às culturas mais exigentes/responsivas ou àquelas com maior capacidade de absorção/ciclagem.

A cultura da soja apresenta maior plasticidade sob diferentes níveis de disponibilidade de P e K, de modo que se mostra menos responsiva à adubação em solos de fertilidade construída, comparativamente aos cereais de inverno, milho, algodão e feijão. Sendo assim, na adubação de sistema, a eficiência de uso de fertilizantes seria maior se a aplicação de P e K fosse feita preferencialmente nessas últimas culturas (Fontoura et al., 2015; Vieira et al., 2015, 2016; De Bona et al., 2016; Resende e Giehl, 2021). Todavia, apesar dessas evidências técnicas, na prática, as adubações com P e K têm sido voltadas à soja, provavelmente por razões de conveniência e rendimento operacional nas fazendas do Cerrado.

Um ponto importante do manejo da adubação fosfatada no Cerrado se refere à ampla utilização da aplicação à lanço em superfície no SPD e seus reflexos na estratificação acentuada da disponibilidade no perfil, devido à baixa e lenta mobilidade do P nos solos argilosos, situação não verificada com a mesma magnitude para o K aplicado a lanço. Nesse contexto, ganha importância o SPD com maior diversificação, cuja escolha de espécies deveria levar em conta também a capacidade de ciclagem e mobilização de nutrientes no perfil. A braquiária tem beneficiado a fertilidade do solo no SPD ao promover a incorporação biológica e aumento da disponibilidade de P até abaixo de 20 cm no perfil (Crusciol et al., 2015). Em relação à eficiência da adubação

potássica, a braquiária atua no sentido inverso, recuperando o K lixiviado em profundidade no perfil e recolocando-o, por reciclagem, em circulação na camada superficial do solo, ao alcance das raízes das culturas principais do sistema (Ferreira et al., 2022).

4.2.2 - Terras Altas do Sul do Brasil

Embora em solos de baixa fertilidade sempre seja preferível aplicar os fertilizantes fosfatados na linha de semeadura, em solos com fertilidade corrigida, ou seja, aqueles em que os valores dos atributos químicos são iguais ou maiores aos apresentados nas Tabelas 8 e 9, não há expectativa de diferenças no rendimento de grãos entre as formas de aplicação na linha de semeadura ou a lanço. Nessa condição de fertilidade, a resposta da planta é atendida pela disponibilidade do nutriente no solo e a adubação visa apenas repor o que é exportado pela produção (NRS/SBCS, 2016). Esta tem sido a razão de muitos agricultores estarem optando pela aplicação superficial de fertilizantes no SPD, sobretudo os potássicos.

Entretanto, em solos argilosos com fertilidade construída, a aplicação a lanço, realizada por muitos anos, pode aumentar a estratificação de P no perfil do solo, concentrando esse nutriente na superfície (0-5 cm), e diminuindo o teor de P nas camadas mais profundas. A alta concentração de nutrientes na superfície e o forte contraste com as camadas subsuperficiais podem desfavorecer o aprofundamento radicular das plantas. Além disso, mesmo em relevo mais plano, a adubação fosfatada em superfície predispõe o arraste de adubo ou de partículas de solo enriquecidas em P por processos erosivos (erosão laminar), com potencial risco de contaminação de mananciais de água levando à eutrofização. Embora essa problemática ainda não esteja bem caracterizada no Brasil, há preocupações crescentes acerca de seu impacto na sustentabilidade futura dos sistemas de produção e do meio ambiente rural (Denardin et al., 2008; Prochnow et al., 2018). Assim, mesmo quando a disponibilidade do nutriente no solo seja alta e o modo de aplicação não afete a produtividade, sempre que possível, é melhor intercalar a forma de aplicação do fertilizante entre a lanço e na linha, ao longo do tempo e em culturas com diferentes espaçamentos entre linhas.

Em solos com os teores de P corrigidos, isto é, em que a disponibilidade desse nutriente corresponde à classe Alta ou Muito Alta, a eficiência da adubação fosfatada é maior do que a verificada em solos não corrigidos, variando entre 60 a 90%. Nessa condição, as quantidades indicadas para a adubação são menores, pois incluem as doses de manutenção na classe de P Alto, ou de reposição e até menos, na classe de disponibilidade Muito Alta (Sousa e Lobato, 2004; NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBCS, 2016). A reposição consiste em aplicar as quantidades exportadas pelos cultivos (Tabela 1), pois os teores de P do solo são no mínimo duas vezes maiores do que o teor crítico, estando em uma disponibilidade tal que permite atingir o teto produtivo das culturas agrícolas.

Tabela 8. Indicadores de atributos químicos em solos dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, na camada de 0 a 10 cm, acima dos quais admite-se a condição de fertilidade construída, para o cultivo de grãos.

MO	Argila	P	CTC pH 7,0	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Mn	Zn	V**
g dm ⁻³	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³		mg dm ⁻³					%
25	≤ 200	30	≤ 7,5	60								
50	210 a 400	18	7,6 a 15,0	90	4,0	1,0	10	0,30	0,40	5,0	0,50	75
> 50	410 a 600	12	15,1 a 30,0	120								
–	> 600	9	> 30,0	135								

P, K, Cu, Mn e Zn determinados com o extrator Mehlich-1. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂. Teor de B determinado por extração com água quente.
Fonte: Adaptado de NRS/SBCS (2016).

Tabela 9. Indicadores de atributos químicos em solos do Estado do Paraná, na camada de 0 a 20 cm, acima dos quais admite-se a condição de fertilidade construída, para o cultivo de grãos.

Argila	MO	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Mn	Zn	V
g dm ⁻³	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³					%
≤ 250		18									
250 a 400	24	12	0,21	2,0	1,0	3	0,3	0,8	30	1,2	50
> 400		9									

P, K, Cu, Mn e Zn determinados com o extrator Mehlich⁻¹. Teores de P e K determinados com o extrator Mehlich⁻¹. Teor de S determinado por extração com Ca(H₂PO₄)₂. Teor de B determinado por extração com cloreto de bário em água quente e teores de Cu, Mn e Zn determinados usando o extrator Mehlich⁻¹.
Fonte: Adaptado de NEPAR/SBCS (2017).

Além da disponibilidade de P e da acidez, a eficiência da adubação fosfatada, em solos sob SPD, pode variar com outros fatores, como a cultura e a cultivar. Em geral, a eficiência dessa adubação é baixa nas culturas de algodão e do feijoeiro (18 a 40%), aumentando para média (45 a 60%) nas culturas de soja, trigo e arroz e é considerada alta na cultura de milho (60 a 90%) (Pavinato et al., 2021). Sempre que possível, esse aspecto deve ser considerado, pois doses excessivas de fertilizante fosfatado diminuem a eficiência da adubação e, conseqüentemente, a eficiência econômica dos cultivos. Nesse sentido, deve-se evitar a aplicação da mesma dose e do mesmo tipo de formulação NPK, em desacordo com os resultados da análise de solo. Outro aspecto importante e que compromete a eficiência da adubação fosfatada é a ausência de rotação de culturas, como ocorre no sistema de produção soja-pousio (Sousa et al., 2010; Pavinato et al., 2017).

As modificações na disponibilidade dos nutrientes no solo decorrentes do manejo em SPD e o aumento da produtividade de grãos das culturas, de modo geral, demandam um manejo da fertilidade do solo diferenciado. Exemplo disso foi a calibração da adubação potássica na região Centro-Sul do estado do Paraná, cuja filosofia de adubação adotada para esse nutriente foi a de correção e manutenção da fertilidade (Fontoura et al., 2015). Dessa forma, em solos com disponibilidade Baixa e Média, a

adubação indicada foi obtida pela dose de K necessária para elevar o teor de K no solo ao teor crítico, acrescido da exportação de K via grãos, enquanto em solos com disponibilidade Alta e Muito Alta a indicação de adubação se baseou na manutenção e reposição do nutriente exportado (20 kg de K_2O por tonelada de grãos de soja e 6,0 kg de K_2O por tonelada de grãos de milho, trigo e cevada).

4.2.3 - Terras Baixas do Sul do Brasil

O cultivo de arroz irrigado apresenta uma particularidade importante em relação ao manejo do P, independente do sistema de manejo de solo empregado. As reações de redução do solo, mencionadas no item 4.1.3 para justificar as particularidades do manejo da acidez, também afetam a disponibilidade de P no solo. A redução dos compostos férricos da fase sólida do solo é acompanhada da liberação do P adsorvido, aumentando sua concentração na solução do solo. Isso implica em não utilização da textura do solo para interpretação do resultado do P extraído pelo método Mehlich-1 e no fato de que baixos teores no solo já representam uma adequada disponibilidade do nutriente (NRS/SBCS, 2016; SOSBAI, 2018).

A adubação com P e K no arroz irrigado também não segue a lógica das doses de correção e/ou de manutenção adotada para os cultivos em terras altas, já que a recomendação é baseada em doses ajustadas para expectativa de resposta das plantas à adubação. Cabe salientar que esse tipo de manejo foi desenvolvido para áreas que tradicionalmente são cultivadas apenas com arroz no verão e que, quando da adoção da rotação de culturas com espécies de sequeiro, essas não serão beneficiadas com o aumento da disponibilidade provocados pelo alagamento no cultivo do arroz e podem requerer um manejo mais apropriado da adubação que integre a realidade desse cenário (Scvittaro et al., 2017).

Já o impacto da adubação com K em lavouras de arroz com rotação de culturas de sequeiro é bem menor, em comparação com o P, pois as doses aplicadas são geralmente próximas ou um pouco superiores à exportação desse nutriente pelos grãos. Como ambos os nutrientes são recomendados em função da expectativa de resposta da cultura, a aplicação de P e de K é efetuada na linha de semeadura da cultura, em cultivos com semeadura em solo seco. Preferencialmente, fontes solúveis desses nutrientes devem ser aplicadas, já que o aumento natural do pH pode desfavorecer fontes pouco solúveis, como os fosfatos naturais (Gonçalves et al., 2008).

4.3 - Adubação nitrogenada

O N se caracteriza pela dinâmica instável no solo e difícil previsibilidade de sua disponibilidade às culturas, pelo fato de estar sujeito à diversas transformações de suas formas orgânicas e minerais, na maioria das vezes mediadas pela atuação de determinados grupos de microrganismos. Trata-se de diferentes processos que não serão aqui detalhados, mas que sofrem influência da atividade microbiana no solo e de condições climáticas, afetando o suprimento de N ao longo do ciclo das culturas e o potencial de perdas do sistema. Assim, pode-se esperar alta variabilidade espacial e temporal da disponibilidade de N no solo, o que interfere nas respostas à adubação nitrogenada.

Com relação ao SPD, vale destacar os processos microbianos de imobilização e mineralização do N que, em última instância representam, respectivamente, indisponibilização temporária e liberação de formas absorvidas pelas plantas. O balanço

entre imobilização e mineralização depende, basicamente, da relação C/N dos restos culturais presentes no solo (palhada). De modo geral, os resíduos de gramíneas, por apresentarem relação C/N mais elevada, predispõem à imobilização, enquanto a mineralização é favorecida pelo aporte de resíduos de leguminosas, que têm baixa relação C/N. Portanto, a alternância/cominação de diferentes tipos de palhadas tem impactos quantitativos no suprimento de N aos cultivos posteriores e, consequentemente, no dimensionamento da adubação nitrogenada.

4.3.1 - Solos do Cerrado

Na região do Cerrado, o clima tropical normalmente condiciona níveis de MO no solo inferiores aos observados na região Sul (Tabelas 8 e 9), limitando fortemente a oferta de N no sistema solo-planta, de modo que o fornecimento via adubação constitui um dos fatores mais críticos à produção agrícola (Figura 1). À exceção da soja, a adubação nitrogenada é requerida para todas as demais culturas, a fim de garantir produção satisfatória, em especial, do milho e do algodão, que apresentam maior exigência. O menor número de opções e a falta de tradição no uso de espécies leguminosas para compor os sistemas de produção são agravantes para um balanço equilibrado de N no SPD no Cerrado. Nesse contexto, embora existam iniciativas de se considerar créditos de N da MO e da palhada de culturas antecessoras para ponderar o potencial de resposta à adubação nitrogenada, as recomendações vigentes ainda são um tanto generalistas.

O cenário atual da agricultura no Cerrado denota um SPD pouco diversificado, em que, na maioria das vezes, os produtores não cumprem a premissa da rotação de culturas. A combinação do cultivo de soja no verão sucedida pelo milho segunda safra representa o sistema modal. A resposta à adubação nitrogenada pelo milho segunda safra é bem menos intensa do que a observada quando o cereal é cultivado na safra principal, devido às seguintes particularidades: 1) na segunda safra, o milho se beneficia dos créditos de N derivados da decomposição da palhada de soja recém-colhida e 2) o potencial de rendimento de grãos de milho é menor na segunda safra, sobretudo em semeadura mais tardia, devido às condições climáticas de temperatura e precipitação pluviométrica menos favoráveis, em que o final do período das chuvas limita a produtividade, além da ocorrência de geadas em algumas áreas específicas. A inconstância climática também afeta a ciclagem de N, que é restringida pela menor temperatura e baixa umidade no solo, que, por sua vez, reduz o risco de lixiviação de nitrato, com consequente aumento do potencial de recuperação do N-fertilizante pelo milho. Essa conjuntura impõe respostas variáveis ao fornecimento de N entre lavou- ras e anos de cultivo do milho segunda safra, o que dificulta uma uniformização das indicações de adubação nitrogenada, principalmente levando-se em conta o retorno econômico.

Em geral, os trabalhos de pesquisa no Cerrado têm evidenciado ganhos de produtividade do milho segunda safra com a aplicação de doses moderadas de N; porém, sem apresentar padrões constantes entre locais e anos de cultivo (Ragagnin et al., 2010; Soratto et al., 2010; Gott et al., 2014; Sichoeki et al., 2014; Simão et al., 2018 e 2020). São recomendáveis adubações até o estágio V5 (cinco folhas expandidas), após o qual há menor probabilidade de resposta e aumento do risco de o déficit hídrico comprometer o aproveitamento do fertilizante aplicado em cobertura (Duarte et al., 2017). Também por esses motivos, o parcelamento do fornecimento de N em mais de uma aplicação em cobertura não seria aconselhável. Por outro lado, segundo esses

autores, a omissão de N na semeadura diminui a eficiência da adubação nitrogenada e o potencial produtivo da cultura, sendo indicado aplicar cerca de 40 kg ha⁻¹ de N naquele momento. A importância desse procedimento é realçada pelo fato de, em determinadas condições, a adubação nitrogenada na semeadura reduzir ou mesmo anular o efeito da adubação de cobertura no milho segunda safra (Simão et al., 2020).

Por muito tempo, a partir da década de 1980 até meados dos anos 2000, a produtividade na segunda safra permaneceu em patamares reduzidos, razão pela qual o cultivo após soja era chamado de milho “safrinha”, cuja nutrição dependia do residual de adubações com P e K na soja e de um mínimo investimento em N. O sistema soja-milho segunda safra foi sendo aperfeiçoado, sobretudo com o advento de novas cultivares de soja precoce e de cultivares de milho desenvolvidas especialmente para essa época de cultivo. Os tetos de produtividade atualmente obtidos são bem mais elevados, superando 180 sc ha⁻¹ em sub-regiões com maior aptidão edafoclimática dentro do bioma Cerrado. Não obstante, muitos produtores ainda subestimam a importância da adubação nitrogenada em níveis coerentes com as produtividades alcançadas.

Avaliações de curto prazo demonstram que a produtividade do milho segunda safra sem nenhum aporte de N via fertilizante pode ser relativamente alta, da ordem de 6 t ha⁻¹ ou mais (Simão et al., 2020). Mas, considerando uma taxa média de exportação de N nos grãos de cerca de 14 kg t⁻¹ (Tabela 1), seriam necessários 84 kg ha⁻¹ de N somente para compensar a quantidade removida quando se colhem 6 t ou 100 sc ha⁻¹. Na prática, verifica-se que nem sempre o N é fornecido nessa proporção pelos produtores. Além disso, é preciso levar em conta que a eficiência de recuperação de fertilizantes nitrogenados pelo milho não é elevada e varia largamente, com um valor médio de 63% em condições experimentais (Dobermann, 2005).

No trabalho de Simão et al. (2020), foi avaliada a resposta a N, em seis ambientes (combinação de três locais, em GO, MT e RO, e duas épocas de semeadura), em ano com boas condições climáticas, e foram obtidas produtividades de 6,5 a 9,9 t ha⁻¹. Os autores reportaram que, em média, a adubação com doses ao redor de 90 kg de N ha⁻¹ (na forma de ureia) permitiu conciliar ganhos de rendimento e viabilidade econômica, além de contribuir para melhor equilíbrio do balanço de N no sistema soja/milho segunda safra. Nesse sentido, pode-se considerar que aportes dessa ordem de grandeza constituem um nível de base de recomendações de adubação nitrogenada para o milho segunda safra, indicador de quantidade mínima a ser fornecida visando conservar a MO e a própria sustentabilidade dos sistemas de produção em longo prazo no Cerrado.

4.3.2 - Terras Altas do Sul do Brasil

O N é um dos nutrientes demandados em maior quantidade pelas gramíneas, como o milho e os cereais de inverno, e o seu suprimento adequado tem implicações técnicas quanto ao desempenho e à lucratividade, e ambientais, pelo alto potencial de lixiviação do nitrato (NO₃⁻) e volatilização da amônia (NH₃) e do óxido nitroso (N₂O). Do ponto de vista econômico, a dose de N a aplicar é, para muitos, a decisão mais importante no manejo do fertilizante. No entanto, grande parte da eficiência do adubo nitrogenado depende do seu manejo adequado quanto à época e parcelamento da aplicação, fonte de N utilizada, ajuste à população de plantas, aspectos econômicos e operacionais, além de fatores climáticos. Isso enfatiza a questão de que as indicações referentes à adubação nitrogenada devem ser cada vez mais específicas e não generalizadas.

O N é o nutriente que merece maior atenção quanto à época de aplicação por ser, na maioria das culturas, o elemento acumulado em maior quantidade e por apresentar-se predominantemente na forma de nitrato no solo, suscetível à lixiviação, que o difere dos demais nutrientes. Dessa forma, manejar a adubação nitrogenada quanto ao parcelamento de doses significa compatibilizar o suprimento do nutriente com períodos de maior demanda da cultura (Fontoura et al., 2015).

Com a adoção do SPD e culturas de cobertura no Sul do Brasil, criou-se a necessidade de adaptar a recomendação da adubação nitrogenada a esse novo cenário agrícola. Nesse sentido, as indicações mais recentes têm considerado, além do teor de MO do solo, a inclusão das culturas antecessoras, que afetam a disponibilidade de N, e o potencial de rendimento esperado (NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBCS, 2016; Fontoura et al., 2015). Diante desse novo cenário e de tetos produtivos mais elevados, pode-se verificar, a título de exemplo na Tabela 10, que as doses de N a serem aplicadas na cultura do milho na região Centro-Sul do Paraná podem variar amplamente e chegar a 380 kg N ha⁻¹ (Fontoura et al., 2015). Essa recomendação foi validada comparando-se as doses da tabela com as doses de máxima eficiência econômica (DMEE), obtidas ao longo de 13 anos de pesquisa de N em milho, calculadas para 20 situações distintas de solo, cultura antecessora e dose de N indicada na região (Figura 3a).

Outro respaldo importante ao sistema de indicação de N proposto para a adubação nitrogenada no PR foi o bom ajuste que as doses indicadas para a região Centro-Sul desse estado apresentaram, em relação às doses indicadas para o RS e SC ($R^2 = 0,88$, $p = 0,02$; Figura 3b), em condições similares de teor de MO do solo, cultura antecessora e expectativa de rendimento (Amado et al., 2002; CQFS-RS/SC, 2004). Essa concordância é muito importante, pois valida a utilização dessa indicação, a qual é ajustada para faixas elevadas de produtividade, para sub-regiões do RS e de SC com alto potencial de rendimento do milho. Por outro lado, a indicação do RS e SC, a qual contempla expectativas mais baixas de rendimento, também é válida para ser utilizada em sub-regiões do PR em que os rendimentos do milho estejam em faixas mais baixas do que as verificadas no estudo de Fontoura et al. (2015). Portanto, a análise conjunta da indicação apresentada para o Centro-Sul do PR e da indicação em vigor para os estados do RS e SC demonstra o caráter complementar que pode ser adotado no uso dessas indicações, equacionando praticamente a indicação de N para milho na região Sul do Brasil (Fontoura e Bayer, 2009).

Um ponto importante a salientar é que a obtenção dessas altas produtividades não está condicionada exclusivamente à dose de N aplicada, mas a um conjunto de práticas agrícolas adequadas (SPD bem manejado, rotação de culturas, fertilidade do solo corrigida, etc), além de condições climáticas que permitam a cultura expressar seu potencial.

Tabela 10. Dose de nitrogênio (N) indicada para cultura do milho no sistema plantio direto para a região Centro-Sul do Paraná.

Cultura antecedente e teor de MO, g dm ⁻³	Expectativa de rendimento de grãos, t ha ⁻¹				
	6-8	8,1-10	10,1-12	12,1-14	14,1-16
..... N, kg ha ⁻¹					
Gramíneas					
< 40	100	150	220	300	380
41 - 60	60	110	180	260	340
> 60	≤40	70	140	220	300
Consórcio gramínea-leguminosa e nabo forrageiro					
< 40	60	110	180	260	340
41 - 60	≤40	60	130	210	300
> 60	≤40	≤40	90	180	260
Leguminosas					
< 40	≤40	60	130	210	290
41 - 60	≤40	≤40	80	160	250
> 60	≤40	≤40	40	130	210

* Teor de MO do solo na camada de 0-20 cm; ** < 40 kg ha⁻¹ corresponde à indicação de N a ser realizada na semeadura do milho; *** Aplicar 20 kg ha⁻¹ de N a menos em situações em que a pré-cultura gramínea apresenta baixa produção de biomassa (< 2 t ha⁻¹). Em situações em que as pré-culturas do consórcio gramínea-leguminosa/nabo ou leguminosa solteira apresentarem baixa produção de biomassa, aplicar doses de N 20 e 40 kg ha⁻¹ maiores às indicadas no quadro acima, respectivamente.

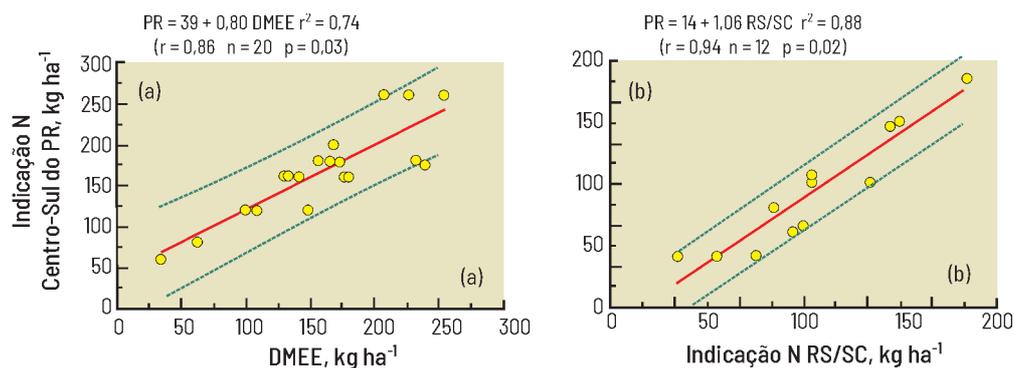


Figura 3. Relação entre as doses de máxima eficiência econômica (DME) de nitrogênio (N) e as doses indicadas na Tabela 10 (a), e entre a indicação de doses desse nutriente no RS/SC e a na região Centro-Sul do PR, em condições similares de solo, cultura antecessora e faixa de rendimento (b). As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95 % da equação ajustada.

Para os cereais de inverno, a combinação dos diferentes fatores que influenciam no suprimento e demanda de N pelas culturas resultam em doses que variam de 30 a 150 kg N ha⁻¹ para trigo, cultivado após a cultura da soja; e de 30 a 170 kg N ha⁻¹ quando o trigo é cultivado após a cultura de milho. A título de exemplo, para rendimentos de grãos de trigo entre 4,5 e 5,5 t ha⁻¹, a quantidade de N a ser aplicada varia de 50 a 110 kg N ha⁻¹, quando cultivado pós-soja; e de 70 a 130 kg N ha⁻¹, quando cultivado pós-milho. Da dose indicada para os cereais de inverno, sugere-se a aplicação de 30 kg ha⁻¹ de N em semeadura. O restante da dose deve ser aplicado em cobertura, entre os estádios de perfilhamento e alongação, correspondendo, em geral, à presença de 4 a 6 folhas no colmo principal. Maiores informações acerca do manejo da adubação nitrogenada em cereais de inverno podem ser obtidas em Fontoura et al. (2013), publicação que contempla uma grande amplitude de resultados experimentais obtidos em regiões do PR; ou em NRS/SBCS (2016), publicação que contempla os resultados de cultivos no RS e em SC.

4.3.3 - Terras baixas do Sul do Brasil

A adubação nitrogenada em arroz irrigado segue os mesmos princípios da adubação de outras gramíneas, com o uso da MO como indicador da disponibilidade de N no solo e uma dose ajustada também à expectativa de resposta da cultura à adubação. Ao longo do tempo, as recomendações de N aumentaram em função da evolução do potencial produtivo das variedades e da adoção de práticas de manejo mais adequadas (podem atingir 150 kg de N ha⁻¹) e apresentam algumas particularidades em função do manejo adotado (SOSBAI, 2018). Em relação ao século passado, a adubação com N na semeadura aumentou de 10 para 20 kg ha⁻¹ para os sistemas de semeadura em solo seco com a presença de resíduos culturais.

Como o ciclo do N é bastante afetado pelo alagamento do solo e a flutuação das condições aeróbicas e anaeróbicas, a adubação nitrogenada é preconizada com no mínimo duas aplicações em cobertura, sendo a maior proporção da dose para a primeira cobertura em solo seco imediatamente antes da entrada da água de irrigação (exceto no sistema pré-germinado), diminuindo as perdas com a volatilização da amônia. Como consequência do alagamento, fontes nítricas não são recomendadas ao arroz irrigado devido às perdas de N por desnitrificação. Atualmente, a introdução de outras espécies em rotação com o arroz, especialmente a soja no verão, mas também leguminosas de inverno, representa um aporte de resíduos com N incorporado pela FBN, o que potencializa o papel da MO do solo no suprimento de N às plantas de arroz ao longo do tempo.

4.4 - Adubação com enxofre e micronutrientes

4.4.1 - Solos do Cerrado

O cultivo em solos de Cerrado requer aplicações de S de modo tão mais frequente quanto mais intensivo for o sistema de produção. Os solos argilosos podem formar reservas substanciais de S, derivadas do efeito residual prolongado de adubações com fertilizantes contendo o nutriente ou da aplicação de gesso para o controle da acidez do solo. A gessagem normalmente supre quantidades de S muito superiores à demanda das culturas e este tende a se acumular em subsuperfície no perfil. Assim, essa prática gera um efeito residual que perdura por vários anos e dispensa adubação es-

pecífica com S. Todavia, os custos atuais de aquisição do gesso agrícola são maiores aos de décadas atrás, de modo que sua utilização tem sido inibida em sub-regiões do Cerrado que dependem de fretes de longa distância em relação às fábricas de fertilizantes fosfatados que geram o gesso como coproduto. Nesses casos, a opção por fontes de N e P que contém S pode ser vantajosa.

A análise de solo deve ser o balizador da decisão de se fornecer ou não esse nutriente. A interpretação é feita considerando a média dos teores obtidos em amostras coletadas nas camadas de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, utilizando extração com $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. O teor de 9 mg dm^{-3} na média dessas camadas representa o nível crítico de S para solos de Cerrado (Tabela 7) e pode-se considerar um fornecimento de 15 kg ha^{-1} de S a cada cultivo. Rein e Sousa (2004) sugeriram a seguinte fórmula de cálculo da recomendação de S para culturas anuais, com base no teor médio do nutriente na profundidade de 0-40 cm: Dose de S (kg ha^{-1}) = $40 - (\text{teor médio de S no solo} \times 4)$.

Com relação aos micronutrientes, os solos de Cerrado tipicamente apresentam baixa disponibilidade natural, com destaque para as deficiências de B e Zn, que estão entre os principais fatores limitantes da produtividade em áreas novas abertas para a agricultura. Nas décadas de 1980 e 1990, uma série de experimentos conduzidos na Embrapa Cerrados, pelo pesquisador Enéas Galvão, formou a base de interpretação e recomendação de micronutrientes, em uso até os dias de hoje. Na Tabela 7 constam os teores de B, Cu, Mn e Zn considerados níveis críticos na análise da camada de 0-20 cm do solo. Em solos deficientes, são indicadas adubações corretivas com 2 kg ha^{-1} de B, 2 kg ha^{-1} de Cu, 6 kg ha^{-1} de Mn e 6 kg ha^{-1} de Zn, com reaplicação a cada quatro anos ou em intervalo menor para sistemas mais intensivos. No tratamento de sementes, é oportuno incluir os micronutrientes Cobalto e Molibidênio, especialmente no caso de culturas leguminosas.

Devido às pequenas quantidades requeridas/aplicadas e às reações dos micronutrientes no solo, há grande variabilidade espacial e temporal na sua disponibilidade. Assim, visando alta produtividade no Cerrado, adubações foliares são opções complementares de fornecimento e vários resultados de pesquisa relatam benefícios de pulverizações com formulações multinutrientes durante a fase vegetativa, promovendo uniformização nas lavouras e maior rendimento de grãos.

4.4.2 - Terras Altas do Sul do Brasil

Em solos do Sul do Brasil, com baixos teores de enxofre (S) extraído com fosfato de Ca ($S < 10 \text{ mg dm}^{-3}$, no RS e $S < 3 \text{ mg dm}^{-3}$, no PR; na camada de 0-20 cm), a aplicação de gesso pode aumentar o rendimento das culturas, mesmo em condição de baixa acidez em subsuperfície (NEPAR/SBCS, 2019; NRS/SBSC, 2016). Nessa situação, doses baixas de gesso (140 a 170 kg ha^{-1}), ou cerca de 25 kg S ha^{-1} , são suficientes para corrigir o teor desse nutriente em solos manejados com o SPD, independente se a cultura é gramínea ou leguminosa (Pias et al., 2020). Também há fornecimento de S quando se utiliza o superfosfato simples como fonte de P ou fórmulas NPK contendo S na sua composição. Salienta-se, no entanto, que em solos arenosos a perda por lixiviação pode ser acentuada, requerendo diagnóstico mais frequente dos teores de S no solo.

A deficiência de micronutrientes pode ser avaliada com a análise de solo ou de planta. Quando os teores são menores que os das Tabelas 8 e 9, esses nutrientes podem ser aplicados via solo ou adubação foliar. Em geral, as respostas das plantas são mais rápidas com uso desta última técnica, em relação a adubação via solo. Contudo,

a adubação foliar deve ser utilizada de forma adequada (no momento certo, com a fonte e a dose certas), e deve-se evitar misturas incompatíveis com herbicidas e fungicidas. Essa técnica tem menor efeito residual, em relação à adubação via solo e pode ter maior custo da aplicação, quando não é efetuada em conjunto com a aplicação de outros produtos, como herbicidas e fungicidas.

O tratamento de sementes e a adubação foliar com micronutrientes têm sido utilizados com relativa frequência em culturas de grãos do Sul do Brasil, principalmente, na soja. Contudo, em geral, essa técnica tem sido aplicada sem observar os critérios de maior probabilidade de resposta à adubação, pois é utilizada mesmo quando os teores de micronutrientes do solo são maiores que os das Tabelas 8 e 9. Nessa situação, a resposta à adubação não é garantida (baixa ou nula probabilidade de resposta) e pode ser ineficiente. Adicionalmente, a aplicação de vários micronutrientes em solos com teores elevados de alguns deles pode ocasionar toxicidade para a cultura adubada, ou para a cultura em sucessão.

A deficiência de B é a que ocorre mais frequentemente, em solos do Planalto do RS e no Centro-Sul do PR. Entre os fatores que interferem na probabilidade de deficiência desse micronutriente, destacam-se o material de origem do solo, o teor de MO, a textura, o clima, a imobilização de B nos restos culturais e a exportação pela colheita em áreas de alta produtividade. Em solos originados de rochas sedimentares, como os arenitos que formaram as unidades de mapeamento Cruz Alta e Tupanciretã do RS, ou em solos formados da mistura dessas rochas com basalto (Unidades de mapeamento Passo Fundo, fase arenosa), por exemplo, os teores de argila e de MO são baixos, e a deficiência desse micronutriente pode ocorrer, dependendo dos outros fatores mencionados, como em situações de seca e cultivos com maior demanda de B, como a soja, a canola e a cevada.

Além do B, o Mn também tem sido aplicado via fertilizantes foliares, em solos do Planalto do RS e no Centro-Sul do PR. Contudo, a deficiência desse micronutriente não é frequente nessas regiões, principalmente, em solos formados de rochas ígneas, como o basalto, riolito e dacito. Em geral, os teores de Mn desses solos são adequados e, frequentemente, são maiores que os admitidos para solos com fertilidade construída (Tabelas 8 e 9). Assim, a prática da adubação foliar rotineira com Mn pode ser pouco eficiente (baixa ou nula probabilidade de resposta). Por outro lado, a aplicação de calcário em excesso, sem considerar a análise de solo, pode aumentar o pH do solo a valores maiores que 6,5. Nessa situação, a disponibilidade de Mn do solo tende a ser reduzida e eventuais deficiências nas culturas podem ser corrigidas com aplicações foliares.

Os micronutrientes também têm sido aplicados às sementes, principalmente, o Mo acompanhado do Co, elemento benéfico às bactérias que fixam o N em soja. A deficiência de Mo é particularmente importante em solos ácidos (pH em água < 5,5) e com baixa disponibilidade de N no início do desenvolvimento dessa cultura e é frequente quando o SPD é implantado em áreas de campo nativo e sem a correção da acidez. A aplicação de Mo ou de micronutrientes em sementes de soja deve ser efetuada de forma compatível com a inoculação de bactérias (*Bradyrhizobium japonicum*, *B. diazoefficiens* e *B. elkanii*), pois do contrário pode prejudicar a FBN em solos de primeiro cultivo, principalmente, os arenosos. Nessas áreas, o tratamento de sementes com outros produtos que não o inoculante deve ser evitado, desde que as sementes tenham qualidade fisiológica e sanitária adequadas, e a disponibilidade hídrica e a temperatura sejam adequadas para a rápida germinação e emergência da soja e o estabelecimento da FBN (Indicações..., 2016). Quando os micronutrientes forem aplicados nas sementes

dessa cultura, essa prática deve anteceder a adição do inoculante. Alternativamente, o Mo pode ser aplicado via foliar, nos estádios V2-V3, evitando o risco de prejudicar a FBN.

4.4.3 - Terras Baixas do Sul do Brasil

Embora o arroz irrigado seja uma espécie considerada menos exigente em S, suas altas produtividades que podem superar 10 t ha^{-1} , associadas com o cultivo em solos bastante arenosos e com baixos teores de MO, como aqueles localizados na Depressão Central do RS, podem requerer o aporte de adubos contendo S, quando os teores de S-SO_4 na análise de solo são menores que 10 mg kg^{-1} . As doses indicadas são limitadas a 20 kg ha^{-1} e podem ser supridas com uso de superfosfato simples, na adubação fosfatada, ou o sulfato de amônio, na adubação nitrogenada em cobertura, substituindo parte da ureia usada para atender a recomendação de N. Por outro lado, o excesso desse elemento pode ser prejudicial para a cultura, já que as reações de redução do sulfato em condições anaeróbicas podem gerar ácido sulfídrico que, em níveis elevados, pode causar distúrbios às plantas de arroz.

Na cultura do arroz irrigado, embora os efeitos do alagamento do solo possam alterar a dinâmica e disponibilidade de micronutrientes, não há relatos de pesquisas que suportem teores críticos ou resposta à aplicação de doses na cultura. Entretanto, os agricultores que passaram a incluir culturas de sequeiro em rotação com o arroz irrigado, especialmente em solos arenosos e com baixos teores de MO, devem ficar mais atentos aos teores no solo e desempenho das culturas tanto em relação ao S como aos micronutrientes, já que os solos de terras baixas são distintos daqueles em terras altas no Sul do Brasil ou no Cerrado brasileiro.

Particularmente para o arroz irrigado, o alagamento do solo aumenta a disponibilidade de Fe e Mn devido a solubilização destes elementos quando os oxi(hidro)xidos de Fe e Mn do solo são usados como aceptores de elétrons no metabolismo microbiano anaeróbico. Esse aumento de disponibilidade pode favorecer a ocorrência de toxidez por Fe em arroz, cuja probabilidade pode ser avaliada pela análise de solo. Em áreas sujeitas à toxidez por Fe, a calagem do solo para pH em torno de 6,0 ajuda a minimizar seus efeitos, embora outros fatores como a sensibilidade da cultivar, o regime de irrigação e a disponibilidade de outros nutrientes possam influenciar tanto na ocorrência como nos impactos sobre a produtividade da cultura (SOSBAI, 2018).

5 - Considerações Finais

Os atributos químicos do solo são um dos pilares da fertilidade, juntamente com os atributos físicos e biológicos. Contudo, a fertilidade de muitos solos tem sido manejada com o uso exclusivo da adubação e da calagem, sem considerar as boas práticas indicadas para a adoção dessas técnicas e as estratégias de manejo necessárias para a consolidação do SPD. Entre outras, algumas técnicas básicas, como a calagem em profundidade, são lacunas frequentemente presentes no histórico de implantação do SPD. Embora os melhores resultados de produtividade de grãos tenham sido obtidos em solos com fertilidade construída, o SPD tem se expandido, principalmente, em áreas de baixa fertilidade. Nesse contexto, destaca-se a importância da correção da acidez e da disponibilidade de P para a construção do perfil de solo. A correção do Al em subsuperfície é imprescindível para o controle da acidez e ampliação do volume de solo explorado pelas raízes. Isso é importante para amenizar outros estresses am-

bientais, como a compactação e a deficiência hídrica, além de aumentar a eficiência da adubação. A correção da disponibilidade de P é crítica, principalmente, em solos argilosos com alta capacidade de fixação de fosfatos, e que sem a correção da acidez indisponibilizam ainda mais esse nutriente. Assim, o manejo da calagem e da adubação fosfatada são práticas básicas de construção da fertilidade dos solos sob SPD e que devem ser consideradas ao implantar esse sistema para que ele se consolide e as propriedades do solo potencializem o crescimento das plantas.

Embora a correção das restrições químicas do solo possa ser realizada com as boas práticas de calagem e de adubação, a importância de processos biológicos e da adoção de práticas conservacionistas têm-se mostrado determinantes para a melhoria da fertilidade do solo, sobretudo dos atributos influenciados pela MO. Essas práticas, especialmente a rotação de culturas com maior aporte de restos culturais e de raízes, tendem a contribuir para o aumento desse constituinte no solo, favorecendo as produtividades das culturas e a estabilidade produtiva ao longo dos anos. Esses efeitos são atribuídos à melhoria de características físicas, químicas e biológicas do solo, ocasionada pela MO. Em conjunto com as técnicas de correção química discutidas no texto, essas práticas de manejo otimizam a ciclagem dos nutrientes, amenizam os efeitos da toxidez do Al e da fixação de fosfatos, melhoram propriedades físicas do solo que favorecem a disponibilidade de água e o crescimento das plantas e, conseqüentemente, minimizam a necessidade e maximizam a eficiência de insumos, como os fertilizantes e os corretivos de acidez. Nesse sentido, a otimização das condições químicas do solo pressupõe a adoção de um conjunto de práticas integradas de manejos agrônômicos.

REFERÊNCIAS

AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; CERETTA, C.A. Decomposição e liberação de nutrientes dos resíduos culturais de adubos verdes. In: LIMA FILHO, O.F.; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D. (Eds.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília, DF: Embrapa; 2014. v.1. p.225-264.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de plantas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 26:241-248, 2002.

ANGHINONI, I.; SALET, R.L. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. in: NUERNBERG, N. J., (ed.). **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.27-52.

BAYER, C.; BISSANI, C.A.; ZANATTA, J.A. Química de solos em plantio direto. In: FONTOURA, S.M.V; BAYER, C. (Org.). **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. 2ed. Guarapuava: Mimiog, 2009, p. 7-30.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two brazilian cerrado soils under no-till. **Soil Tillage Research**, 86:237-45, 2006.

BAYER, C.; DIECKNOW, J.; CONCEIÇÃO, P.C.; SANTOS, J. C. F. Sistema de manejo conservacionista e qualidade de solos, com ênfase na matéria orgânica. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Vol. 1. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2019. p. 315 - 343.

BENITES, V.M.; CARVALHO, M.C.S.; RESENDE, A.V.; POLIDORO, J.C.; BERNARDI, A.C.C.; OLIVEIRA, F.A. Potássio, cálcio e magnésio. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Org.). **Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes: Nutrientes**. Ied. Piracicaba: IPNI Brasil, 2010, v.2, p.133-204.

BOENI, M.; ANGHINONI, I.; GENRO JR., A.S.; OSÓRIO FILHO, B.D. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA/Estação experimental. Seção de Agronomia, 2010. 40p. (Boletim técnico n° 10).

BOLAN, N.S.; HEDLEY, M.J. Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. In Z. Rengel, ed. *Handbook of Soil Acidity, USA*, New York, Marcel Dekker, Inc. 29-56, 2003.

BOLLER, W. Máquinas para distribuição de calcário. **Revista Plantio Direto**, Ed. 111: 26-33, 2009.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG. 1999. 359p.

CRUSCIOL, C.A.C.; NASCENTE, A.S.; BORGHI, E.; SORATTO, R.P.; MARTINS, P.O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisade grass cover crops. **Agronomy Journal**, 107:2271-2280, 2015.

DE BONA, F.D.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; SOUSA, R.O.; SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C. Grãos. In: SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C.; ANGHINONI, I.; SOUSA, R.O. (Eds.). **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul; 2016. p. 101-34.

DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A. **Vertical mulching**: prática conservacionista mitigadora de perdas por erosão hídrica em sistema plantio direto. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008, 8p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 53).

DOBERMANN, A.R. **Nitrogen use efficiency – state of the art**. 2005. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/316>>. Acesso em: 21 jun 2020.

DUARTE, A. P.; CANTARELLA, H.; KAPPES, C. Adubação de Sistemas Produtivos: Milho Safrinha e Soja. In: PAES, M.C.D. (Org.) **Construindo Sistemas de Produção Sustentáveis e Rentáveis**. Seminário Nacional de Milho Safrinha, XIV. Livro de Palestras. ABMS, Sete Lagoas. 2017. p. 86-106.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; HÄNEL, J.; ROEHRIG, R. Acidez e calagem em culturas de grãos em plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Ed. 135 e 136: 45-55, 2013.

FERREIRA, A.C.B.; BORIN, A.L.D.C.; LAMAS, F.M.; FERREIRA, G.B.; RESENDE, A.V. Exchangeable potassium reserve in a Brazilian savanna Oxisol after nine years under different cotton production systems. **Scientia Agricola**, 79: n. 4, e20200339, 2022.

FIORIN, J.E.; CANAL, I.N.; CAMPOS, B.C. Fertilidade do solo. In: CAMPOS, B.C. (Ed.). **A cultura do milho no plantio direto**. Cruz Alta: Fundacep Fecotrig. 15-54, 1998.

FINK, J.R.; INDA, A.V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil Tillage Research**, 155:62-68, 2016.

FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. **Trinta anos do experimento de manejo de solo, Guarapuava, PR**: edição comemorativa. Guarapuava, Paraná: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2008. 56p.

FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33, 1721-1732, 2009.

FONTOURA, S.M.V.; PIAS, O.R.C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M.R.; DE MORAES, R.P.; BAYER, C. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil & Tillage Research**, 193, 27-41, 2019.

FONTOURA, S.M.V.; VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C.; VIERO, F.; ANGHINONI, I.; MORAES, R.P. **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2015. 146p.

FONTOURA, S.M.V.; VIERO, F.; BAYER, C.; MORAES, R.P. **Adubação nitrogenada em cereais de inverno na região Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: FAPA, 42p. 2013.

GONÇALVES, G.K.; SOUSA, R.O.S.; VAHL, L.C.; BORTOLON, L. Solubilização dos fosfatos naturais Patos de Minas e Arad em dois solos alagados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2157-2164, 2008.

GOTT, R.M.; SICHOCKI, D.; AQUINO, L.A.; XAVIER, F.O.; SANTOS, L.P.D. dos; AQUINO, R.F.B.A. de. Fontes e épocas de aplicação de nitrogênio no milho safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 13:24-34, 2014.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, 137:1-72, 2016.

MARCHESAN, E.; SILVA, L.S.; SOUSA, R.O.; PAULETTO, E. A. O manejo do solo em ambientes de terras baixas: a experiência da Região Sul. In: BERTOL, I.; MARIA, I.C.; SOUZA, L.S. (Org.). **MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA**. 1ed. Viçosa: SBCS, 2019, v. 1, p. 729-767.

MATTEI, A.A.G.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; BOLLER, W. Efeito da umidade do calcário na uniformidade de distribuição a lanço. **Revista Plantio Direto**. Ed. 178: 46-52, 2020.

MIRANDA, L.N.; MIRANDA, J.C.C.; REIN, T.A.; GOMES, A.C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 40 (6): 563-572, 2005.

PAVINATO, P.S.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L.R.; WITHERS, P.J.A. Effects of cover crops and phosphorus sources on maize yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. **Agronomy Journal**, 109:1039-1047, 2017.

PIAS, O.H.C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M.R.; SILVA, A.G.B.; BAYER, C. Does gypsum increase crop grain yield on no tilled acid soils? A meta analysis. **Agronomy Journal**, 112: 1-20, 2020.

PROCHNOW, L.I.; RESENDE, A.V.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; FRANCISCO, E.A.B.; CASARIN, V.; PAVINATO, P.S. Phosphorus placement for annual crops in the tropics. **Better Crops**, 102 (1): 21-24, 2018.

RAGAGNIN, V.A.; SENA JÚNIOR, D.G. de; KLEIN, V.; LIMA, R.S.; COSTA, M.M.; OLIVEIRA NETO, O.V. de. Adubação nitrogenada em milho safrinha sob plantio direto em Jataí-GO. **Global Science and Technology**, 3:70-77, 2010.

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. Adubação com enxofre. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.227-244.

RESENDE, A.V.; FONTOURA, S.M.V.; BORGHI, E.; SANTOS, F.C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S.G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A.L.D.C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, 156: 1-17, 2016.

RESENDE, A.V.; COELHO, A.M. Amostragem para mapeamento e manejo da fertilidade do solo na abordagem de agricultura de precisão. **Informações Agronômicas**, 3:1-8, 2017.

ROBSON, A.D. ed. Soil acidity and plant growth. Academic Press Australia. Academic Press, Australia, 1989.

SÁ, J. C. M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B. DOS; HARTMAN, D. DA C.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, 26:531-543, 2015.

SAKO, H.; SOARES, J.E.; SILVA, L.A.; BALARDIN, R. **Boletim Técnico 1**: Relações de enraizamento e cálcio no solo para alta produtividade da safra 14/15. Sorocaba: CESB, 2015. 15p.

SALET, L.R.; Toxidez de alumínio no sistema plantio direto. Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (109 p.). 1998.

SICHOCKI, D.; GOTT, R.M.; FUGA, C.A.G.; AQUINO, L.A.; RUAS, R.A.A.; NUNES, P.H.M.P. Resposta do milho safrinha a doses de nitrogênio e de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 13: 48-58, 2014.

SCIVITTARO, W.B.; SILVA, L.S. da; SOUSA, R.O. de. Manejo da fertilidade do solo para cultivo de soja e milho. In: Beatriz Marti Emygdio; Ana Paula Schneid Afonso da Rosa; Ana Cláudia Barneche de Oliveira. (Org.). Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul. 1ed., Brasília: Embrapa, v. 1, 105-126, 2017.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; GUIMARÃES, G.L.; BUZETTI, S. Acúmulo de nutrientes em plantas de cobertura e no milho cultivado em sucessão sob diferentes doses de nitrogênio em plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 5 (2): 202-217, 2006.

SILVA, L.S.; SOUSA, R.O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. de O. (Org.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2ed. Porto Alegre: Metropole, 2008, p. 525-543.

SIMÃO, E.P.; RESENDE, A.V.; GONTIJO NETO, M.M.; BORGHI, E.; VANIN, Á. Resposta do milho safrinha à adubação em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 17:76-90, 2018.

SIMÃO, E.P.; RESENDE, A.V.; GONTIJO NETO, M.M.; SILVA, A.F.; GODINHO, V.P.C.; GALVÃO, J.C.C.; BORGHI, E.; OLIVEIRA, A.C.; GIEHL, J. Nitrogen fertilization in off-season corn crop in different Brazilian Cerrado environments. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 55: e01551, 2020.

SIQUEIRA NETO, M.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I - Sequestro de carbono no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1013-1022, 2009.

SORATTO, R.P.; PEREIRA, M.; COSTA, T.A.M. da; LAMPERT, V. do N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. **Revista Ciência Agronômica**, 41:511-518, 2010.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.147-168.

SOUSA, D.M.G.; NUNES, R.S.; REIN, T.A.; SANTOS JUNIOR, J.D.G. OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e seu manejo na Região de Cerrado. In: FLORES, R.A.; CUNHA, P.P. (Eds.). **Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado**. Goiânia: UFG, 2016. p.125-190.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; NUNES, R.S. Necessidade de reaplicação de calcário em experimento de adubação fosfatada de longa duração com soja e milho sob plantio direto e preparo convencional em Latossolo do Cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29., 2010, Guarapari. Fontes de nutrientes e produção agrícola: modelando o futuro. **Anais...** CD-ROM. FERTBIO 2010.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; GOEDERT, W.J.; LOBATO, E.; NUNES, R.S. Fósforo. In: Boas Práticas Para Uso Eficiente de Fertilizantes: v 2, Nutrientes, eds L.I. Prochnow; V. Casarin; S. R. Stipp (Piracicaba: INPI - Brasil), 67-132. 2010.

TIECHER T.; PIAS O.H.C.; BAYER C.; MARTINS A.P.; DENARDIN L.G.O.; ANGHINONI I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 42:e0170025. 2018.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; JANTALIA, C.P.; MARTINS, M.R.; BODDEY, R.M. Acultura do milho e seu impacto nas emissões de GEE no Brasil. In: KARAM, D. MAGALHÃES, P.C. (Eds.). **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**. Sete Lagoas: ABMS; 2014. p.61-71.

VIEBRANTZ, L.F.; ESCOSTEGUY, P.A.V. Macronutrientes e produção de biomassa de coberturas de inverno. Artigo submetido para o trabalho de conclusão do Curso de Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS. 2021, 13p.

VIEIRA, R.C.B. et al. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em Latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:188-198, 2013.

VIEIRA, R.C.B.; FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C.; MORAES, R.P.; CARNIEL, E. Potassium fertilization for long term no-till crop rotation in the Central-Southern region of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 40: e0150193, 16p., 2016.

VIEIRA, R.C.B.; FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C.; MORAES, R.P.; CARNIEL, E. Adubação fosfatada para alta produtividade de soja, milho e cereais de inverno cultivados em rotação em Latossolos em plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:794-808, 2015.

VILELA, L.; SOUSA, D.M.G.; SILVA, J.E. Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.169-183.

YAGI, R.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; BARBOSA, J.C.; ARAÚJO, L.A.N. Soil organic matter as a function of nitrogen fertilization in crop successions. **Scientia Agrícola**, 62:374-380, 2005.