

# Manejo da fertilidade do solo para uma produção agropecuária mais sustentável

André Guarçoni<sup>1</sup>; Luiz Fernando Favarato<sup>2</sup>; Sílvia Regina Stipp<sup>3</sup>; Valter Casarin<sup>4</sup>

**Resumo** - O Brasil é um dos líderes mundiais em produção agropecuária. Mas os solos brasileiros, devido ao elevado intemperismo, não condizem com essa constatação, pois são considerados, em geral, de baixa fertilidade. Entretanto, ao longo do tempo, foram desenvolvidas tecnologias que tornaram o país capaz de dominar a agricultura tropical, transformando solos pobres, inadequados à agricultura, em solos produtivos. O objetivo deste trabalho foi demonstrar como os sistemas de cultivo, integrados ao manejo dos corretivos, dos condicionadores e da adubação, podem influenciar positivamente a fertilidade do solo, com impacto nos componentes físico, químico e biológico, visando uma produção agropecuária mais sustentável, considerando os pilares econômico, ambiental e social. Para tanto, são apresentados e discutidos os sistemas de manejo dos solos, capazes de modificar seus atributos químicos, físicos e biológicos, o processo correto de amostragem dos solos para avaliação de sua fertilidade, os efeitos de corretivos e condicionadores na melhoria de sua qualidade, bem como as novas perspectivas de cálculo para definição das doses a serem aplicadas, e o “Manejo 4C”, que visa o uso mais eficiente dos fertilizantes, partindo do princípio de se aplicar a fonte certa, na dose certa, na época certa e no lugar certo. A integração dessas tecnologias ou conceitos permite, indubitavelmente, incrementar e manter a fertilidade do solo em um nível suficiente para que a produção agropecuária seja sustentável, mas com elevados patamares de produtividade.

**Palavras-chaves:** Sistemas de manejo dos solos. Amostragem de solo. Calagem. Gessagem. Manejo 4C.

## Soil fertility management for sustainable agricultural production

**Abstract** - Brazil is one of the world leaders in agricultural production. Despite the low fertility of Brazilian soils, due to the high weathering, technologies have been developed over time that have made the country able to dominate tropical agriculture, transforming poor soils, unsuitable for agriculture, in productive ones. The objective of this study was to demonstrate how the crop system, integrated into the management of correctives, conditioners and fertilization, can positively influence soil fertility, with impact on the physical, chemical and biological components, aiming at a more sustainable agricultural production, considering the economic, environmental and social pillars. Therefore, the soil management systems capable of modifying their chemical, physical and biological attributes are presented and discussed. The correct process of sampling of soils are also presented, aiming to evaluate their fertility, the effects of correctives and conditioners in the improvement of their quality, as well as the new perspectives of calculation to define the rates to be applied, and the “4R Nutrient Stewardship”, which aims at the most efficient use of fertilizers, based on the principle of applying the right source, at the right rate, at the right time, and at the right place. The integration of these technologies or concepts undoubtedly allows the increase and maintenance of soil fertility at a sufficient level so that agricultural production is sustainable, but with high levels of productivity.

**Keywords:** Soil management systems. Soil sampling. Liming. Gypsum. 4R Nutrient Stewardship.

<sup>1</sup>Engenheiro Agrônomo, D.Sc. Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador do Incaper, guarconi@incaper.es.gov.br

<sup>2</sup>Engenheiro Agrônomo, D.Sc. Fitotecnia e Produção Vegetal, Pesquisador do Incaper

<sup>3</sup>Engenheira Agrônoma, M.Sc. Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisadora da NPCT

<sup>4</sup>Engenheiro Agrônomo e Florestal, D.Sc. Ciência do Solo, Professor Esalq/USP

## INTRODUÇÃO

Nos últimos 40 anos, o Brasil saiu da condição de importador de alimentos para se tornar um grande provedor para o mundo. Foram conquistados aumentos significativos na produção e na produtividade agropecuárias. Hoje, a produtividade (produção/unidade de área) das culturas é muito maior, aspecto importantíssimo para a preservação dos recursos naturais. Entretanto, os solos brasileiros são, de modo geral, intemperizados, apresentam abundância de minerais secundários (argilominerais (1:1) e óxidos de Fe e Al), sendo ainda pobres em nutrientes de plantas e ácidos. Isso ocorre porque os nutrientes considerados básicos são lixiviados, gerando, com o tempo, acidez ativa e potencial (LEPSCH, 2010). Fato importante é que a presença de alumínio em profundidade no perfil acompanha o grau de intemperismo do solo (RABEL et al., 2018), ou seja, o subsolo tende a ser mais problemático do que a camada superior.

Solos desse tipo são caracterizados como pobres ou pouco férteis. De forma superficial, pode-se dizer que não são capazes de ceder nutrientes para as plantas em quantidades adequadas e balanceadas. Nessas condições, o crescimento de plantas de interesse econômico é dificultado, devido ao efeito direto da acidez, aos teores tóxicos de elementos como  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$  e aos baixos teores de nutrientes em formas disponíveis (RAIJ, 2011a). Além disso, a fertilidade do solo, caracterizada pela ação conjunta de seus componentes físico, químico e biológico, vai diminuindo cada vez mais, numa escala de tempo que muitas vezes não é percebida na prática, a não ser quando é incrementada pela ação antrópica danosa, como no caso de manejos inadequados do solo.

A baixa fertilidade natural dos solos não é um impeditivo ao avanço da agropecuária brasileira, uma vez que a utilização de tecnologias modernas tornou produtivos solos anteriormente considerados impróprios à produção agropecuária (RAIJ, 2011a). Dois fatores são fundamentais para o ganho de produtividade na agricultura brasileira: a correção do

solo e a adubação das culturas (EMBRAPA, 2019). A correção e a adubação influenciam diretamente os componentes químicos e biológicos da fertilidade do solo, mas seu componente físico é especialmente condicionado por práticas mecânicas de manejo, constituindo diferentes sistemas agropecuários.

Considerando o exposto, o objetivo deste trabalho foi demonstrar como o manejo moderno e integrado do solo, dos corretivos, dos condicionadores e da adubação podem influenciar positivamente sua fertilidade, com impacto nos componentes físico, químico e biológico, visando uma produção agropecuária mais sustentável, considerando os pilares econômico, ambiental e social.

## SISTEMAS DE CULTIVO E MANEJO DO SOLO

A redução da cobertura vegetal nativa, aliada à intensidade de uso do solo, tem resultado na deterioração dos recursos naturais, podendo ocasionar a diminuição do potencial produtivo do solo, além de comprometer sua fertilidade (FREITAS et al., 2017). O manejo adequado dos solos cultivados é importante para conservar ou modificar minimamente seus atributos, mantendo-os ideais para o desenvolvimento das culturas (RODRIGUES et al., 2016). O impacto causado pelo manejo inadequado do solo pode ser avaliado através de suas características, sejam elas físicas, químicas e/ou biológicas (RAMOS et al., 2017).

O uso contínuo e adequado de sistemas de cultivo e manejo proporciona alterações em propriedades e características do solo, cuja intensidade depende do tempo de uso e das condições edafoclimáticas (PAULINO, 2013). Nesse sentido, os sistemas agrícolas que associam a monocultura contínua ao uso de equipamentos inadequados de preparo provocam a degradação do solo cultivado (FREITAS et al., 2017). A atividade agropecuária, por sua vez, tem sido frequentemente desenvolvida sem levar em consideração fatores que podem alterar as características dos atributos físico-químicos do solo, ocasionando, assim, problemas de ordem edáfica. A perda da qualidade do solo em seus aspectos

químicos, físicos e biológicos provoca a redução da capacidade do solo em exercer suas funções diversas, especialmente quando se considera a atividade agropecuária.

Para o manejo adequado do solo, visando a sustentabilidade de sua fertilidade, é imprescindível que a prática a ser adotada esteja de acordo com o Sistema de Classes de Capacidade Potencial de Uso das Terras Agrícolas, que utiliza características como tipo de solo, relevo, uso e clima para classificá-las quanto às diferentes aptidões agrícolas (LEPSCH *et al.*, 1991).

Dos componentes do manejo, o preparo do solo possivelmente seja a atividade que mais exerce influência nos atributos indicadores da qualidade do solo, pois atua diretamente alterando sua estrutura (HAMZA; ANDERSON, 2005). Nesse sentido, entre as diferentes práticas de manejo do solo, as principais são: o preparo convencional, o cultivo mínimo e o sistema plantio direto na palha.

#### PREPARO CONVENCIONAL

Conhecido também como preparo intensivo do solo, o preparo convencional constitui-se em uma aração, considerada como preparo convencional primário do solo, seguida de uma ou duas gradagens para destorroamento e uniformização da superfície, realizando o chamado preparo convencional secundário.

O objetivo principal dessa prática de cultivo e manejo do solo é permitir o preparo de um leito de semeadura, com a formação de uma camada de agregados suficientemente finos e úmidos, cuja função seria assegurar um bom contato do solo com as sementes, a fim de promover uma rápida germinação e uma pronta emergência das plântulas, além de propiciar a incorporação do calcário, fertilizantes e cobertura verde, seja esta formada por plantas invasoras ou adubação verde. Objetiva também aumentar a porosidade e a permeabilidade, facilitar a absorção de água e, com isso, proporcionar o bom desenvolvimento das plantas (PERDOK; KOUWENHOVEN, 1994).

Esse sistema de cultivo é pautado em tecnologias desenvolvidas para regiões de clima temperado, que envolviam o revolvimento intensivo e profundo do solo, com o emprego de arados e grades, e tinham como principal fundamento a exposição do solo aos raios solares durante a primavera, visando o seu degelo e aquecimento, condição imprescindível para o desenvolvimento das culturas de verão (DEBIASI *et al.*, 2013).

Atualmente, o sistema adotado utiliza dois ou mais implementos agrícolas e tende a aumentar a resistência à penetração nas camadas abaixo da profundidade de corte, prejudicando a infiltração de água no solo e favorecendo o escoamento superficial (REICHERT *et al.*, 2009). É o caso do preparo com grade aradora, que na maioria das vezes trabalha o solo à pouca profundidade, apresentando alto rendimento. Porém, o uso constante desse implemento pode levar à formação de camadas compactadas, chamadas “pé de grade”, que dificultam o desenvolvimento das plantas, devido à manutenção das raízes nas camadas superficiais (CORTEZ *et al.*, 2011).

Apesar desse sistema de cultivo ter por objetivo alterar algumas das propriedades e características físicas do solo, o que melhoraria o desenvolvimento das plantas, quase sempre tem proporcionado degradação devido à utilização de práticas inadequadas (VITÓRIA *et al.*, 2014). Em média, observa-se uma perda de solo anual 50 % superior quando utilizado o preparo convencional, em comparação a sistemas sem preparo, como o plantio direto, com valores da ordem de 30 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (ADIMASSU; ALEMU; TAMENE, 2019).

Simultaneamente à perda de solo, observa-se a perda da fertilidade. Nesse contexto, Hernani, Kurihara e Silva (1999), conduzindo um trabalho sobre um Latossolo Vermelho distroférico com 0,03 mm<sup>-1</sup> de declividade, durante sete anos, constataram perdas médias anuais de P, K, Ca e Mg, na ordem de 0,84 kg ha<sup>-1</sup>, 7,80 kg ha<sup>-1</sup>, 19,20 kg ha<sup>-1</sup> e 1,70 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, quando utilizado o preparo convencional (aração + duas gradagens).

Na soma dos sete anos, as perdas de P e K equivaleram a cerca de 70 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 105 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, respectivamente.

Avaliando os atributos químicos do solo em diferentes sistemas de preparo, no cultivo convencional e orgânico do milho-verde, Favarato et al. (2015) verificaram que os teores de matéria orgânica do solo (MOS) reduziram após o cultivo do milho-verde, nos tratamentos com preparo de solo tanto no cultivo convencional quanto no orgânico. Isso evidencia que o revolvimento intensivo do solo para o seu preparo ocasionou elevada taxa de mineralização da MOS, o que provocou redução nos seus teores.

Além disso, os autores observaram que os teores de MOS, do tratamento com preparo do solo e preparo convencional foram inferiores aos teores dos demais sistemas de cultivo do solo, tanto no início quanto no final do cultivo do milho-verde, indicando que, além do revolvimento intensivo do solo, as adubações realizadas com fertilizantes minerais, como o sulfato de amônio, podem ter proporcionado aumento da taxa de mineralização da MOS.

Cultivos intensivos podem levar à perda da matéria orgânica, devido ao possível aumento da aeração do solo, o que favorece a decomposição de resíduos orgânicos (TIAN et al., 2016). E a perda da matéria orgânica reduz a qualidade química, física e biológica do solo.

#### CULTIVO MÍNIMO

O cultivo mínimo compreende, como o próprio nome informa, o mínimo de manipulação e revolvimento do solo para o plantio das culturas e é recomendado para solos não muito compactados. Nesse sistema de cultivo, é realizada a subsolagem, que descompacta o solo na linha de plantio, sendo indicada principalmente para lavouras em declive, visando reduzir a erosão (ROSSETTO; SANTIAGO, 2019). Segundo os autores, o cultivo mínimo tem vantagens sobre o convencional, principalmente quanto à redução da erosão e dos custos de preparo do solo. Nesse sentido, Jacobs, Rauber e Ludwig (2009) verificaram que o

cultivo mínimo, comparado ao preparo convencional, não apenas melhorou a estabilidade dos agregados, mas também aumentou as concentrações de carbono orgânico do solo, na profundidade de 5-8 cm após 40 anos. Já Acar, Celik e Günal (2018), estudando o efeito de diferentes sistemas de cultivo sobre o carbono orgânico do solo associado aos agregados, observaram que sistemas mais conservacionistas, como o cultivo mínimo, em geral favoreceram um acúmulo significativamente maior de carbono orgânico no solo, na camada de 0-15 cm de profundidade, em comparação às práticas convencionais de preparo, para todos os tamanhos de agregados.

A adoção do cultivo mínimo resulta em maior conservação do sistema, incluindo a fertilidade do solo, pois a sua estrutura está sujeita a menos dano, a atividade dos microrganismos torna-se mais intensiva e os resíduos pós-colheita são misturados na camada superior do solo, proporcionando acúmulo de matéria orgânica (MEURER et al., 2018), diminuição da erosão (LAL; REICOSKY; HANSON, 2007) e aumento da biodiversidade do solo (HOLLAND, 2004). No entanto, existem também possíveis desvantagens. Por exemplo, a mineralização da MOS pode ser reduzida (PEIGNE et al., 2007), o que deve resultar num menor suprimento de nitrogênio, afetando o desempenho das culturas (COOPER et al., 2016).

Estudos indicam problemas relacionados a plantas invasoras em cultivos orgânicos. Nesse caso, quando se utilizou o cultivo mínimo, a biomassa total de plantas invasoras foi maior do que quando se utilizou o preparo convencional (HOFMEIJER et al., 2019). Armengot et al. (2015) também observaram que após 9 anos de cultivo em sistema orgânico com rotação de culturas, o cultivo mínimo aumentou em 2,3 vezes a quantidade de plantas invasoras. Esses autores apontam ainda que as gramíneas são as invasoras mais problemáticas.

Avaliando o impacto dos sistemas de cultivo e manejo do solo sobre as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em campos agrícolas, Feng et al. (2018) observaram que o cultivo mínimo aumentou significativamente a emissão de CH<sub>4</sub> em comparação com ao preparo

convencional. Os autores atribuem esse aumento na emissão de  $\text{CH}_4$  à menor incorporação dos resíduos no solo quando se realizou o cultivo mínimo, o que proporcionou maior decomposição se comparado ao preparo convencional. Todavia, para Zhang et al. (2013), o sistema plantio direto, devido à menor perturbação do solo e à zona de oxidação de  $\text{CH}_4$  mais rasa do que no cultivo mínimo, é mais eficiente em reduzir a emissão de  $\text{CH}_4$ . Além disso, segundo Chen et al. (2013), a maior relação C:N das gramíneas (como milho, trigo e cevada) utilizadas na rotação de culturas do sistema plantio direto pode estimular a imobilização microbiana do N no solo, reduzindo assim o N disponível para a produção de  $\text{N}_2\text{O}$ .

#### SISTEMA PLANTIO DIRETO NA PALHA

O sistema plantio direto fundamenta-se em três princípios básicos: movimentação mínima do solo, manutenção permanente de cobertura do solo e adoção da prática de rotação e sucessão de culturas. Esses fundamentos viabilizam o objetivo principal do sistema em terras altas, que é a conservação do solo (SOSBAI, 2018).

Sistema plantio direto ou semeadura direta são os termos utilizados para definir um sistema de cultivo e manejo do solo no qual as culturas são semeadas sem qualquer preparo, determinando uma perturbação limitada do solo (menor que 5 cm), somente no sulco de semeadura (SOANE et al., 2012). Nesse sistema de cultivo, pelo menos um terço da superfície do solo deve permanecer coberta com resíduos vegetais (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018), promovendo assim a proteção do solo contra a erosão hídrica (PROSDOCIMI et al., 2016; BOGUNOVIC et al., 2018) e aumentando potencialmente tanto o teor de matéria orgânica quanto a presença de microrganismos no solo (BOTTINELLI et al., 2015). Além disso, a conversão para o sistema plantio direto pode melhorar as propriedades físicas do solo (TEBRÜGGE; DÜRING, 1999), aumentar a retenção de água em ambientes de sequeiro (COLECCHIA; RINALDI; DE VITA, 2015) e reduzir os custos operacionais e as emissões de poluentes por máquinas agrícolas (VAN DE PUTTE et al., 2010).

Em relação ao desempenho produtivo de culturas, Favarato et al. (2016), avaliando o crescimento e produtividade do milho-verde sobre diferentes coberturas de solo no sistema plantio direto orgânico, observaram maior crescimento inicial do milho-verde sobre a palha de tremoço branco em monocultivo e em consórcio com aveia-preta, recomendando essas coberturas como boa opção para a formação de palhada no sistema plantio direto orgânico, de forma a garantir o crescimento e a produtividade satisfatória para a cultura do milho-verde. Entretanto, os autores enfatizam que a imobilização do N com o uso da palha de aveia-preta no sistema plantio direto orgânico limitou o crescimento das plantas e o potencial produtivo do milho-verde. Ainda considerando o manejo da palha no sistema plantio direto, Favarato et al. (2018) realizaram um trabalho objetivando avaliar diversas formas de manejo de palhas e semeadoras, sobre diferentes plantas de cobertura, para o sistema orgânico de produção, como alternativas operacionais e econômicas para o pequeno produtor agrícola. Esses autores verificaram que a melhor opção foi o uso do rolo-faca de 2,4 m, entre os métodos de manejo estudados (foice; roçadora costal manual; roçadora frontal de microtrator; roçadora de trator; rolo-faca de 1,0 m de largura para microtrator; e rolo-faca de 2,4 m de largura para trator), pois foi 92 % mais eficiente, se comparado à roçadora de trator, além de proporcionar boas taxas de cobertura de solo.

Estudos relativos aos efeitos do sistema plantio direto sobre propriedades e características dos solos mostraram aumentos na taxa de infiltração de água e capacidade de armazenamento (COPEC et al., 2015), diminuição no escoamento superficial e erosão, em comparação ao preparo convencional (DELAUNE; SIJ; KRUTZ, 2013). Essas diferenças são atribuídas a um aumento na estabilidade de agregados, maior número de poros originados pela macrofauna do solo e crescimento de raízes, bem como a uma diminuição na frequência de tráfego de máquinas sobre o solo, que coletivamente alteraria sua porosidade (HAGHIGHI; GORJI; SHORAFI, 2010).

A cobertura do solo pelos restos culturais representa excelente alternativa, uma vez que, quando bem formada e distribuída uniformemente sobre a superfície do solo, age física e mecanicamente sobre o banco de sementes de plantas invasoras, diminuindo a taxa de germinação, além de contribuir na melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo e na manutenção da temperatura e da umidade (PITELLI; DURIGAN, 2001; NOCE et al., 2008).

Em um estudo realizado para avaliar a densidade populacional e a infestação de plantas daninhas no plantio direto orgânico de milho-verde, Favarato et al. (2014) observaram redução de 72 % na densidade populacional com a adoção do sistema plantio direto. Ademais, os autores destacaram que a espécie *Cyperus rotundus* apresentou-se com maiores densidades absoluta e relativa nos sistemas com plantio direto orgânico de milho-verde.

Cantarella, Duarte e Andrade (2005), nesse sentido, afirmaram que a adoção do sistema plantio direto altera características químicas do solo, aumentando, nas camadas superficiais, os teores de matéria orgânica, P, K,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e os valores da saturação por bases (V) e da capacidade de troca de cátions (CTC). Da mesma forma, para Pavinato e Rosolem (2008), há também elevação do pH do solo a partir da adição de resíduos vegetais, decorrente da complexação do  $\text{H}^+$  e do  $\text{Al}^{3+}$  por compostos orgânicos, resultando em maior disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e K, com concomitante aumento da saturação por bases (V).

Em vista dessas informações, o aporte de matéria orgânica e de nutrientes em formas disponíveis no solo irá favorecer sua fertilidade, resultando em maior sustentabilidade para as explorações agrícolas que utilizem sistemas de cultivo mais conservacionistas (PEDROTTI et al., 2015).

### AMOSTRAGEM DE SOLO

A amostragem de solo é a primeira prática a ser realizada quando se pretende avaliar sua fertilidade, visando a recomendação de corretivos e fertilizantes, para que produções agropecuárias adequadas sejam

alcançadas, com o mínimo de impacto ambiental possível. Entretanto, amostras de solo coletadas de forma equivocada podem comprometer todo o processo de avaliação da fertilidade por meio de análises químicas, físicas ou biológicas, uma vez que as amostras devem representar fielmente a fertilidade do solo de determinado talhão.

As amostras de solo devem ser coletadas seguindo inúmeros princípios e diretrizes, para que sejam realmente representativas. Todo o processo de coleta é pautado em resultados e apontamentos de diversos trabalhos científicos, e mesmo que tirar terra de uma área pareça algo extremamente simples, o que na verdade é, transformar essa pequena amostra em uma ferramenta de grande utilidade técnico-científica requer conhecimento e reconhecimento de sua relevância.

### SISTEMAS DE AMOSTRAGEM

De acordo com a forma como os teores de elementos químicos, as características físicas ou os organismos se distribuem horizontalmente no solo, são utilizados diferentes sistemas de amostragem.

Se a distribuição das características de interesse no solo se dá de forma aleatória (UPCHURCH; EDMONDS, 1991), é realizado o sistema de coleta ao acaso, que por sua vez irá gerar como resultado a avaliação da fertilidade média (BRUS; GRUIJTER, 1997). Nesse caso, são separados na área talhões homogêneos quanto à declividade, tipo de solo, cultura, tratamentos culturais, etc., e coletadas amostras simples de solo que serão devidamente homogeneizadas para formar uma amostra composta representativa do talhão homogêneo (CANTARUTTI et al., 2007). As amostras compostas assim formadas seriam representativas, pois a partir da análise da amostra composta são determinados valores de características químicas iguais aos obtidos quando se realiza as médias aritméticas das determinações das amostras simples de solo (ALVAREZ V.; GUARÇONI, 2003; SANTOS et al., 2009).

Caso a distribuição das características se apresente seguindo determinada dependência espacial, a amostragem deve ser realizada sistematicamente

(BURROUGH, 1991), com amostras individuais coletadas a distâncias específicas na área, que irão gerar os mapas da fertilidade do solo, utilizados na agricultura de precisão para aplicação em taxa variável de corretivos e fertilizantes (GUARÇONI; ALVAREZ V.; SOBREIRA, 2017). Para esse tipo de coleta, Guarçoni et al. (2006) definiram que em vez de coletar amostras individuais, pontuais, fossem coletados grupos de amostras simples em cada ponto, que seriam homogeneizadas gerando uma amostra composta por local. Nesse caso, estariam sendo amostrados os indivíduos solo, definidos pelos autores como “a menor área (considerando definida profundidade) na qual se deve amostrar o solo para caracterizar a fertilidade efetivamente explorada por uma planta ou por um grupo de plantas (fertilidade local média), sendo suas dimensões laterais grandes o bastante para incluir variações representativas a curtas distâncias na composição do solo (meso e microvariações)”.

A amostragem do indivíduo solo, segundo Guarçoni et al. (2006), iria atenuar a ocorrência de padrões cíclicos e de “outliers”, melhorando a forma do semivariograma e aumentando o alcance da dependência espacial. Além disso, a confiabilidade dos mapas de fertilidade seria aumentada, por estar sendo considerada a fertilidade efetivamente explorada por uma planta ou por um grupo de plantas (fertilidade local média).

A definição de sistemas de amostragem não é, por sua vez, tão rígida quanto os princípios estatísticos que os determinam, especialmente quando os resultados analíticos são direcionados à produção agropecuária e não à pesquisa. Para Brus e Gruijter (1997), as estratégias de amostragem aleatória são válidas também para áreas com dependência espacial, uma vez que a independência entre pontos seria criada pelo desenho de amostragem, ou seja, a forma de amostragem criaria independência entre pontos amostrados por meio da aleatorização. Além disso, questões econômicas devem ser consideradas, e muitas vezes a determinação da fertilidade média é mais rentável do que a confecção de mapas de fertilidade, mesmo que algum viés esteja embutido

nas determinações (ANDERSON-COOK et al.; 1999). Nesse sentido, Guarçoni, Alvarez V. e Sobreira (2017) recomendam que, dentro de talhões homogêneos menores, sobretudo em regiões com relevo mais acidentado, sejam coletadas amostras simples de forma aleatória, para determinação da fertilidade média, enquanto em áreas maiores, compreendendo talhões homogêneos mais extensos ou mesmo diversos talhões, devem-se utilizar a geoestatística e os mapas de fertilidade, caso ocorra dependência espacial nos valores das características de interesse.

#### VOLUME X NÚMERO DE AMOSTRAS DE SOLO

O volume das amostras simples de solo apresenta elevada influência sobre a representatividade da amostra composta formada (GUARÇONI et al., 2007, GUARÇONI; SOUZA; PAYE, 2019). Para os autores, quando se aumenta o volume das amostras simples para uma mesma profundidade de amostragem, variações a curtas distâncias na superfície do solo são incorporadas, reduzindo a variabilidade (coeficiente de variação – CV) da característica avaliada. Dessa forma, quanto menor a variabilidade da característica, menor o número de amostras simples será necessário para que se forme uma amostra composta representativa e vice-versa, de acordo com a clássica forma proposta por Cline (1944):  $n = (\alpha/2 CV/f)^2$ , em que “n” é o número de amostras a ser coletado para se formar uma amostra composta representativa; “ $\alpha/2$ ” é o valor tabelado da distribuição t de Student referente a 5 % de probabilidade e N-1 (sendo N o número de amostras utilizado na amostragem prévia); “CV” é o coeficiente de variação da característica de interesse, em %, e “f” é o desvio tolerado em torno da média, em %.

Utilizando dessa premissa, Guarçoni et al. (2007) determinaram modelos matemáticos que permitiram a definição do número de amostras simples de solo de acordo com a largura da fatia de solo a ser coletada ou com o diâmetro do trado a ser utilizado na coleta, visando formar amostras compostas representativas. Com os dados e as equações de Guarçoni et al. (2007), foram calculados os diâmetros de trado necessários

para se coletar definidos números de amostras simples, necessárias para se formar amostras compostas representativas, em duas situações de amostragem (Tabela 1).

**Tabela 1.** Diâmetros de trado a serem utilizados para a coleta de definido número de amostras simples de solo, visando formar amostras compostas representativas, em duas situações de amostragem

	Número de amostras simples					
	5	10	15	20	30	40
	Diâmetro do trado (cm)					
Implantação da lavoura	11,2	5,4	4,3	3,7	3,1	2,8
Lavouras implantadas	12,3	5,9	5,3	4,9	4,4	4,0

Fonte: Adaptado de Guarçoni et al. (2007).

Quando se realiza amostragem de solo em áreas com menor variabilidade de características químicas, como naquelas onde serão implantadas lavouras de interesse, pode-se utilizar trados com menores diâmetros para se coletar o número usual de amostras. Por outro lado, em lavouras já implantadas, especialmente perenes, o diâmetro do trado deve ser maior para que seja coletado o número usual de amostras (Tabela 1), devido à maior variabilidade nessa situação (Guarçoni et al., 2007).

#### LOCAL DE COLETA

Para determinação da fertilidade média, o local de coleta deve ser definido de forma completamente aleatória, em zigue-zague, mas com a preocupação de cobrir toda a área a ser amostrada (CANTARUTTI et al., 2007). Entretanto, locais que apresentam concentração de nutrientes, devido à aplicação de fertilizantes, devem ser considerados na hora da amostragem.

Alvarez V. e Guarçoni (2003) definiram, para o sistema plantio direto, a amostragem direcionada em relação aos sulcos de plantio da última cultura cultivada na área, onde está a maior concentração de nutrientes, da seguinte forma: 17 % das amostras simples coletadas no sulco de plantio, 33 % coleta-

das a 10 cm do sulco e 50 % coletadas no ponto médio entre sulcos. Para os autores, essa amostragem iria conferir maior representatividade à amostra composta formada, compatível à amostragem com pá de corte, frequentemente utilizada no sistema plantio direto. Essa mesma forma de amostragem foi testada por Oliveira et al. (2007), tendo sido comprovada sua eficácia em relação à amostragem completamente aleatória.

Para culturas perenes já implantadas, é recomendado que as amostras de solo sejam coletadas nos locais onde se realizou a última adubação, pois as concentrações de nutrientes contidos nesses locais apresentam maior correlação com a absorção e a produtividade desse tipo de cultura. Além disso, todo o processo de acidificação gerado pelas adubações nitrogenadas ocorre no local onde esta é realizada (PREZOTTI; GUARÇONI, 2013), sendo essencial a avaliação da necessidade de corrigir a acidez do solo nesse ponto, e não na entrelinha, por exemplo.

#### CALAGEM E GESSAGEM

Solos intemperizados, ácidos e pobres em nutrientes não permitem, em condições naturais, o bom desenvolvimento das plantas (RAIJ, 2011a). Nesse sentido, a acidez do subsolo gerada naturalmente pelo intemperismo é a principal causa da manutenção das raízes na camada superficial, impedindo o seu aprofundamento no perfil do solo, seja pelo efeito direto de íons  $H^+$ , pela toxidez de elementos como  $Al^{3+}$  ou pela baixa concentração de  $Ca^{2+}$  em subsuperfície (GUARÇONI; PREZOTTI, 2009).

Para tornar esse tipo de solo produtivo, deve-se promover a melhoria de sua fertilidade ao longo do perfil. É necessário, portanto, recompôr minimamente o perfil do solo, proporcionando desenvolvimento radicular, sobretudo, em profundidade e mantendo os nutrientes em formas disponíveis, no sentido de reduzir as perdas e elevar o status nutricional das plantas cultivadas. A melhoria da qualidade do solo em subsuperfície é fundamental, tanto ao se

considerar critérios ambientais quanto econômicos, uma vez que inúmeros trabalhos reportam maior produtividade de diversos tipos de culturas quando há aprofundamento do sistema radicular ao longo do perfil, como consequência de maior absorção de água e nutrientes.

#### CORREÇÃO E CONDICIONAMENTO DO SOLO

O calcário (corretivo:  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ ) e o gesso (condicionador:  $\text{CaSO}_4$ ), agindo conjuntamente, podem reduzir os efeitos da acidez e da baixa concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  ao longo do perfil do solo. Entretanto, as camadas nas quais esses insumos produzem seus benefícios são distintas. O calcário é praticamente imóvel no solo, devido à rápida reação do ânion acompanhante carbonato, que neutraliza o  $\text{H}^+$  covalentemente adsorvido aos sítios de ligação, liberando cargas negativas na superfície de troca, nas quais se ligam o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$ , o que reduz o efeito do calcário ao longo do perfil (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; RAIJ, 2011b). O gesso, por sua vez, apresenta elevada mobilidade, uma vez que o ânion acompanhante, nesse caso, o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), não é um receptor de prótons e não neutraliza o  $\text{H}^+$  covalentemente adsorvido. Assim, tanto o  $\text{Ca}^{2+}$  quanto o  $\text{SO}_4^{2-}$  são transportados em maiores quantidades para camadas mais profundas no solo (RAIJ, 2011b; RAMOS *et al.*, 2013).

Ao se aplicar o calcário e o gesso, ocorre correção da acidez do solo na camada superficial, promovida pelo calcário, e adequação do perfil do solo para desenvolvimento do sistema radicular em subsuperfície, ocasionada pelo gesso (PAULETTI *et al.*, 2014). Esses insumos proporcionam seguramente melhoria na fertilidade do solo, desde que aplicados de forma correta e na dose adequada.

A calagem, ou seja, a aplicação de calcário ao solo, pode diminuir a acidez, neutralizar elementos tóxicos em elevadas concentrações como  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , fornecer Ca e Mg, aumentar a saturação por bases (V) e a CTC efetiva do solo (CTCe), na camada superficial (PREZOTTI; GUARÇONI, 2013). Já a gessagem aumenta os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ , de S e reduz a possível toxidez do

$\text{Al}^{3+}$  nas camadas mais profundas, devido à formação de  $\text{AlSO}_4^+$ , sem, contudo, aumentar o pH. Também não é capaz de aumentar a V e a CTCe no tempo, de forma consistente, pois não desloca efetivamente os íons  $\text{H}^+$  ligados de forma covalente aos sítios de troca do solo (RAIJ, 2011b).

Todos esses efeitos são relevantes, mas, na calagem, os aumentos da V e da CTCe apresentam influência direta sobre a fertilidade do solo. Nesse sentido, Ronquim (2010) sugere classificação da fertilidade do solo baseada no valor de V. Para o autor, solos que apresentam  $V \geq 50\%$  seriam considerados férteis e denominados como “eutróficos”. Já solos que apresentam  $V < 50\%$  seriam pouco férteis e denominados como “distróficos”. Apesar dessa classificação não contemplar o conceito de solo fértil no sentido mais amplo do termo, pode ser considerada uma boa aproximação prática.

A CTC é a capacidade de troca catiônica do solo, ou seja, é a capacidade de reter cátions de forma eletrostática em sítios de ligação e trocá-los por cátions que estão na solução do solo, seguindo o princípio da preferencialidade de troca, bem definido na clássica série liotrópica:  $\text{H}^+ \gg \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ . A CTC do solo é dividida em dois tipos, de acordo com o pH no qual são determinadas. A CTC pH 7,0 (T) é a capacidade de troca de cátions do solo medida quando seu pH está em 7,0 ou próximo desse patamar, uma vez que o valor é subestimado quando se utiliza o método do acetato de amônio (BORTOLUZZI *et al.*, 2009) e quando se utiliza o método do acetato de cálcio (PREDEBON *et al.*, 2018).

A T é calculada fazendo-se a adição da soma de bases trocáveis do solo ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ) com a acidez potencial do solo ( $\text{H} + \text{Al}$ ). Em solos salinos, o  $\text{Na}^+$  é também acrescentado à soma de bases, mas na maioria das vezes esta é calculada pelo somatório de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ . A CTC pH 7,0 não é modificada pela calagem. Apenas o acréscimo de matéria orgânica ou outra fonte de cargas negativas ao solo pode aumentar a magnitude da CTC pH 7,0 (NOVAIS; MELLO, 2007).

A CTC efetiva (CTCe), que é diretamente afetada pela calagem, devido à predominância de cargas dependentes de pH em solos intemperizados (LEPSCH, 2010), é calculada pela adição da soma de bases trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ) com a acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ), no pH “real” apresentado pelo solo. É na CTCe que os nutrientes catiônicos são retidos, uma vez que a CTC pH 7,0 apresenta um valor potencial e não real. A retenção de nutrientes catiônicos à CTC do solo, de forma eletrostática e por isso mesmo trocável com cátions que se encontrem em solução, reduz as perdas desses nutrientes por lixiviação ou mesmo por volatilização, como seria o caso do nitrogênio, segundo Gurgel et al. (2016), que tende a ser perdido para a atmosfera na forma de amônia. A CTC é essencial para a manutenção da fertilidade do solo e para sua sustentabilidade em relação ao tempo (NOVAIS; MELLO, 2007).

O calcário, por ser um corretivo, libera  $\text{OH}^-$  na solução do solo. Assim, os íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  presentes nas superfícies de adsorção vão sendo neutralizados, permitindo que  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , oriundos do calcário, ocupem seu lugar na CTCe. Nos solos agrícolas, o limite máximo de aumento da CTCe é o valor da CTC pH 7,0, pois, acima desse valor, o pH do solo tende a ser maior do que 7,0, o que, para Melo et al. (2011), reduz a disponibilidade de diversos nutrientes, especialmente de micronutrientes metálicos.

A saturação por bases (V), a seu turno, apresenta elevada correlação com o pH do solo, sendo essa característica relatada em diversos trabalhos, antigos (RAIJ; SACCHETTO; IGUE, 1968, RAIJ; CATARELLA; ZULLO, 1979; RAIJ et al., 1983) ou mais recentes (GUARÇONI, 2017; PREDEBON et al., 2018). Como o calcário fornece Ca e Mg e gera  $\text{OH}^-$ , que reduz a acidez e conseqüentemente eleva o pH ( $\text{pH} = 1/\log[\text{H}^+]$ ), promove o aumento concomitante da V, da CTCe e do pH. Já o gesso é capaz apenas de aumentar, por algum tempo, a saturação de Ca na CTCe, pois, em elevada concentração, o Ca é capaz de deslocar inclusive o  $\text{Al}^{3+}$  da superfície de troca, mas não o  $\text{H}^+$ .

## NECESSIDADE DE CALAGEM

Para que os benefícios da aplicação de calcário sejam alcançados em sua plenitude, a necessidade de calagem (NC), que é na prática a quantidade de calcário (PRNT 100 %) a ser aplicada na superfície de um hectare (10.000  $\text{m}^2$ ) e incorporada até 0,20 m de profundidade no solo (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007), deve ser calculada de forma criteriosa.

Um dos métodos de cálculo da necessidade de calagem (NC) mais utilizados, sendo inclusive recomendado para o Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2007), é o da Saturação por Bases (SatB) (RAIJ et al., 1983), em que  $\text{NC} = \text{T} (\text{Ve} - \text{Va})/100$ , sendo NC a necessidade de calagem (t/ha); T a CTC pH 7,0 ( $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ ); Ve a saturação por bases ideal para determinada cultura (%); e Va a saturação por bases atual do solo (%), revelada na análise de solo. Esse método é baseado na relação existente entre a saturação por bases (V) e a acidez ativa do solo (pH), sendo representado pelo clássico modelo  $\text{pH} = 4,50 + 0,025\text{V}$ , apresentado por Raij, Catarella e Zullo (1979). Esse modelo foi extrapolado de diversas equações apresentadas por Raij, Sacchetto e Igue (1968), sendo, na verdade, uma “média” dessas equações. Portanto, não é adequado para todas as situações ou tipos de solo existentes, uma vez que a intensidade de correlação entre a V e a acidez ativa (pH) se modifica constantemente, como comprovam, entre outros, os trabalhos de Corrêa et al. (2007), Silva et al. (2007), Nicolodi, Anghinoni e Gianello (2008) e Guarçoni (2017).

Assim, pode-se inferir que, para uma mesma Ve (específica para cada cultura), valores de pH e teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  completamente diferentes serão alcançados de acordo com o tipo de solo trabalhado. Tal inferência já foi diversas vezes comprovada na prática por grande número de profissionais da área e agricultores.

Baseado nessa premissa, Guarçoni (2017) propôs que a V esperada (Ve) para determinada cultura seja variável de acordo com o tipo de solo, mais especificamente com o valor da CTC pH 7,0. Esse autor comparou 599 laudas de análises de solo e encontrou

padrões da relação entre V e pH variáveis de acordo com a CTC pH 7,0 do solo, sendo estimados modelos de correlação para três faixas de CTC pH 7,0 (T): T classificada como baixa ( $TBa \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), média ( $4,30 < TM \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e boa ( $8,60 < TBo \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), de acordo com Alvarez V. et al. (1999b). Definiu ainda, como adequado para cultivo, o pH do solo em torno de 6,0 e calculou o valor de Ve que deveria ser empregado em cada uma das faixas de CTC pH 7,0, para que esse pH fosse atingido (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores de Saturação por Bases esperada (Ve) a serem utilizados no método de saturação por bases para cálculo da necessidade de calagem, visando atingir pH do solo em torno de 6,0, de acordo com a classe de CTC pH 7,0 do solo

Classe de T	Faixa ( $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ )	Ve (%)
Boa	$8,60 < TBo \leq 15,00$	60
Média	$4,30 < TM \leq 8,60$	70
Baixa	$TBa \leq 4,30$	80

Fonte: Adaptado de Guarçoni (2017).

Para valores de CTC pH 7,0 acima de  $15 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , como é o caso de solos com elevada concentração de turfa do Espírito Santo, o autor relata que o método da saturação por bases pode recomendar doses de calcário muito elevadas, devido à capacidade tampão desse tipo de solo, o que tenderia a causar rápida e excessiva oxidação do carbono, podendo gerar inclusive queimadas ocasionais. Nesse caso, é provável que o suprimento de Ca e Mg para as plantas seja o único critério a ser considerado, e não a efetiva correção da acidez. Para isso, pode-se lançar mão da segunda parte da fórmula de cálculo da necessidade de calagem utilizada em Minas Gerais, ou seja, o método da neutralização do  $\text{Al}^{3+}$  e elevação dos teores de Ca e Mg (ALVAREZ V.; RIBEIRO, 1999), sendo  $NC = (Y \times \text{Al}^{3+}) + [X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]$ , em que Y é um fator de correção baseado na capacidade tampão do solo e X é a necessidade da cultura em Ca+Mg. Esse método incorpora na mesma fórmula a neutralização da acidez trocável e o suprimento de Ca e Mg para as plantas e, exatamente por isso,

pode recomendar doses de calcário acima das adequadas, podendo causar supercalagem, como relatado por Guarçoni e Sobreira (2017). De qualquer modo, a segunda parte da fórmula [ $X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ] deve ser utilizada quando se visa apenas o suprimento de Ca e Mg.

No trabalho de Guarçoni (2017), por outro lado, ficou claro que mesmo utilizando valores de Ve mais elevados, o suprimento de Ca e Mg via calagem pode não ser suficiente para atingir a concentração adequada às culturas, caso o solo apresente CTC pH 7,0 muito baixa. Nesse caso, pode ser utilizado o algoritmo proposto por Guarçoni e Sobreira (2017), visando adequado suprimento de Ca e Mg para as plantas, via calagem. Devido à sua conformação, o algoritmo proposto pelos autores pode ser denominado como “Método da Saturação por Bases com garantia de suprimento de Ca e Mg”. Esse método pode ser utilizado realizando-se os quatro passos de cálculo apresentados abaixo (Adaptado de Guarçoni e Sobreira, 2017):

- 1) Calcular a NC pelo método da Saturação por Bases, utilizando os valores de Ve propostos por Guarçoni (2017). Será gerada a dose **D1** (t/ha).
- 2) Comparar a dose D1 com [ $X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ]; se o valor de D1 for maior, aplicar D1 em t/ha, se for menor, aplicar [ $X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ] em t/ha, sendo esta caracterizada como dose **D2**.
- 3) Comparar o valor de D2 com H+Al (em  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ ); se o valor de D2 for menor, aplicar D2, se for maior, aplicar o valor de H+Al em t/ha, sendo gerada a dose **D3**. (Nesse caso, ficará faltando parte da dose de calcário necessária para suprir Ca e Mg. Assim, sugere-se o parcelamento do calcário).
- 4) Parcelamento para aplicar, após três meses e localizadamente, o restante da dose definida em D2: (**D4** (t/ha) = D2 - D3).

Com o algoritmo sugerido por Guarçoni e Sobreira (2017), haveria garantia de suprimento de Ca e Mg para as plantas, com reduzida possibilidade de ocorrer supercalagem. Tendo sido calculada a necessidade de calagem que melhor se adequaria aos diversos tipos de solos e culturas, restaria definir a quantidade de calcário a ser aplicada e o tipo de calcário a ser utilizado.

Para calcular a quantidade de calcário a ser aplicada, pode-se utilizar a fórmula apresentada por Alvarez V. e Ribeiro (1999):  $QC = NC \times (SC/100) \times (PF/20) \times (100/PRNT)$ ; em que:

QC = Quantidade de calcário a ser aplicada em um hectare (t/ha);

NC = Necessidade de calagem calculada previamente (t/ha);

SC = Superfície a ser coberta com o calcário (%);

PF = Profundidade efetiva de incorporação do calcário (cm; para aplicação em cobertura utilizar PF = 10 cm);

PRNT = Poder relativo de neutralização total do calcário (%).

Se a aplicação for realizada em covas, deve-se corrigir a quantidade a ser aplicada para o volume efetivo da cova, utilizando a seguinte fórmula:  $QCc = NC \times (Volc/2) \times (100/PRNT)$ ; em que:

QCc = Quantidade de calcário a ser aplicada na cova de plantio (g/cova);

NC = Necessidade de calagem calculada previamente (t/ha);

Volc = Volume da cova (dm<sup>3</sup>);

PRNT = Poder relativo de neutralização total do calcário (%).

Se for em sulco, basta multiplicar QCc x 2,5, ficando o resultado em g/m.

Como os solos brasileiros apresentam geralmente baixos teores de magnésio, na maioria das vezes será necessária a aplicação de calcário dolomítico, uma vez que este contém, no mínimo, 12 % de MgO. A reatividade do calcário deve ser definida de acordo

com o ciclo da cultura. Se for uma cultura de ciclo curto, ou se a aplicação for realizada em covas ou sulcos, deve ser preferido um calcário de maior reatividade. Contudo, se for uma cultura perene, para aplicação a lanço, sem incorporação, recomenda-se a utilização de um calcário de menor reatividade que, por sua vez, irá apresentar maior efeito residual.

Com a quantidade e o tipo de calcário definidos, resta o cálculo da dose de gesso a ser aplicada, visando o melhor distribuição das raízes no perfil do solo.

### GESSAGEM

A prescrição de gesso, a seu turno, deve ser realizada de acordo com os teores de Ca<sup>2+</sup>, de Al<sup>3+</sup> ou com os valores de saturação por alumínio (m) presentes na camada de solo a ser condicionada. Certamente esses valores irão se modificar de acordo com o tipo de solo, a tolerância à toxidez de Al<sup>3+</sup> e com a necessidade de Ca para o crescimento radicular da cultura de interesse. Devido a isso, as literaturas não são unânimes quanto a essas condições (Tabela 3).

**Tabela 3.** Condições de subsolo para as quais é recomendada a aplicação de gesso

Autores	Teor de Ca <sup>2+</sup>	Teor de Al <sup>3+</sup>	Valor de m
	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	%
Alvarez V. et al. (1999a)	≤ 0,4	> 0,5	> 30
Raij (2011b)	< 0,4	-	> 40
Sousa, Lobato e Rein (2005)	< 0,5	-	> 20
Conilon (Condição proposta)	≤ 0,5	≥ 0,4	> 25

Em relação à necessidade de Ca, as literaturas recomendam praticamente o mesmo limite mínimo. No caso do café conilon, devido à elevada necessidade de Ca (GUARÇONI, 2016), recomenda-se o limite mínimo de 0,5 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de Ca, sendo este, portanto, o limite recomendado (Tabela 3). Para a saturação por alumínio (m), os valores estabelecidos são conflitantes entre as literaturas. Para o café conilon, que é menos tolerante à toxidez de Al<sup>3+</sup> do que o café

arábica (GUARÇONI, 2016), recomenda-se um limite máximo de 0,4 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de Al<sup>3+</sup> e saturação por Al<sup>3+</sup> de no máximo 25 % (Tabela 3).

Vale ressaltar que a decisão de se utilizar o gesso, ou não, deve ser tomada com base em apenas uma das características indicativas da necessidade de gessagem, não em seu conjunto. Se uma delas for satisfeita, recomenda-se a aplicação de gesso.

Existem diferentes métodos para recomendação da necessidade de gessagem (NG), ou seja, a dose de gesso a ser aplicada para fornecer Ca, S e reduzir a toxidez de Al<sup>3+</sup> em camadas subsuperficiais do solo, sendo alguns deles apresentados na Tabela 4. Esses métodos de recomendação se baseiam no teor de argila do solo, na saturação de Ca<sup>2+</sup> na CTCe do solo ou mesmo na necessidade de calagem (NC).

**Tabela 4.** Métodos de recomendação da necessidade de gessagem (NG)

Autores	Método	Aplicação
Alvarez V. et al. (1999a)	$NG = 0,034 - 0,02445 \text{ Arg}^{0,5} + 0,0338886 \text{ Arg} - 0,00176366 \text{ Arg}^{1,5}$	t/ha
Sousa, Miranda e Oliveira (2007) <sup>1/</sup>	$NG = f \times \text{Teor de Argila (\%)}$	t/ha
Prezotti et al. (2007) <sup>2/</sup>	$NG = 0,3 \times \text{NC}$	t/ha
Malavolta (2006)	$NG = [0,4 \times (\text{CTCe} - \text{teor de Ca}^{2+} \text{ cmol}_c/\text{dm}^3)] \times 2,5$	t/ha
Caires e Guimarães (2016)	$NG = [0,6 \times (\text{CTCe} - \text{teor de Ca}^{2+} \text{ em cmol}_c/\text{dm}^3)] \times 6,4$	t/ha
Método proposto	$NG = [0,6 \times (\text{CTCe} - \text{teor de Ca}^{2+} \text{ em cmol}_c/\text{dm}^3)] \times 2,5$	t/ha

<sup>1/</sup> O fator f depende do tipo de cultura: 0,050 para cultura anual ou 0,075 para cultura perene; <sup>2/</sup> NC é a necessidade de calagem calculada com base na amostra de 20-40 cm de profundidade, não sendo efetivamente aplicada (serve apenas para calcular a NG).

Para ilustrar a magnitude de recomendação dos diferentes métodos, foram calculadas as necessidades de gessagem (NG) (Tabela 5) para o subsolo (20 a 40

cm) de uma área cultivada com café conilon, cujo resultado analítico se encontra na Tabela 6.

**Tabela 5.** Cálculo das necessidades de gessagem (NG) de acordo com diferentes métodos propostos

Autores	Método	Dose (t/ha)
Alvarez V. et al. (1999a)	$NG = 0,034 - 0,02445 \text{ Arg}^{0,5} + 0,0338886 \text{ Arg} - 0,00176366 \text{ Arg}^{1,5}$	1,2
Sousa, Miranda e O liveira (2007) <sup>1/</sup>	$NG = f \times \text{Teor de Argila (\%)}$	5,2
Prezotti et al. (2007)	$NG = 0,3 \times \text{QC}$	0,6
Malavolta (2006)	$NG = [0,4 \times (\text{CTCe} - \text{teor de Ca}^{2+} \text{ cmol}_c/\text{dm}^3)] \times 2,5$	2,1
Caires e Guimarães (2016)	$NG = [0,6 \times (\text{CTCe} - \text{teor de Ca}^{2+} \text{ em cmol}_c/\text{dm}^3)] \times 6,4$	8,1
Método proposto	$NG = [0,6 \times (\text{CTCe} - \text{teor de Ca}^{2+} \text{ em cmol}_c/\text{dm}^3)] \times 2,5$	3,2

<sup>1/</sup> f = 0,50 para cultura anual ou 0,75 para cultura perene (utilizou-se no cálculo 0,075).

**Tabela 6.** Amostra de subsolo (20 a 40 cm) de área cultivada com café conilon

pH	MO	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	CTCe	T	m	Arg
H <sub>2</sub> O	dag/kg	mg/dm <sup>3</sup>				----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> -----				----- % -----	
4,5	1,0	4,0	37,0	0,5	0,4	1,6	4,0	2,6	5,0	62,0	69,0

Os valores calculados são muito discrepantes, partindo de 0,6 t/ha de gesso, ao se utilizar o método de Prezotti et al. (2007), até 8,1 t/ha de gesso, utilizando-se o método de Caires e Guimarães (2016) (Tabela 5). A proposta de Caires e Guimarães (2016) de aumentar até 60 % a saturação de Ca na CTCe pode ser definida como adequada, mas há a consideração dos autores de que seriam necessárias 6,4 toneladas de gesso para aumentar o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  no subsolo (20 a 40 cm) em  $1 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ . Esse valor é real, mas para solos onde está consolidado o sistema plantio direto. Para condições de cultivo convencional, a proposta de Malavolta (2006) de que seriam necessárias 2,5 toneladas de gesso para aumentar o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  no subsolo (20 a 40 cm) em  $1 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$  parece mais plausível. A partir disso, foi proposto um método de cálculo da necessidade de gessagem no qual se pretende aumentar a saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  na CTCe até 60 %, mas utilizando 2,5 toneladas de gesso para aumentar o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  no subsolo (20 a 40 cm) em  $1 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ . O método proposto parece ser mais equilibrado e condizente com os solos do Espírito Santo e o manejo adotado no Estado, uma vez que recomenda doses intermediárias entre os extremos calculados (Tabela 5).

O gesso pode ser aplicado junto com o calcário, mas é preferível que seja após sua adição, visando aumentar previamente a CTCe do solo na camada superficial. Aplica-se a quantidade de calcário calculada para a camada de 0-20 cm e a quantidade de gesso calculada para a camada subsuperficial. O gesso pode ser aplicado em cobertura, sem necessidade de incorporação, pois é muito móvel no solo. Se não houver necessidade de calagem para a camada superficial, pode-se aplicar apenas o gesso, mas essa condição deve ser revista anualmente.

#### USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES (MANEJO 4C)

Futuros aumentos na produção de alimentos terão que ocorrer concomitantemente com a expansão limitada de terra, e isso só será realizado por meio da intensificação da produção agropecuária sustentável (FAO, 2011). Entende-se isso como o aumento da

produção total em uma mesma unidade de área ou, ainda, a manutenção da produção com uso racional de fertilizantes.

Aplicar a fonte certa, na dose certa, na época certa, e no lugar certo (Manejo 4C) é o fundamento para o uso eficiente dos fertilizantes, necessário para o manejo sustentável da nutrição das plantas e para o aumento da produtividade das culturas. O manejo correto dos fertilizantes tem como principal propósito adequar a oferta de nutrientes à necessidade das culturas e minimizar as perdas no campo.

Bruulsema et al. (2008) apresentam o quadro global que ilustra a prática dos 4Cs e como eles se integram aos outros fatores agrônômicos relacionados ao manejo da cultura, os quais, em conjunto, contribuem decisivamente para a sustentabilidade econômica, social e ambiental da atividade agrícola (Figura 1).



**Figura 1.** Diagrama geral para o manejo adequado de nutrientes.

Fonte: Adaptado de Bruulsema et al. (2008).

De forma geral, os princípios científicos universais relevantes para cada um dos 4Cs e as práticas associadas à sua aplicação estão listados a seguir (BRUULSEMA; FIXEN; SULEWSKI, 2012):

**FONTE CERTA**

A escolha da fonte fertilizante está conjugada com a necessidade da cultura e as propriedades e características do solo. Sempre atentar para as interações e o equilíbrio entre os nutrientes, de maneira a ter uma adubação equilibrada.

A seleção da fonte certa de fertilizante começa com a determinação de quais nutrientes são realmente necessários para cumprir as metas de produção. As fontes de fertilizantes podem ser de vários tipos: misturas (fertilizantes granulados ou mistura de grânulos), compostos fertilizantes, fertilizantes fluidos, suspensões de fertilizantes, materiais polímeros e formas orgânicas (compostos orgânicos e esterco). A utilização de fontes que apresentam liberação lenta ou controlada dos nutrientes pode garantir a manutenção de um sincronismo entre a liberação de nutrientes ao longo do tempo e as necessidades nutricionais da planta, favorecendo o crescimento e desenvolvimento, além de reduzir gastos com mão de obra e energia. Também é útil na redução das perdas de nutrientes por erosão e da contaminação dos recursos hídricos.

**DOSE CERTA**

O ajuste da quantidade de fertilizante a ser aplicada com a necessidade da cultura é o caminho para evitar a deficiência nutricional da planta, promovendo maior rendimento e qualidade das culturas.

Avaliar o teor de nutrientes disponíveis no solo é o primeiro passo para determinar a dose certa de fertilizante a ser aplicada. A dose certa está condicionada à fonte, à época e ao local de aplicação. A fonte de nutrientes precisa liberar a quantidade certa de formas disponíveis no momento certo e no lugar certo para atender às necessidades das plantas em crescimento.

Metas realistas de produção, análise de solo, ensaios com omissão de nutrientes, balanço de nutrientes, análise de tecidos, análise de plantas, aplicadores regulados de forma adequada, aplicação de fertilizantes em taxa variável, acompanhamento das áreas de produção, histórico da área e

planejamento do manejo de nutrientes ajudam a determinar a melhor dose de fertilizante a ser aplicada.

**ÉPOCA CERTA**

Disponibilizar os nutrientes para as culturas nos períodos de necessidade permite maior efetividade entre a disponibilidade e a demanda da cultura.

A dinâmica da absorção de nutrientes pela cultura varia de acordo com o nutriente e com as condições ambientais. Dessa forma, a taxa de absorção de nutrientes pelas plantas varia durante todo o período de crescimento. Aplicações programadas e orientadas pelas fases fenológicas das plantas podem ser benéficas à produtividade e/ou qualidade do produto, em alguns sistemas de produção e para alguns nutrientes, principalmente nitrogênio. Aplicações temporizadas, uso de fertilizantes de disponibilidade controlada e uso de inibidores da urease e da nitrificação são boas práticas de manejo de fertilizantes que ajudam a reduzir os impactos ambientais da perda de nutrientes do solo.

**LOCAL CERTO**

A aplicação dos nutrientes no local correto, onde as culturas podem absorvê-los, é decisiva na eficiência de uso do fertilizante.

Cultura, sistema de cultivo e propriedades e características do solo determinam o método mais adequado de aplicação, mas a incorporação do fertilizante normalmente é a melhor opção para manter os nutrientes no local e aumentar sua eficiência. Manejo conservacionista, curvas de nível, culturas de cobertura e manejo da irrigação são outras boas práticas que ajudarão a manter os nutrientes bem localizados e acessíveis às culturas em desenvolvimento.

## **TENDÊNCIAS GERAIS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA NO USO DE NUTRIENTES**

### **USO DE FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA E USO DE INIBIDORES DA NITRIFICAÇÃO E DA UREASE**

Esses insumos permitem melhor sincronia entre a disponibilização de nutrientes pelo fertilizante em relação à demanda pelas plantas durante seu crescimento. Os fertilizantes de liberação controlada apresentam um revestimento no grânulo que reduz a entrada de água e conseqüentemente a solubilização do fertilizante. Já os fertilizantes com inibidores apresentam em sua formulação componentes químicos que reduzem as reações no solo, diminuindo a hidrólise da ureia ou a passagem de amônio para nitrato no solo. Ambos os tipos de fertilizantes são mais utilizados para reduzir a perda de N do sistema, seja por volatilização ou por lixiviação.

### **FERTILIZANTES LÍQUIDOS**

Esses fertilizantes são constituídos por soluções ou suspensões de nutrientes. Sua aplicação tende a ser vantajosa para fertilizantes que contêm nutrientes passíveis de volatilização (N) ou adsorção/precipitação (P e micronutrientes metálicos). Apesar de representarem um fator de economia em termos de mão de obra, a baixa concentração de nutrientes nesse tipo de fertilizante pode ser um impeditivo para sua utilização em mais larga escala, uma vez que podem ser antieconômicos.

### **FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS**

São formados pela mistura de fertilizantes minerais e orgânicos, na qual se pretende aproveitar os efeitos benéficos de ambos, ou seja, a maior concentração de nutrientes do fertilizante mineral e a melhoria nas características físicas do solo e na atividade biológica promovida pelo fertilizante orgânico. Contudo, o efeito aditivo, e muitas vezes sinérgico, advindo dos fertilizantes organominerais, deve ser considerado a partir de minucioso acompanhamento econômico.

## **PLANTIO DIRETO E ROTAÇÃO/SUCESSÃO DE CULTURAS**

O sucesso do sistema plantio direto está alicerçado na rotação de culturas, devido aos inúmeros benefícios que proporciona para a qualidade do solo e produtividade dos cultivos comerciais. O aumento da matéria orgânica e a melhoria da fertilidade do solo destacam-se como os principais componentes para a manutenção e a longevidade desse sistema de cultivo.

### **USO DE CULTIVARES MELHORADAS**

A identificação de populações de plantas que apresentam capacidade de absorver e utilizar o nutriente de forma mais eficiente é extremamente importante, pois possibilita a redução dos custos de produção, a utilização de menor quantidade de nutrientes e a conservação do agroecossistema.

## **PRÁTICAS DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA NO USO DE FERTILIZANTES**

A adubação necessita satisfazer a exigência da planta para a geração de adequada produção, complementando a contribuição do solo. Para a sustentabilidade da fertilidade do solo, a adubação deve, pelo menos, compensar as quantidades de macro e micronutrientes exportadas com o produto colhido e mais aquelas irremediavelmente perdidas do solo (erosão, lixiviação e volatilização). No Quadro 1, são apresentadas diversas medidas destinadas a aumentar a eficiência de uso de alguns macronutrientes (MALAVOLTA, 1996).

**Quadro 1.** Práticas destinadas a aumentar a eficiência da adubação e evitar excessos antieconômicos e possível contaminação do ar, da água e do solo

Adubo	Medida	Efeito ou Consequência
NPK	(1) Análise de solo - superfície e subsuperfície	(1) Determina a dose adequada
	(2) Análise foliar	(2) Ajuste e acompanhamento do estado nutricional
	(3) Controle da erosão	(3) Evita perdas de solo e de nutrientes
	(4) Espécies e variedades eficientes e responsivas	(4) Absorção em baixas concentrações, resposta a doses, maior conversão do adubo em produto agrícola
N	(1) Calagem e gessagem	(1) Mais raízes, maior aproveitamento
	(2) Fracionamento, incluindo fertirrigação	(2) Menores perdas por lixiviação e volatilização, maior aproveitamento
	(3) Inibidores da urease e da nitrificação	(3) Diminuição de perdas por volatilização e lixiviação, maior aproveitamento
	(4) Produtos de liberação lenta	(4) Melhor aproveitamento
	(5) Adubação verde e ciclagem de resíduos	(5) Evita desperdício, economiza fertilizante mineral e melhora as propriedades físicas do solo
P	(1) Calagem	(1) Menor fixação de nutrientes, menores doses de fertilizante
	(2) Gessagem	(2) Raízes mais profundas, maior aproveitamento do fertilizante
	(3) Localização	(3) Maior contato com raízes e menor com sesquióxidos
	(4) Micorrizas	(4) Maior aproveitamento do fertilizante (maior superfície de contato)
K	(1) Calagem	(1) Mais sítios de troca em solos com carga dependente de pH, menor lixiviação
	(2) Gessagem	(2) Raízes mais profundas, maior aproveitamento do fertilizante
	(3) Localização	(3) Menor concentração salina
	(4) Fracionamento	(4) Plantio e coberturas

Fonte: Malavolta (1996).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O incremento ou, no mínimo, a manutenção da fertilidade dos solos é fundamental para a sustentabilidade da produção agropecuária, considerando os pilares econômico, ambiental e social. Importante destacar que as práticas a serem utilizadas para a garantia dessa sustentabilidade não são, em sua essência, inovadoras, mesmo que algumas novas descobertas tenham aumentado sua eficiência. O avanço é trabalhar as tecnologias disponíveis de forma integrada, alcançando resultado mais do que aditivo.

Amostragem e análise de solo, seja para determinação da fertilidade média, seja para a confecção de

mapas de fertilidade, sistemas de cultivo e manejo de solos mais conservacionistas, manejo minucioso da calagem, da gessagem e o uso eficiente de fertilizantes de qualquer natureza, são algumas das práticas que devem ser utilizadas para incrementar ou manter a fertilidade dos solos em níveis adequados à nutrição de plantas, visando produção compatível com a demanda crescente de alimentos pela população mundial.

Não nos parece indissociável a possibilidade de preservar adequadamente o ambiente e produzir quantidade suficiente de alimentos, de forma que a sociedade como um todo se beneficie, com lucro para quem produz e preço justo para quem consome. Para tanto, devemos pautar cada vez mais as nossas

ações em fatos científicos, tratando o folclore que tem envolvido a produção agropecuária sustentável como o que ele efetivamente é: “um conjunto de tradições e manifestações populares constituído por lendas e mitos”.

## REFERÊNCIAS

- ACAR, M.; CELIK, I.; GÜNAL, H. Effects of long-term tillage systems on aggregate-associated organic carbon in the eastern Mediterranean region of Turkey. **Eurasian Journal Soil Science**, v. 7, n. 1, p. 51-58, 2018.
- ADIMASSU, Z.; ALEMU, G.; TAMENE, L. Effects of tillage and crop residue management on runoff, soil loss and crop yield in the Humid Highlands of Ethiopia. **Agricultural Systems**, v. 168, n. 1, p. 11-18, 2019.
- ALVAREZ V., V. H.; GUARÇONI, A. Variabilidade horizontal da fertilidade do solo de uma unidade de amostragem em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 297-310, 2003.
- ALVAREZ V., V. H.; DIAS, L. E.; RIBEIRO, A. C.; SOUZA, R. B. Uso de gesso agrícola. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999a. cap. 10, p. 67-78.
- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. cap. 8, p. 43-60.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999b. cap. 5, p. 25-32.
- ANDERSON-COOK, C. M.; ALLEN, M. M.; NOBLE, R.; KHOSLA, E. R. Phosphorus and potassium fertilizer recommendation variability for two mid-Atlantic Coastal plain fields. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 1740-1747, 1999.
- ARMENGOT, L.; BERNER, A.; BLANCO-MORENO, J.; MÄDER, P.; SANS, F. X. Long-term feasibility of reduced tillage in organic farming. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, p. 339-346, 2015.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164-200, 2018.
- BOGUNOVIC, I.; PEREIRA, P.; KISIC, I.; SAJKO, K.; SRAKA, M. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). **Catena**, v. 160, p. 376-384, 2018.
- BORTOLUZZI, E. C.; RHEINHEIMER, D. S.; PETRY, C.; KAMINSKI, J. Contribuição de constituintes de solo à capacidade de troca de cátions obtida por diferentes métodos de extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 507-515, 2009.
- BOTTINELLI, N.; JOUQUET, P.; CAPOWIEZ, Y.; PODWOJEWSKI, P.; GRIMALDI, M.; PENG, X. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? **Soil & Tillage Research**, v. 146, p. 118-124, 2015.
- BRUS, D. J.; GRUIJTER, J. J. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil. **Geoderma**, v. 80, n. 2, p. 1-44, 1997.
- BRUULSEMA T.; WITT, C.; GARCIA, F.; LI, S.; RAO, T. N.; CHEN, F.; IVANOVA, S. A. Global framework for fertilizer BMPs. **Better Crops**, v. 92, n. 2, p. 13-15, 2008.
- BRUULSEMA, T. W.; FIXEN, P. E.; SULEWSKI, G. D. (Ed.). **4R Plant nutrition manual: a manual for improving the management of plant nutrition, metric version**. Norcross: International Plant Nutrition Institute, 2012.
- BURROUGH, P. A. Sampling designs for quantifying map unit composition. In: MUSBACH, M. J.; WILDING, L. P. (Ed.). **Spatial variabilities of soil and landforms**. Madison: SSSA, p. 89-126, 1991. Special Publication (Nº 28).
- CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. **Recomendação de gesso para solos sob plantio direto da região sul do Brasil**. In: FERTBIO, 2016. Goiânia. 2016.
- CANTARELLA, H.; DUARTE, A. P.; ANDRADE, C. A. Manejo de nitrogênio e matéria orgânica em milho no sistema plantio direto. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (Ed.). **Milho: tecnologia & produção**. Piracicaba: ESALQ/USP/LVP, 2005. p. 59-82.
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 13. p. 769-850.
- CHEN, H.; LI, X.; HU, F.; SHI, W. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 19, p. 2956-2964, 2013.
- CLINE, M. G. Principles of soil sampling. **Soil Science**, v. 58, p. 275-288, 1944.
- COLECCHIA, S. A.; RINALDI, M.; DE VITA, P. Effects of tillage systems in durum wheat under rainfed Mediterranean conditions. **Cereal Research Communications**, v. 43, p. 704-716, 2015.
- COOPER, J.; BARANSKI, M.; STEWART, G.; NOBEL-DE LANGE, M.; BÄRBERI, P.; FLIEßBACH, A.; PEIGNÉ, J.; BERNER, A.; BROCK, C.; CASAGRANDE, M.; et al. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, p. 1-22, 2016.

- COPEC, K.; FILIPOVIC, D.; HUSNJAK, S.; KOVACEV, I.; KOSUTIC, S. Effects of tillage systems on soil water content and yield in maize and winter wheat production. **Plant, Soil and Environment**, v. 61, p. 213-219, 2015.
- CORRÊA, J. B.; REIS, T. H. P.; POZZA, A. A. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; CARVALHO, J. G. Índice de saturação por bases na nutrição e na produtividade de cafeeiros catuaí vermelho (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, v. 2, n. 2, p. 159-167, 2007.
- CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D.; MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N.; JESUS, H. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1207-1216, 2011.
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; CONTE, O.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; OLIVEIRA, M. C. N. **Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 72 p.
- DELAUNE, P. B.; SIJ, J. W.; KRUTZ, L. J. Impact of soil aeration on runoff characteristics in dual-purpose no-till wheat systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 68, p. 315-324, 2013.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Trajatória da agricultura brasileira**. 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>>. Acesso em: 12 abr. 2019.
- FAO. **Food and Agriculture Organization** of the United Nations. **Sustainable crop production intensification**. Rome, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/agriculture/crops/core-themes/theme/spi/scpi-home/framework/en/>>. Acesso em: 25 ago. 2012.
- FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L. de; PEREIRA, V. A.; GUARÇONI, R. C. Desempenho de máquinas e implementos para manejo de palhas e plantio direto na agricultura orgânica. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 8, p. 44-51, 2018.
- FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, M. C.; GUARÇONI, R. C. Crescimento e produtividade do milho-verde sobre diferentes coberturas de solo no sistema plantio direto orgânico. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p. 497-506, 2016.
- FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L.; Galvão, J. C. C.; Souza, M. C.; GUARÇONI, R. C. Atributos químicos do solo sobre diferentes plantas de cobertura no sistema plantio direto orgânico. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 5, p. 19-28, 2015.
- FAVARATO, L. F.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, J. L.; SOUZA, M. C.; GUARÇONI, R. C.; CUNHA, D. N. Population density and weed infestation in organic no-tillage corn cropping system under different soil covers. **Planta Daninha**, v. 32, p. 739-746, 2014.
- FENG, J.; LI, F.; ZHOU, X.; XU, C.; JI, L.; CHEN, Z.; FANG, F. Impact of agronomy practices on the effects of reduced tillage systems on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from agricultural fields: a global meta-analysis. **PLoS ONE**, v. 13, n. 5, p. 1-17, 2018.
- FREITAS, L. de; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S. FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista UNIMAR Ciências**, v. 6, p. 8-25, 2017.
- GUARÇONI, A. **Reflexões sobre nutrição e adubação do cafeeiro**. Curitiba: Editora Prismas, 2016. 167 p.
- GUARÇONI, A. Saturação por bases para o cafeeiro baseada no pH do solo e no suprimento de Ca e Mg. **Coffee Science**, v. 12, n. 3, p. 327 - 336, 2017.
- GUARÇONI, A.; ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; CANTARUTTI, R. B.; LEITE, H. G.; FREIRE, F. M. Definição da dimensão do indivíduo solo e determinação do número de amostras simples necessário à sua representação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 943-954, 2006.
- GUARÇONI, A.; ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; CANTARUTTI, R. B.; LEITE, H. G.; FREIRE, F. M. Diâmetro de trado necessário à coleta de amostras num Cambissolo sob plantio direto ou sob plantio convencional antes ou depois da aração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 947-959, 2007.
- GUARÇONI, A.; ALVAREZ V., V. H.; SOBREIRA, F. M. Fundamentação teórica dos sistemas de amostragem de solo de acordo com a variabilidade de características químicas. **Terra Lationoamericana**, v. 35, n. 4, p. 343-352, 2017.
- GUARÇONI, A.; SOBREIRA, F. M. Classical Methods and Calculation Algorithms for Determining Lime Requirements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v. 41, e0160069, 2017.
- GUARÇONI, A.; SOUZA, G. S.; PAYE, H. S. Representatividade da amostra de solo de acordo com o volume coletado em lavoura de café Arábica. **Colloquium Agrariae**, v. 15, n. 3, p. 69-78, 2019.
- GUARÇONI, A.; PREZOTTI, L. C. Fertilização do café conilon. In: Zambolim, L. (Ed.). **Tecnologias para produção do café conilon**. Viçosa-MG: UFV, 2009. p. 249-293.
- GURGEL, G. C. S.; FERRARI, A.C.; FONTANA, A.; POLIDORO, J. C.; COELHO, L. A. M.; ZONTA, E. Volatilização de amônia proveniente de fertilizantes minerais mistos contendo ureia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1686-1694, 2016.
- HAGHIGHI, F.; GORJI, M.; SHORAFI, M. A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. **Land Degradation & Development**, v. 21, p. 496-502, 2010.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, p. 121-145, 2005.
- HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 145-154, 1999.
- HOFMEIJER, M. A. J.; KRAUSS, M.; BERNER, A.; PEIGNÉ, J.; MÄDER, P.; ARMENGOT, L. Effects of reduced tillage on weed pressure, nitrogen availability and winter wheat yields under organic management. **Agronomy**, v. 9, p. 1-12, 2019.

- HOLLAND, J. M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 103, p. 1-25, 2004.
- JACOBS, A.; RAUBER, R.; LUDWIG, B. Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p. 158-164, 2009.
- LAL, R.; REICOSKY, D. C.; HANSON, J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. **Soil Tillage Research**, v. 93, p. 1-12, 2007.
- LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 4ª aproximação. Campinas: SBCS, 1991, 175 p.
- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.
- MALAVOLTA, E. Adubação e seu impacto ambiental. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Anais... Águas de Lindóia**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.
- MELO, L. C. A.; AVANZI, J. C.; CARVALHO, R.; SOUZA, F. S.; PEREIRA, J. L. A. R.; MENDES, A. D. R.; MACÊDO, G. B. Nutrição e produção de matéria seca de milho submetido à calagem e adubação sulfatada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 2, p. 193-199, 2011.
- MEURER, K. H. E.; HADDAWAY, N. R.; BOLINDER, M. A.; KATTERER, T. Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil-A systematic review using an ESM approach. **Earth Science Review**, v. 177, p. 613-622, 2018.
- NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Relações entre os tipos e indicadores de acidez do solo em lavouras no sistema plantio direto na região do planalto do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1217-1226, 2008.
- NOCE, M. A.; SOUZA, I. F.; KARAM, D.; FRANÇA, A. C.; MACIEL, G. M. Influência da palhada de gramíneas forrageiras sobre o desenvolvimento da planta de milho e das plantas daninhas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 7, n. 3, p. 265-278, 2008.
- NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 9. p. 133-204.
- OLI VEIRA, F. H. T.; ARRUDA, J. A.; SILVA, I. F.; ALVES, J. C. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 973-983, 2007.
- PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014.
- PAULINO, P. S. **Atributos físicos como indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo no estado de Santa Catarina**. 2013. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2013.
- PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 911-920, 2008.
- PEDROTTI, A.; SILVA, T. O.; ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO FILHO, R. N.; HOLANDA, F. S. R. Atributos químicos do solo modificados por diferentes sistemas de cultivo associados a culturas antecessoras ao cultivo do milho, nos Tabuleiros Costeiros. **Magistra**, Cruz das Almas – BA, v. 27, n.3/4, p. 292-305, 2015.
- PEIGNE, J.; BALL, B. C.; ROGER-ESTRADE, J.; DAVID, C. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. **Soil Use and Management**, v. 23, p. 129-144, 2007.
- PERDOK, U. D.; KOUWENHOVEN, J. K. Soil-tool interactions and field performance of implements. **Soil and Tillage Research**, v. 30 p. 283-326, 1994.
- PITELLI, R.; DURIGAN, J. C. Ecologia das plantas daninhas no sistema de plantio direto. In: ROSSELLO, R. D. (Ed.). **Siembra directa en el Cono Sur**. Montevideo: PROCISUR, 2001, p. 203-210.
- PREDEBON, R.; GATIBONI, L. C.; MUMBACH, G. L.; SCHMITT, D. E.; DAL'ORSOLETTA, D. J.; BRUNETTO, G. Accuracy of methods to estimate potential acidity and lime requirement in soils of west region of Santa Catarina. **Ciência Rural**, v. 48, n. 4, 2018.
- PREZOTTI, L. C.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G.; OLIVEIRA, J. A. de. **Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o Estado do Espírito Santo**. 5ª aproximação. Vitória, ES: SEEA/Incaper/Cedagro, 2007. 305 p.
- PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória-ES: Incaper, 2013. 104 p.
- PROSDOCIMI, M.; JORDÁN, A.; TAROLLI, P.; KEESSTRA, S.; NOVARA, A.; CERDÀ, A. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. **Science of the Total Environment**, v. 547, p. 323-330, 2016.
- RABEL, D. O.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; MELO, V. F.; PRIOR, S. A. Depth distribution of exchangeable aluminum in acid soils: a study from subtropical Brazil. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 40, e39320, 2018.
- RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011a. 420 p.

- RAIJ, B. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. **Informações Agronômicas**, n. 135, 2011b.
- RAIJ, B. V.; SACCHETTO, T. D.; IGUE, T. Correlações entre o pH e o grau de saturação em bases nos solos com horizonte B textural e horizonte B latossólico. **Bragantia**, v. 27, n. 17, p. 193-200, 1968.
- RAIJ, B.; CAMARGO, A. P.; CANTARELLA, H.; SILVA, N. M. Alumínio trocável e saturação em bases como critérios para recomendação de calagem. **Bragantia**, v. 42, n. 1, p. 149-156, 1983.
- RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; ZULLO, M. A. T. Método tampão SMP para determinação da necessidade de calagem de solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 38, n. 7, p. 57-69, 1979.
- RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSCIONE, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, 2013.
- RAMOS, M. R.; DEDECEK, R. A.; SILVA, T. R. da; FREIRE, T. M. Atributos físicos do solo no horizonte superficial em diferentes usos. **Revista Agri-Environmental Sciences**, v. 3, n. 1, 2017.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242- 254, 2009.
- RODRIGUES, M. S.; SOUZA, C. de; LIMA, D. D.; SILVA, S. D. P. da; ALVES, D. C.; MACHADO, N. S. Impacto do cultivo do coqueiro irrigado na qualidade física do solo na região semiárida Brasileira. **Ciencia del Suelo**, v. 34, n. 1, p. 139-144, 2016.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Cultivo mínimo**. AGEITEC. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_85\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_85_22122006154841.html)>. Acesso em: 25 abr. 2019.
- SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; ARRUDA, J. A.; LOPES, A. R. S.; SOUZA JÚNIOR, R. F.; FARIAS, D. R. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função da variabilidade de suas características químicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 849-854, 2009.
- SILVA, M. A. C.; NATALE, W.; PRADO, R. M.; CORRÊA, M. C. M.; STUCHI, E. S.; ANDRIOLI, I. Aplicação superficial de calcário em pomar de laranja pêra em produção. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 3, p. 606-612, dez. 2007.
- SOANE, B. D.; BALL, B. C.; ARVIDSSON, J.; BASCH, G.; MORENO, F.; ROGER-ESTRADE, J. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. **Soil & Tillage Research**, v. 118, p. 66-87, 2012.
- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 675-688, 2008.
- SOSBAI – Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz Irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. XXXII Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado, Farroupilha, RS. 2018. 205 p.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2005. 19 p. (Circular Técnica, 32).
- SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 5. p. 205-274.
- TEBRÜGGE, F.; DÜRING, R. Reducing tillage intensity: a review of results from a long-term study in Germany. **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 15-28, 1999.
- TIAN, S., T. NING, Y.; WANG, Z.; LIU, G.; LI, G.; LI, Z.; LAL, R. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China. **Soil and Tillage Research**, v. 163, p. 207-213, 2016.
- UPCHURCH, D. R.; EDMONDS, W. J. Statistical procedures for specific objectives. In: MUSBACH, M. J.; WILDING, L. P. (Ed.). **Spatial variabilities of soil and landforms**. Madison: SSSA, p. 49-71, 1991. Special Publication (No 28).
- VAN DE PUTTE, A.; GOVERS, G.; DIELS, J.; GILLIJNS, K.; DEMUZERE, M. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. **European Journal of Agronomy**, v. 33, p. 231-241, 2010.
- VITÓRIA, E. L. Da; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R. Produtividade de plantas forrageiras em função de manejos do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 955-962, 2014.
- ZHANG, H. L.; BAI, X. L.; XUE, J. F.; CHEN, Z. D.; TANG, H. M.; CHEN, F. Emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O under different tillage systems from double-cropped paddy fields in Southern China. **PLoS ONE**, v. 8, n. 6, p. 1-11, 2013.