

Capítulo 6

Evolução da fertilidade do solo em sistema de integração lavoura-pecuária

Antônio Marcos Coelho
Álvaro Vilela de Resende
Flávia Cristina dos Santos
Ramon Costa Alvarenga



Foto: Álvaro Vilela de Resende

Introdução

A integração lavoura-pecuária (ILP) vem sendo apontada como uma estratégia de uso da terra que permite compatibilizar ganhos de produtividade vegetal e animal, com maior eficiência de aproveitamento dos recursos disponíveis, incluindo os nutrientes, além de maior sustentabilidade pela melhoria da qualidade do solo. Entretanto, as alternativas de intensificação dos sistemas de produção agrícola, como a rotação, a sucessão e a consorciação de culturas, exigem um monitoramento mais frequente (2 a 3 anos) dos atributos químicos, físicos e biológicos, visando manter seu potencial produtivo e, conseqüentemente, sua sustentabilidade.

Isto acontece porque os diferentes tipos de culturas e suas finalidades de produção (grãos e forragem) apresentam diferentes exigências nutricionais e, conseqüentemente, exportação e ciclagem de nutrientes, o que pode ocasionar desbalanceamento nos teores de nutrientes dos solos, limitando assim seu potencial produtivo. Além disso, o intensivo tráfego de máquinas e equipamentos pode ocasionar degradação física dos solos, por exemplo, a compactação da camada superficial, intensificando o processo erosivo.

Nesse tipo de exploração, o balanço de nutrientes (quantidade aplicada menos a exportada nos produtos colhidos) assume importância fundamental, como ferramenta auxiliar, na recomendação de calagem e adubação para os sistemas de produção. O presente capítulo tem por objetivo avaliar a evolução e variações nos indicadores da fertilidade do solo de um sistema intensivo de produção, envolvendo diferentes culturas em rotação, sucessão e consorciação, em um projeto-piloto de integração lavoura pecuária, conduzido na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, situada no município de Sete Lagoas, MG, no período de 2005 a 2018.

Material e métodos

O projeto-piloto, em sistema ILP, vem sendo conduzido na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG, desde o ano de 2005. A área do projeto compreende por volta de 22 ha e foi dividida em quatro glebas de 5,5 ha cada. As composições das glebas, assim como sua dinâmica espaço-temporal, são apresentadas no Capítulo 3 deste livro. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, textura muito argilosa, manejado sob o sistema de plantio

direto desde o ano de 2006, cujas características físicas e químicas iniciais são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Atributos químicos e físicos de amostras de solo coletadas em 2005, antes da implantação das glebas componentes do projeto-piloto.

Profundidade da amostra (cm)	Gleba 1		Gleba 2		Gleba 3		Gleba 4	
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
Indicadores do potencial produtivo								
M.O. (%)	3,98	3,31	3,55	2,98	3,25	2,84	4,28	3,50
pH (água)	5,40	5,40	5,20	5,40	5,60	5,30	5,10	5,00
CTC (cmol _c dm ⁻³)	11,57	11,19	11,07	9,90	9,88	8,92	10,76	10,43
Sat. Al (%)	3,0	6,0	12,0	7,0	2,0	8,0	20,0	32,0
Sat. Bases (%)	48,0	44,0	38,0	43,0	51,0	38,0	29,0	20,0
Argila (%)	62	69	69	71	62	71	69	62
Indicadores da “biodisponibilidade” de macronutrientes								
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,49	1,06	3,50	3,64	4,29	2,85	2,69	1,87
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,72	0,61	0,48	0,44	0,61	0,37	0,29	0,18
K (mg dm ⁻³)	140	89	92	52	64	48	45	23
P (mg dm ⁻³)	20	14	39	11	9	5	11	6
Indicadores da “biodisponibilidade” de micronutrientes								
Zn (mg dm ⁻³)	4,5	2,5	7,0	14,5	2,5	4,0	12,5	1,5
Cu (mg dm ⁻³)	1,2	1,1	1,4	1,5	1,2	1,4	0,8	4,1
Mn (mg dm ⁻³)	134	121	85	81	61	50	19	31
Fe (mg dm ⁻³)	43	45	52	71	43	47	47	51

Amostragens de solos e análises laboratoriais

As amostragens de solo foram realizadas em novembro de 2005, outubro de 2006, março de 2008, agosto de 2012, outubro de 2014, julho de 2017 e julho de 2018. A amostragem em cada gleba foi realizada em pontos aleatórios, no sistema tradicional, retirando-se em cada gleba (5,5 ha) 25 amostras simples para compor uma amostra composta. As profundidades de amostragem foram diferentes para cada ano, sendo que em 2005 as amostragens foram realizadas nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm. Em 2006 e 2012, nas profundidades

de 0–10 cm, 10–20 cm e 20–40 cm. Em 2008, as amostragens foram realizadas nas profundidades de 0–10 cm e 10–20 cm, nas linhas e entre as linhas das culturas, sendo as amostras compostas analisadas separadamente. Em 2014, as amostragens foram realizadas nas profundidades de 0–5 cm, 5–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm. Em 2017 e 2018, as amostragens foram realizadas nas profundidades de 0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm.

Em função dessas diferenças nas profundidades de amostragem, para a apresentação dos resultados, optou-se pela uniformização para as profundidades de 0–20 cm (valores médios ponderados das profundidades amostradas até 20 cm) e 20–40 cm, para as quais foi possível obter resultados para um maior número de anos de amostragens. As médias ponderadas para a camada de 0 a 20 cm foram calculadas pela Equação 6.1:

$$\text{VMP} = \{(P_{0-5} \times 5) + (P_{5-10} \times 5) + (P_{10-20} \times 10)\} / 20 \quad (6.1)$$

em que

VMP = o valor médio ponderado de cada parâmetro de solo.

P = os teores dos parâmetros nas profundidades consideradas.

Essas diferenças nas profundidades de amostragem realizadas, sem uma adequada sistematização de métodos, como uniformização nas profundidades e períodos de amostragens, dificultam a utilização de ferramentas estatísticas para análises desse tipo de resultado. Assim, em estudos dessa natureza, é necessário ter um planejamento inicial para a realização das amostragens de solo, definindo-se a forma de coleta, casualizada ou sistematizada, a profundidade e a periodicidade de amostragens (Coelho, 2005a). Entretanto, a necessidade de comparar dados não padronizados também ocorre em muitas propriedades agrícolas que desejam obter um histórico da evolução da fertilidade dos solos de suas glebas.

As análises químicas e físicas foram realizadas nos laboratórios de análises químicas e físicas de solo da Embrapa Milho e Sorgo, sendo determinados: pH em água, acidez potencial (H + Al) extraída com solução de acetato de cálcio pH 7,0; acidez trocável (Al), Ca e Mg extraídas em solução de KCl 1N; K, P, Zn, Cu, Mn e Fe extraídos pelo extrator Mehlich1; boro (B) extraído em água quente,

carbono orgânico em analisador de carbono a 800 °C, sendo os teores de matéria orgânica obtidos multiplicando-se os teores de carbono orgânico pelo fator de 1,72. Com base nesses resultados, foram calculadas capacidade de troca catiônica (CTC-pH7) (T), CTC efetiva (t), saturação por Al da CTC efetiva (m), soma de bases (SB) e saturação por bases (V). A análise granulométrica (areia, silte e argila) foi realizada pelo método da pipeta.

Os resultados foram analisados estatisticamente através da análise descritiva clássica em software SAS versão 8.2, e as figuras foram elaboradas em software Origin75. Os resultados dessas análises foram organizados em três grupos: a) indicadores do potencial produtivo do solo, que incluem os dados de matéria orgânica (M.O.), capacidade de troca de cátions (CTC-pH7), pH-água, saturação por alumínio da CTC efetiva (m) e saturação por bases (V); b) indicadores da “biodisponibilidade” de macronutrientes (Ca, Mg, K e P); e c) indicadores da “biodisponibilidade” de micronutrientes (Zn, Cu, Mn, Fe e B).

Histórico de calagem e adubação

A aplicação de corretivos e fertilizantes foi feita de acordo com os resultados das análises de solo para cada gleba. As doses de calcário foram calculadas pelo método de saturação por bases, visando elevar para valor de 60%, com calcário dolomítico. No ano agrícola 2011/2012 foram aplicadas 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 92%). O gesso agrícola, nas doses de 1,0 Mg ha⁻¹ e 2,0 Mg ha⁻¹ foi aplicado na superfície do solo em 2005 e 2014, respectivamente. Em 2018, como fonte de magnésio, foram aplicados em cada gleba 1,0 Mg ha⁻¹ de pó de rocha serpentinito (MgO – 38%).

Nas adubações de semeadura, foram empregados fertilizantes formulados N, P, K e Zn, para o milho, o sorgo e as pastagens de braquiária (300 a 400 kg ha⁻¹ da fórmula 08-30-15 de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente). Para a soja, foram utilizados fertilizantes formulados contendo P, K e Zn (300 kg ha⁻¹ da fórmula 00-30-15 de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente). Nas adubações de cobertura para o milho e o sorgo foram aplicadas doses variando de 90 a 130 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, em aplicação única no estágio de 5 a 6 folhas. Quando as culturas de milho e sorgo tinham por finalidade a produção de forragem, o potássio era também aplicado em cobertura, juntamente com o N (200 kg ha⁻¹ da fórmula 20-00-20 de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente). Nas

glebas com pastagens, foram aplicados na adubação de cobertura 200 kg ha⁻¹ de N, divididos em três aplicações.

Evolução da fertilidade do solo

Resultados iniciais das análises químicas e físicas de amostras de solo coletadas em 2005, em cada gleba da área experimental (Tabela 6.1), revelaram que, de um modo geral, embora ocorressem variações entre as glebas, o solo já apresentava a fertilidade construída em níveis relativamente mais favoráveis, em comparação às características químicas normalmente observadas em solos sob vegetação natural de Cerrado. Verifica-se, entretanto, que a gleba 4 apresentou maiores índices de acidez e menores biodisponibilidades, principalmente de Ca, Mg e K.

Portanto, pode-se dizer que a área em estudo, apresentava-se com solo não degradado e com um perfil até 40 cm de profundidade com níveis de fertilidade considerados adequados para se obter alto potencial produtivo já no primeiro ano, desde que as correções ainda requeridas fossem efetuadas adequadamente. Portanto, naquelas condições, ainda poderiam ser obtidas melhorias consideráveis na qualidade do solo, mesmo em condições de cultivos intensivos.

Indicadores do potencial produtivo do solo

Nas Figuras de 6.1 a 6.5, são apresentadas as alterações ocorridas nos indicadores do potencial produtivo do solo nas diferentes glebas no decorrer do tempo de condução do sistema ILP. Verifica-se, no período avaliado, expressivo aumento nos teores de matéria orgânica nas duas camadas de solo analisadas, apesar de alguma variação temporal nos resultados das análises (Figura 6.1). O uso do plantio direto associado à rotação, sucessão e consorciação de culturas, com aporte de grandes volumes de palhada, foram, sem dúvida, responsáveis por este incremento, indicando a importância dessas práticas na melhoria deste atributo do solo.

A capacidade de troca de cátions (CTC-pH7) também apresentou valores crescentes ao longo do período (Figura 6.2), seguindo, de certa forma, a mesma tendência dos teores de matéria orgânica, confirmando assim sua importante contribuição na CTC do solo. É importante enfatizar que com os valores de CTC deste solo (~12 cmol_c dm⁻³), a lixiviação de bases (Ca, Mg e K) e micronutrientes

catiônicos (Zn, Cu, Mn e Fe) é minimizada. Assim, a movimentação de cátions para as camadas mais profundas deve ocorrer através da decomposição de raízes e/ou com a aplicação de doses adequadas de gesso agrícola.

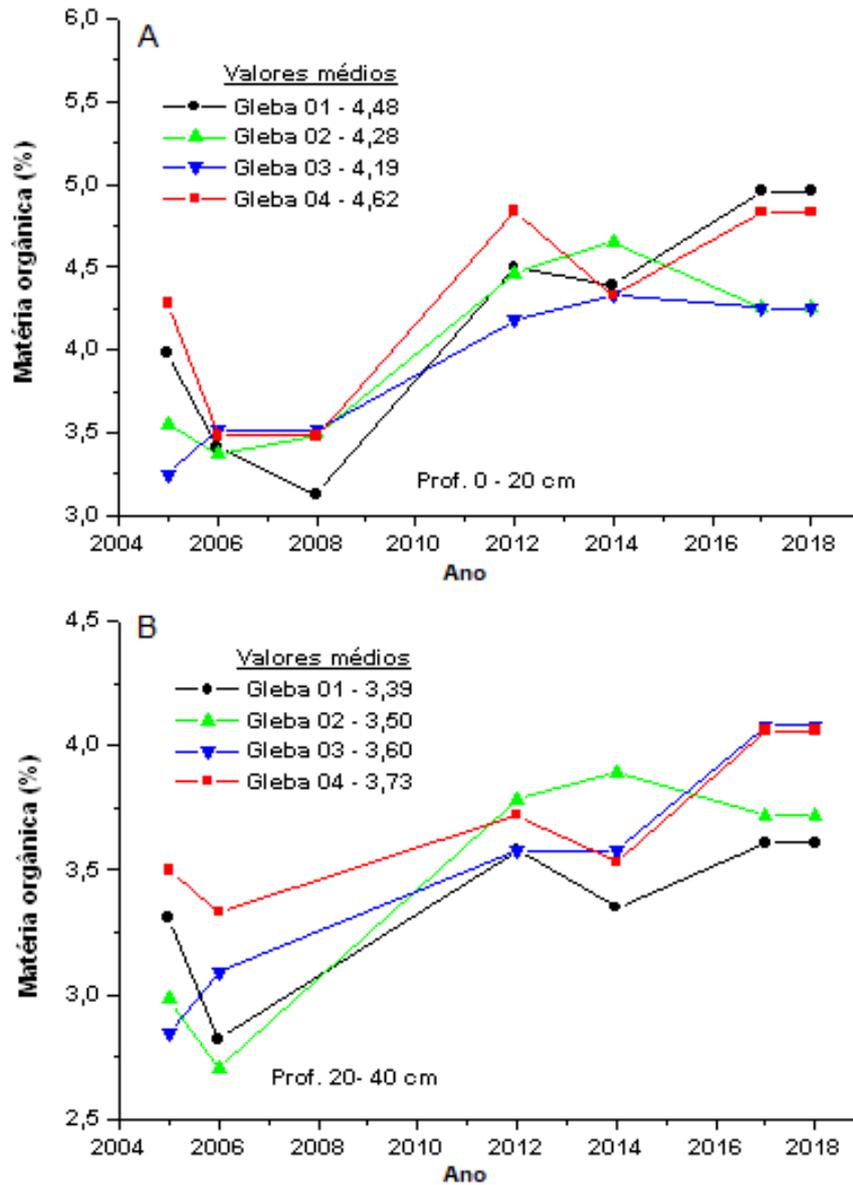


Figura 6.1. Teores de matéria orgânica (M.O.) do solo nas profundidades de 0 cm–20 cm e 20 cm–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema ILP: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

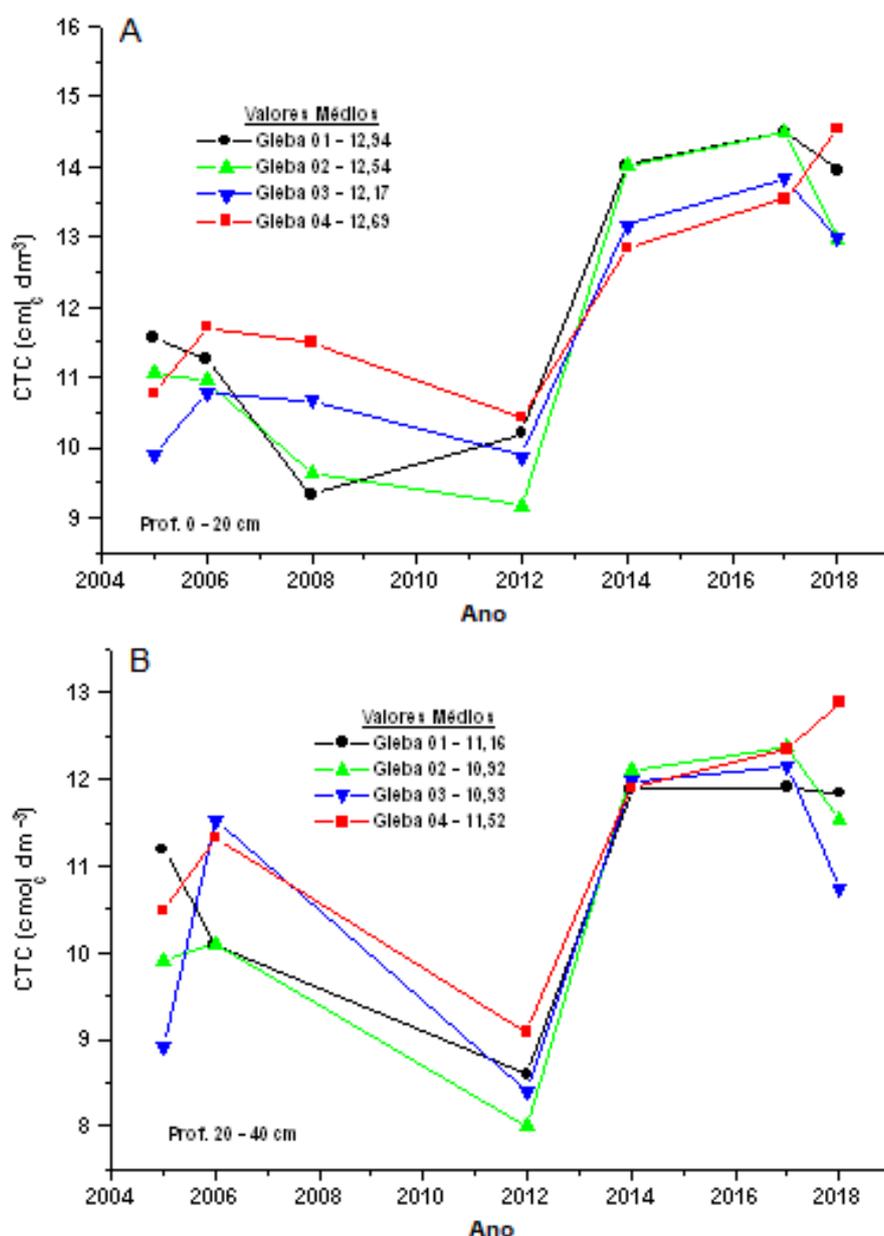


Figura 6.2. Capacidade de troca catiônica (CTC-pH 7) do solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

Por outro lado, outros importantes atributos, indicadores da acidez (Figuras 6.3, 6.4 e 6.5) apresentaram acentuadas variações durante o período analisado e sem apresentar incrementos comparando-se os valores iniciais (2005) aos finais (2018). Os valores de pH-água (Figura 6.3), saturação por alumínio da CTC efetiva (Figura 6.4) e saturação por bases da CTC-pH 7 (Figura 6.5), apresentaram oscilações, refletindo, possivelmente, os intervalos entre as aplicações de calcário, gesso e serpentinito.

Entretanto, no final do período analisado, os valores observados para estes indicadores mantiveram-se similares aos verificados na fase inicial de implantação do projeto-piloto (Tabela 6.1). Uma possível explicação para isto pode ser que os intervalos entre as aplicações, as doses e os métodos de aplicação de corretivos não tenham sido os mais adequados para este solo, o qual apresenta uma alta capacidade tampão, principalmente por causa do teor de argila mais elevado (> 60%, Tabela 6.1) e do próprio incremento crescente do conteúdo de matéria orgânica com o tempo de condução do sistema ILP. Assim, estas observações, associadas à CTC do solo, podem servir com critérios auxiliares, no melhor ajuste das doses de calcário calculadas pelos diferentes métodos de recomendação disponíveis.

Observa-se que, ao final do período analisado, os valores de pH-água situavam-se entre 5,0 e 5,5; a saturação por alumínio (m) estava entre 5 e 10%; e a saturação por bases (V) encontrava-se entre 35 e 40%. Situação bastante discrepante foi verificada para a gleba 4, a qual apresentou, em comparação com as demais glebas, desde o início, maior saturação por alumínio e menor saturação por bases, indicando que um tratamento diferencial, em termos de correção de solo, deve ser aplicado a esta gleba para melhor nivelamento de toda área do projeto.

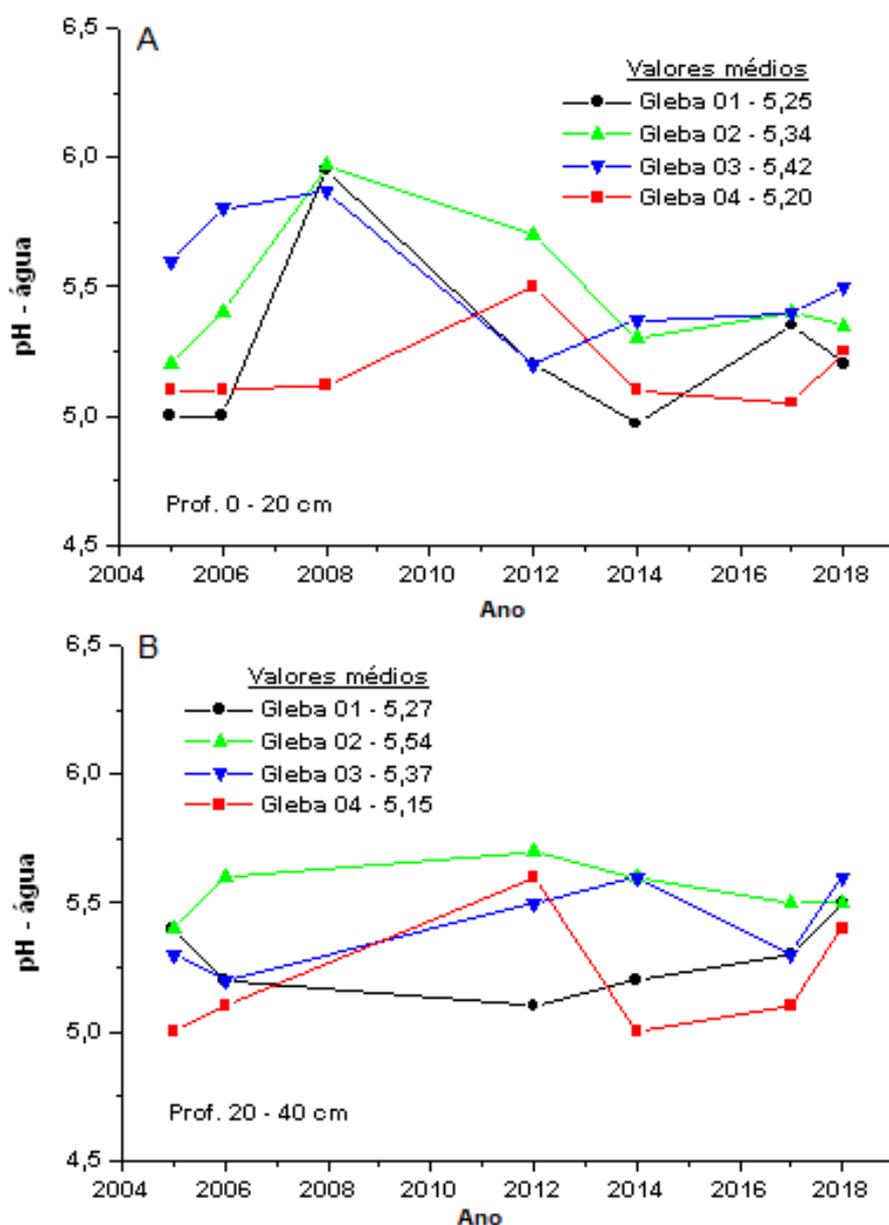


Figura 6.3. Valores de pH-água do solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

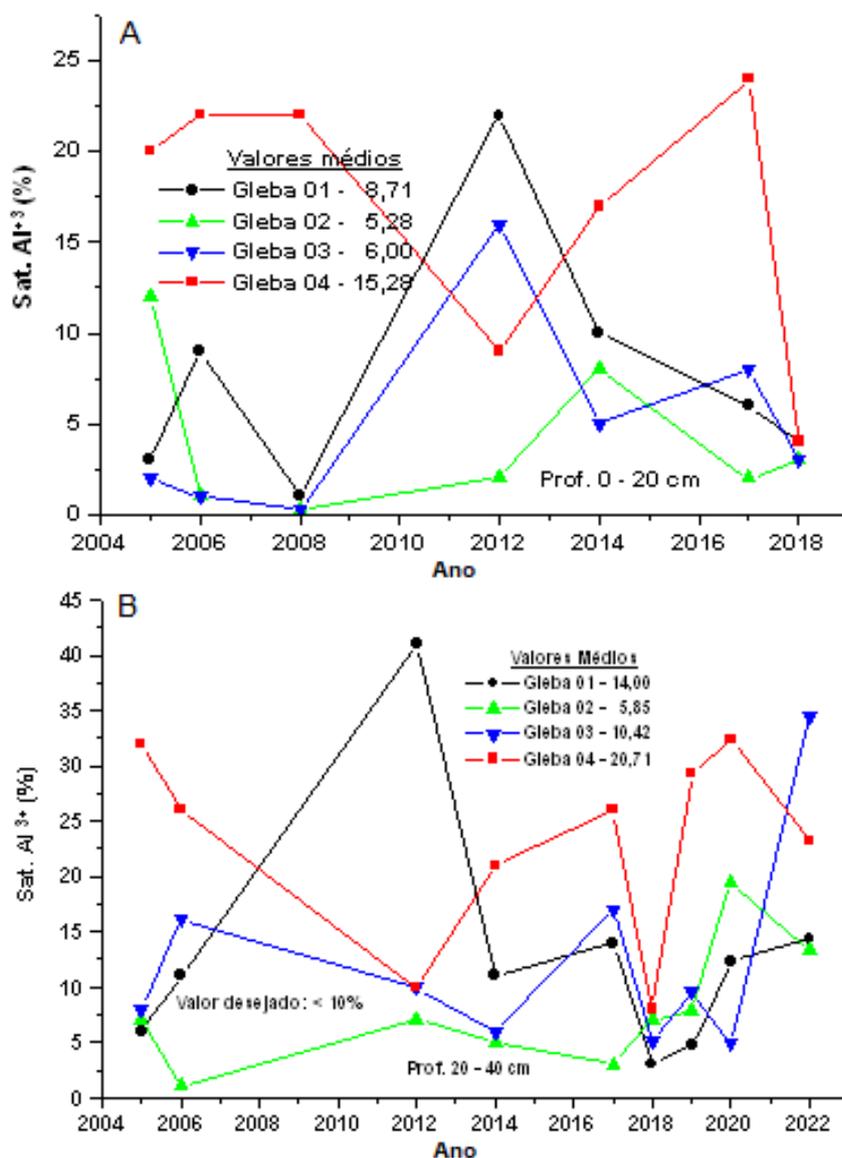


Figura 6.4. Saturação por alumínio da CTC efetiva (m) nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

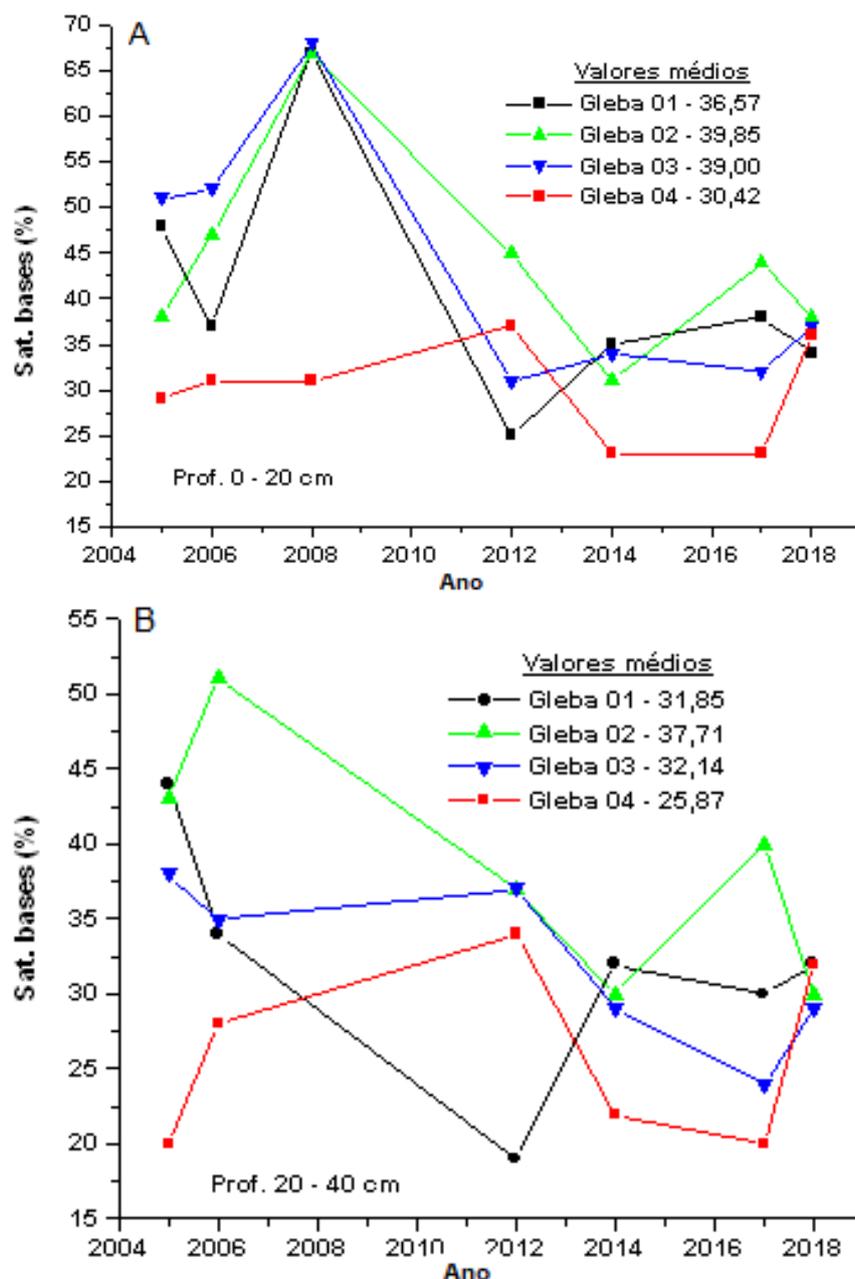


Figura 6.5. Saturação por bases da CTC-pH 7 (V) nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

Indicadores da “biodisponibilidade” de macronutrientes

As alterações ocorridas nos teores dos indicadores de “biodisponibilidade” dos macronutrientes (Ca, Mg, K e P) são apresentadas nas Figuras 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9. Os teores de Ca apresentaram, nas duas camadas analisadas, grandes variações durante o período estudado: 2,5 a 6,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na camada de 0–20 cm e 1,5 a 4,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na camada de 20–40 cm (Figura 6.6). Essas variações extremas são devidas à variabilidade natural e àquela induzida por

equipamentos na operação de aplicação de corretivos a lanço na superfície do solo. É importante mencionar que, em 2005 e 2014, foram aplicadas nas glebas 1,0 Mg ha⁻¹ e 2,0 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola, respectivamente (composição de 20% Ca = 200 e 400 kg ha⁻¹), elevando assim os teores de Ca no solo (Figura 6.6). Entretanto, verifica-se que os teores estão dentro da faixa considerada adequada para a maioria das culturas, incluindo a camada subsuperficial (20–40 cm), cujos valores (Figura 6.6) sempre estiveram acima de 0,5 cmol_c dm⁻³, considerado limite crítico para o crescimento de raízes.

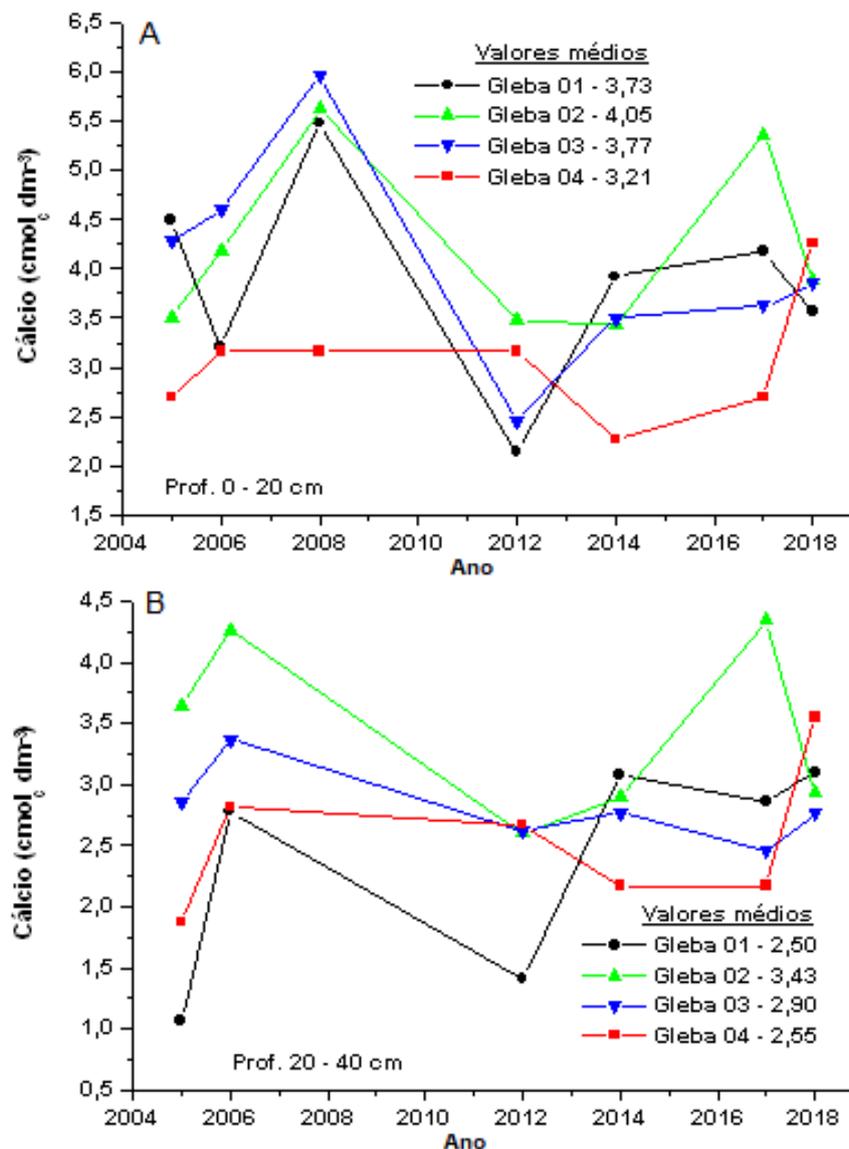


Figura 6.6. Teores de cálcio trocável (Ca) no solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

Com relação ao Mg, verifica-se pela Figura 6.7 que os teores deste nutriente sempre se situaram abaixo de 1,0 cmol_c dm⁻³, valor considerado, para o solo da

área, o nível crítico para a maioria das culturas, principalmente as leguminosas, que são mais exigentes nesse nutriente. Chama atenção a gleba 4, a qual sempre apresentou valores muito baixos de Mg ($\leq 0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Figura 6.7). Comparativamente à evolução dos teores de Ca (Figura 6.6), verifica-se uma certa dificuldade em aumentar os valores de Mg no solo (Figura 6.7). Isto poderia ser explicado pela maior exportação desse nutriente nos produtos colhidos, reduzindo a ciclagem e/ou pelo uso de corretivos de solo com baixos teores de Mg.

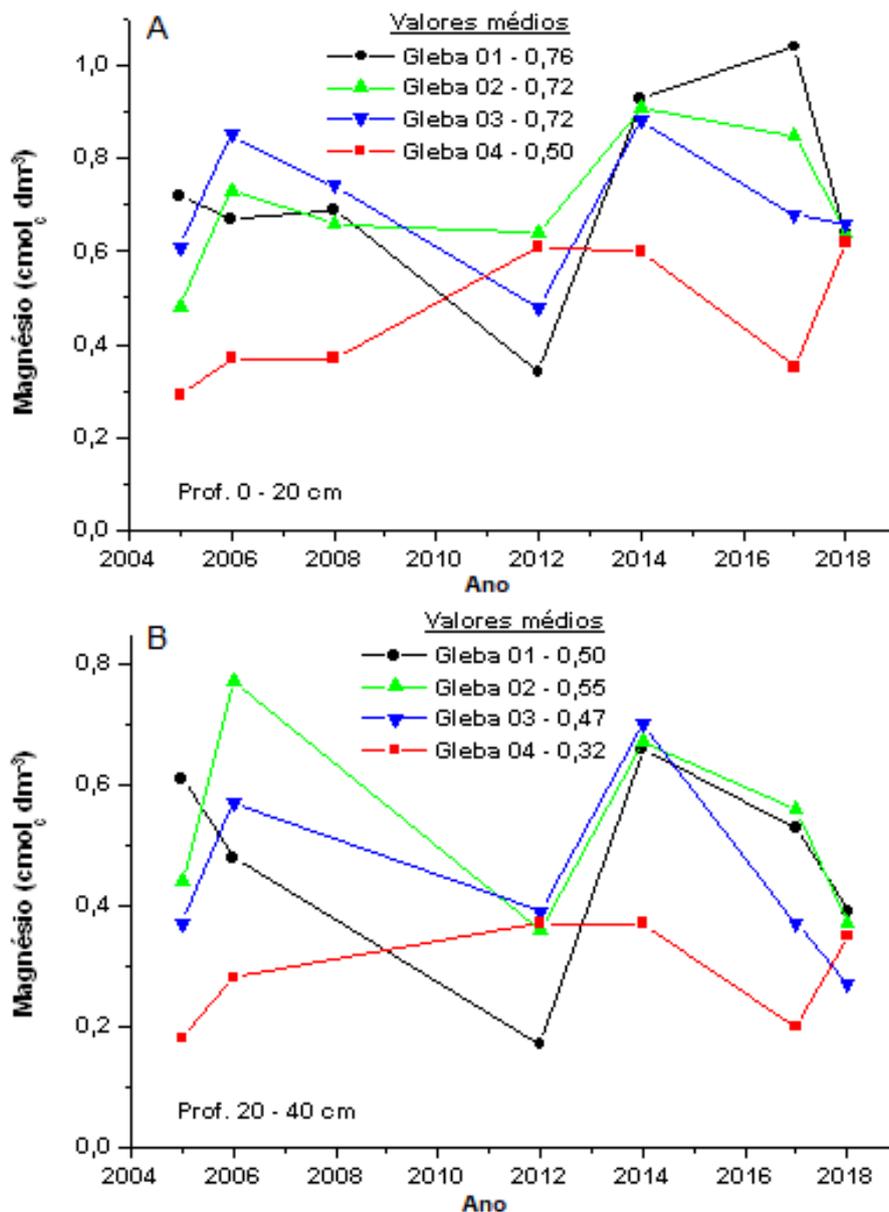


Figura 6.7. Teores de magnésio trocável (Mg) no solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

Com relação ao K (Figura 6.8), verifica-se que, no período de 2005 a 2014, para ambas as camadas analisadas, houve uma acentuada redução nos valores disponíveis com diferenças marcantes entre as glebas. As glebas 3 e 4 sempre apresentaram no período mencionado baixos teores de K. Considerando o valor de 100 mg dm^{-3} no solo como nível crítico de K para o solo da área, sob manejo intensivo, verifica-se que esta redução foi bastante significativa, principalmente na gleba 1, atingindo, em 2014, valores médios inferiores a 50 mg dm^{-3} de solo.

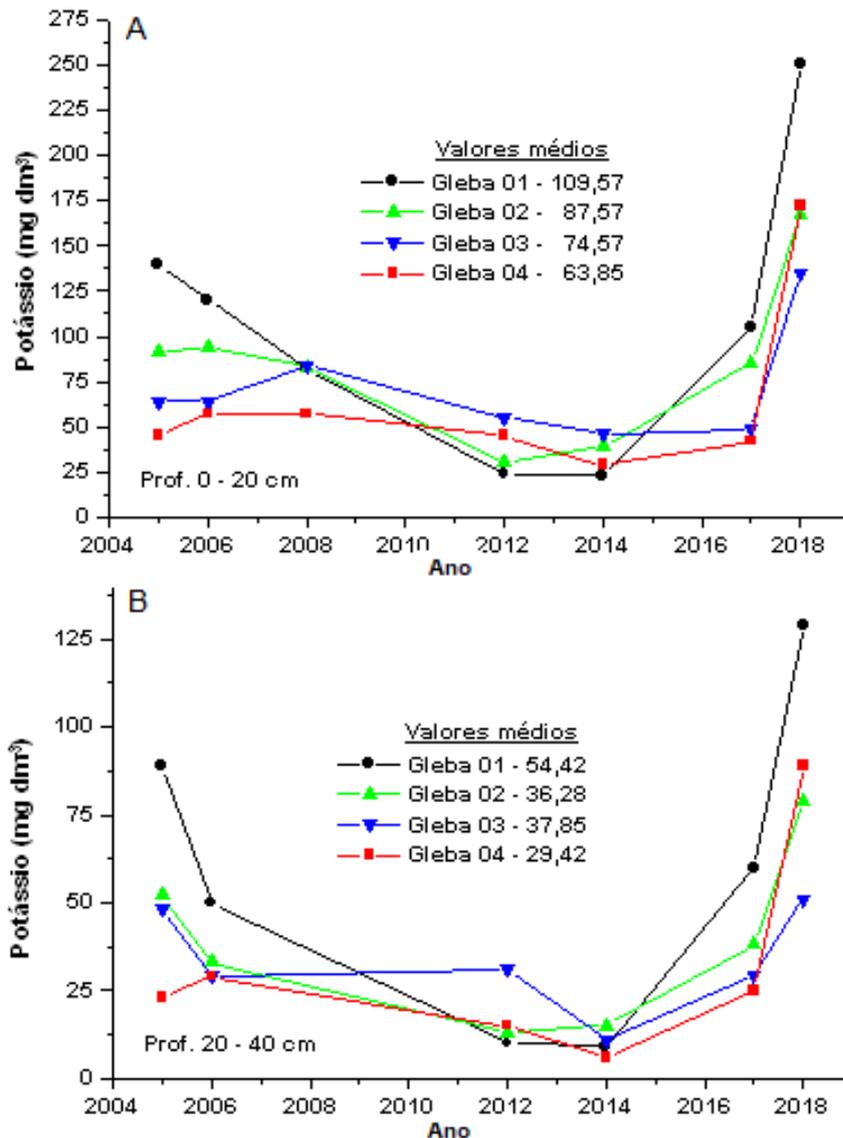


Figura 6.8. Teores de potássio (K) disponíveis no solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

Essa redução é devida, principalmente, à relação entre as quantidades aplicadas e aquelas removidas nos produtos colhidos, ou seja, as doses de K

aplicadas eram sempre menores do que as quantidades removidas nos produtos colhidos. Outro aspecto que pode mascarar os resultados das análises de solo refere-se à época de amostragem. Por exemplo, amostras de solo coletadas imediatamente após a colheita das culturas podem revelar baixos teores de K, visto que grandes quantidades desse nutriente estariam, ainda, retidas na palhada da cultura deixada sobre o solo, a qual se constitui em uma importante fonte de K para a cultura seguinte.

A partir de 2015, os teores de K no solo aumentaram consideravelmente (Figura 6.8) atingindo valores superiores ao nível crítico de 100 mg dm^{-3} no solo, refletindo provavelmente a aplicação para as diferentes culturas de doses maiores de fertilizante potássico como ocorrido em setembro de 2014, com a aplicação de 200 kg ha^{-1} de KCl (120 kg ha^{-1} de K_2O).

Para o P (Figura 6.9), comparativamente a outros macronutrientes, uma acentuada variabilidade nos resultados das análises de solo foi verificada ao longo do período de condução do sistema ILP. Essa variação se deve, em parte, à alta variabilidade típica desse nutriente no solo, de modo que até mesmo o procedimento de amostragem interfere nos resultados de análise (por exemplo: coletas feitas em linhas de adubação). Entretanto, verifica-se (Figura 6.9) que desde o início da implantação do projeto-piloto e para todas as glebas, os teores disponíveis (Tabela 6.1) já se encontravam com valores próximos ou superiores ao nível crítico de $8,0$ a $10,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P, estabelecido anteriormente para o tipo de solo da área, manejado sob preparo convencional. Entretanto, para este mesmo tipo de solo manejado sob plantio direto por vários anos, o nível crítico atualmente recomendado é menor, com valor de $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P no solo. Este mesmo tipo de solo sob vegetação natural de Cerrado e próximo à área em estudo apresenta teores de P disponível (extrator Mehlich1) de 2 a 3 mg dm^{-3} na camada de $0-20 \text{ cm}$.

O diferencial de disponibilidade de P em comparação à área sob Cerrado é consequência do efeito residual das doses de fertilizantes fosfatados aplicadas acima das demandas das culturas, no período anterior à implantação do projeto, criando assim uma reserva de P no solo que poderia ser mais bem aproveitada utilizando o conceito de adubação de sistemas. Esse conceito prioriza a adubação de culturas mais exigentes sendo que as menos exigentes são cultivadas aproveitando-se apenas do efeito residual do adubo fosfatado. Essa estratégia de

manejo é importante para sistemas de produção intensivos, em que a rotação, a consorciação e a sucessão de culturas contribuem para um melhor aproveitamento das reservas de P do solo.

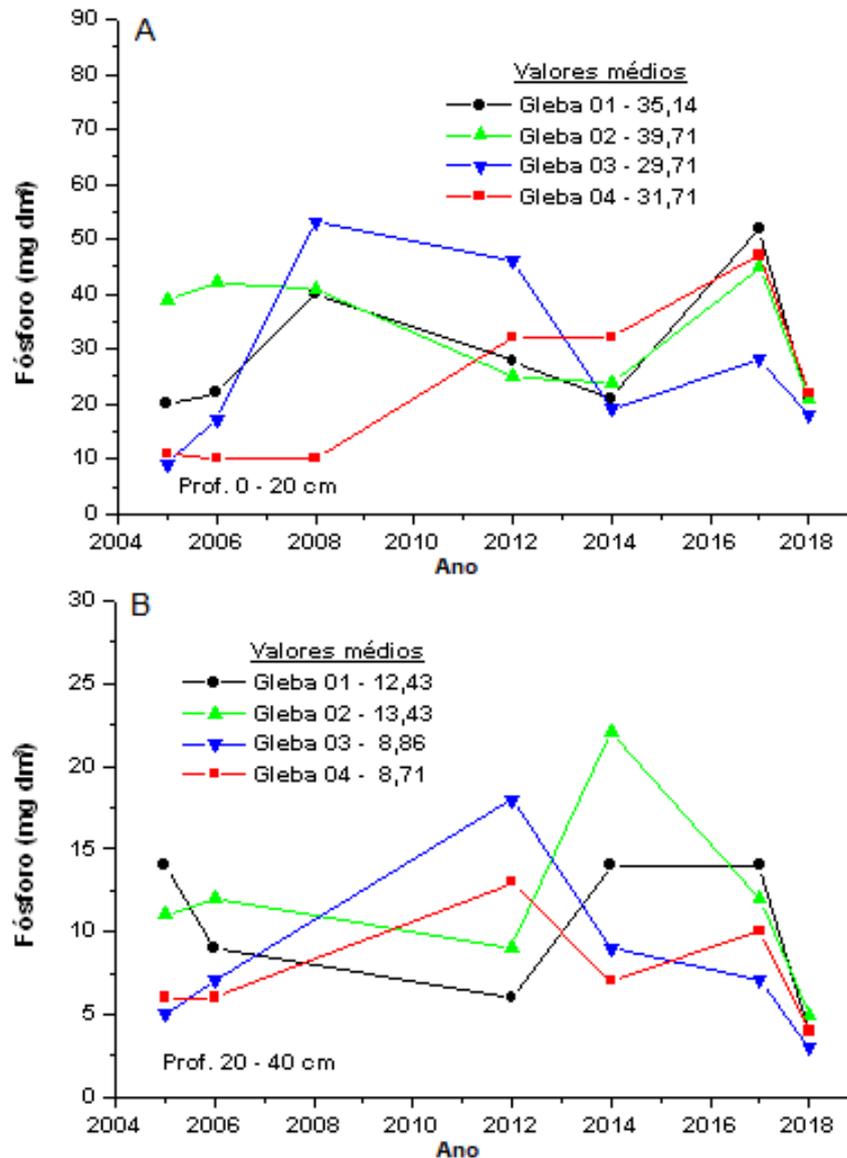


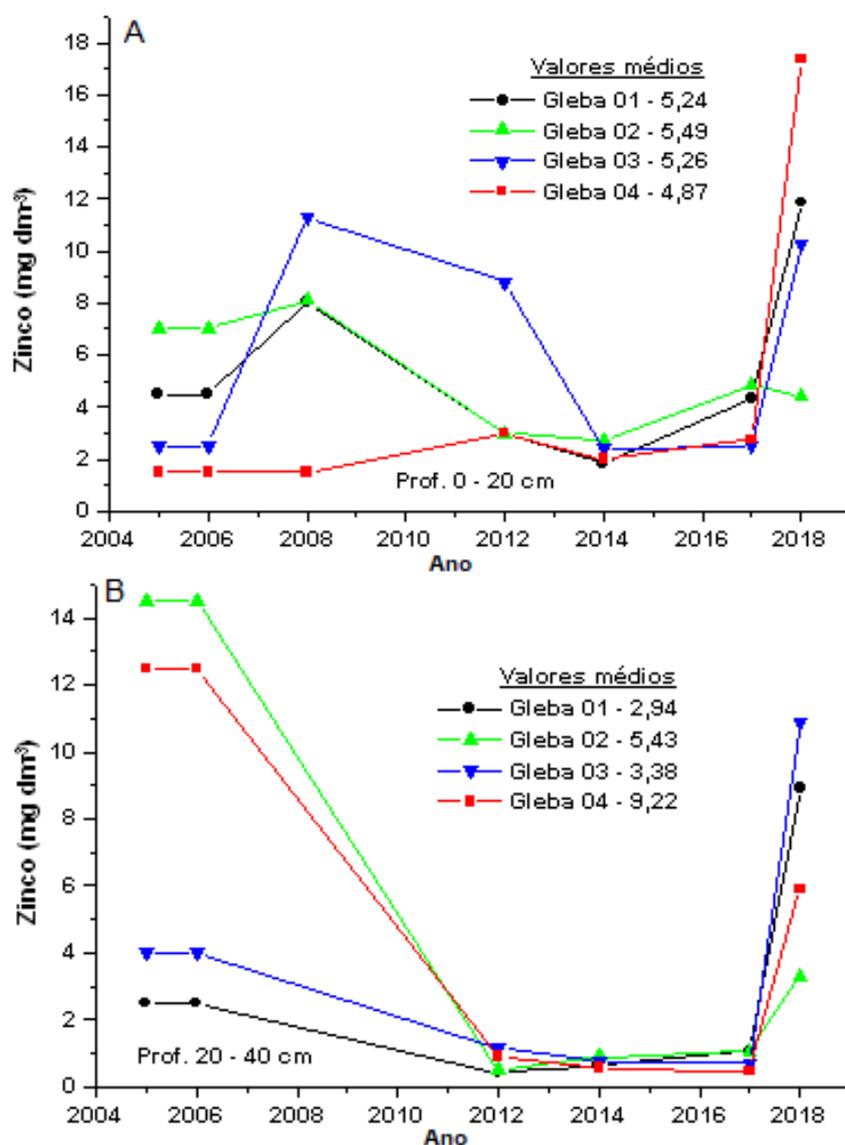
Figura 6.9. Teores de fósforo (P) disponível no solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

Indicadores da “biodisponibilidade” de micronutrientes

A evolução e a variabilidade nos indicadores da “biodisponibilidade” de micronutrientes Zn, Cu, Mn e Fe são apresentadas nas Figuras 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13, respectivamente. Análise da “biodisponibilidade” de boro (B) foi realizada apenas em 2015, obtendo-se os seguintes teores: gleba 1: 0,94 e 0,65 mg dm⁻³; gleba 2: 0,81 e 0,70 mg dm⁻³; gleba 3: 0,85 e 0,65 mg dm⁻³; e gleba 4: 0,66 e 0,52 mg dm⁻³, respectivamente, para as profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm. O nível crítico estabelecido para o B é de 0,60 mg dm⁻³ de solo.

Os resultados das análises de solo para os micronutrientes apresentam, em relação aos macronutrientes, grande variabilidade horizontal e vertical. Isto geralmente ocorre em razão das pequenas doses normalmente requeridas/aplicadas, associadas aos baixos teores detectados nas análises de solo, expressos em mg dm⁻³.

Verifica-se de um modo geral, para todas as glebas, que no período analisado (2005 a 2018) todos os micronutrientes apresentaram valores sempre superiores aos níveis críticos estabelecidos: 1,5 mg dm⁻³ de Zn; 1,2 mg dm⁻³ de Cu; 8 mg dm⁻³ de Mn; e 30 mg dm⁻³ de Fe (extrator Mehlich1). Os altos teores observados para o Zn (Figura 6.10) refletem uma maior preocupação com o suprimento deste nutriente, por ser o mais limitante às culturas em solo de Cerrado, sendo frequentemente aplicado em associação aos fertilizantes formulados NPK.



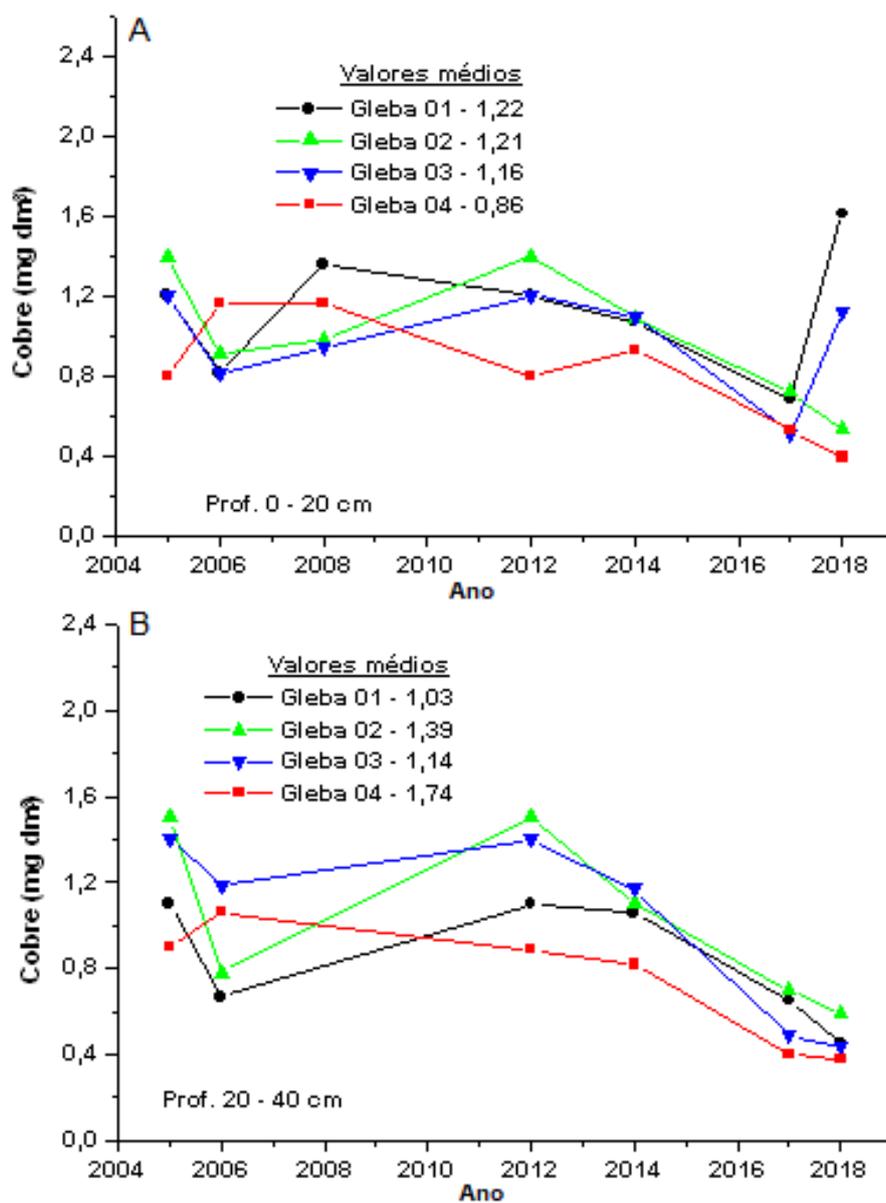


Figura 6.11. Teores de cobre (Cu) disponível no solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

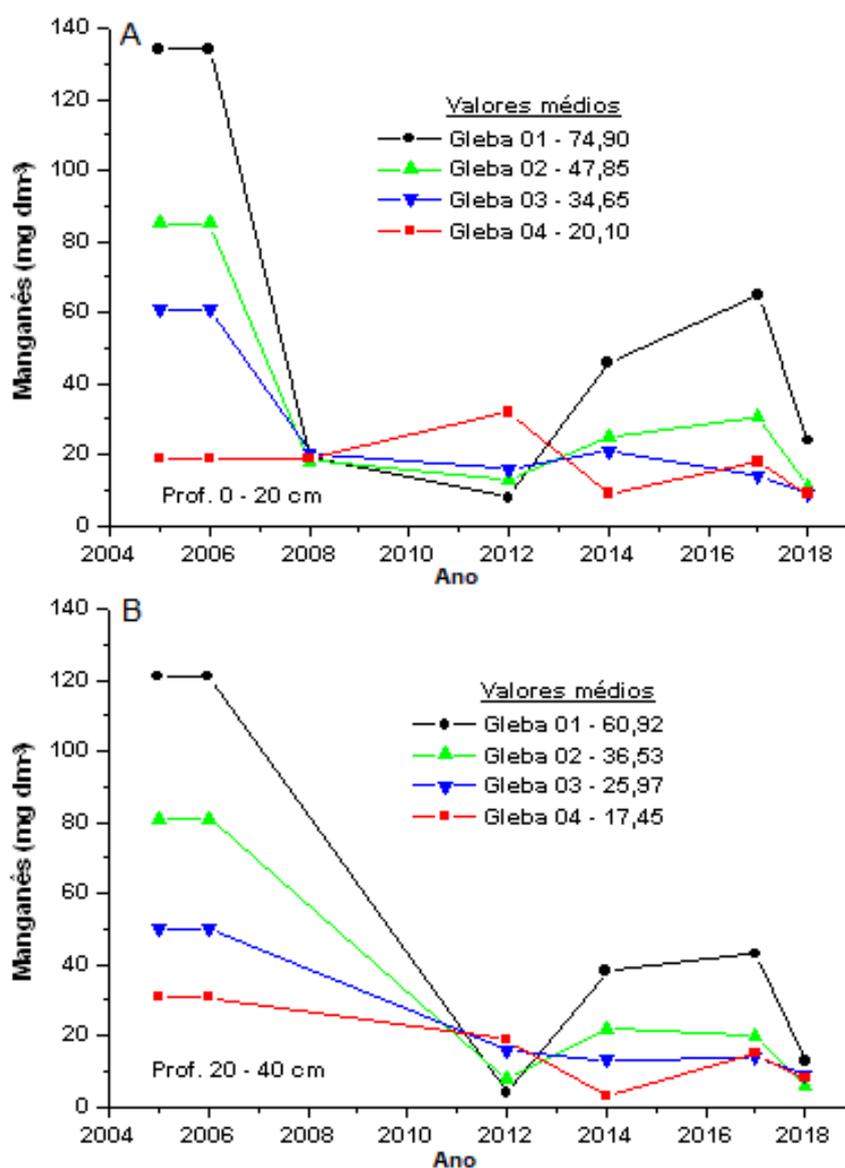


Figura 6.12. Teores de manganês (Mn) disponível no solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

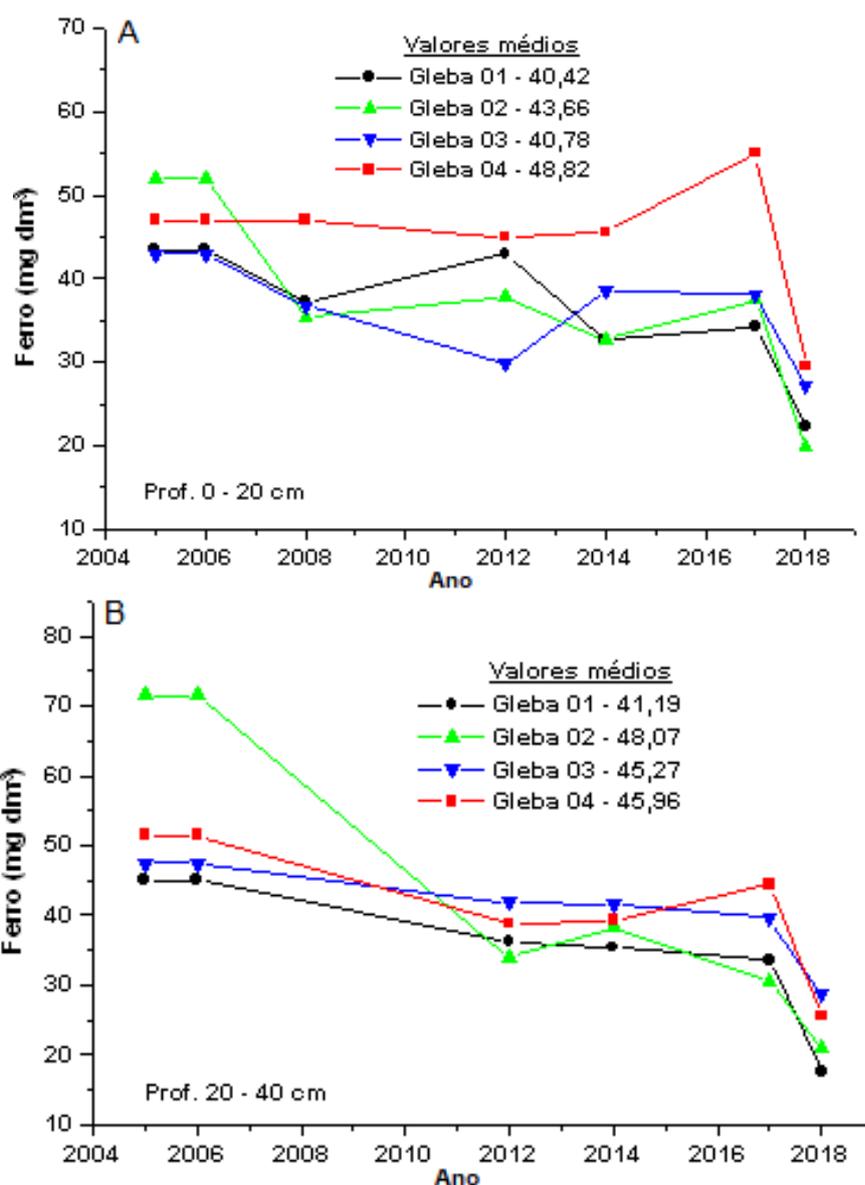


Figura 6.13. Teores de ferro (Fe) disponível nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nas diferentes glebas, ao longo do período de condução do sistema de integração lavoura-pecuária: (A) 0–20 cm, (B) 20–40 cm.

Na implantação do projeto de ILP em 2005, os resultados iniciais das análises químicas de solo apontaram uma variação acentuada nos indicadores da fertilidade do solo entre as glebas (Tabela 6.1), sugerindo assim a necessidade de um manejo diferenciado para a correção da acidez e adubação.

Por exemplo, se considerarmos a necessidade de calcário para elevar a saturação por bases (V) a um valor teórico de 60%, as quantidades calculadas indicariam doses de 1,38; 2,43; 0,89 e 3,33 Mg ha⁻¹ de um calcário com PRNT 100%, respectivamente, para as glebas 1, 2, 3 e 4, para serem incorporadas no solo na camada de 20 cm. Entretanto, por causa da alta capacidade tampão do

solo, associada à velocidade de reação das frações granulometrias dos calcários, o valor esperado de 60% de saturação por bases dificilmente é atingindo, necessitando assim de ajustes nas doses e no modo de aplicação do calcário, principalmente em solos com níveis mais altos de CTC e matéria orgânica. Os valores médios de pH-água de 5,0 a 5,5 (Figura 6.3), saturação por alumínio de 5 a 20% (Figura 6.4) e saturação por bases de 25 a 35% (Figura 6.5), verificados no período analisado, suportam essas considerações.

Dentro desse enfoque, é importante mencionar que em experimentos conduzidos por Coelho (1994) em um Latossolo Vermelho, textura argilosa, a dose de calcário calculada pelo método de saturação por bases ($2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) não foi suficiente para elevar a saturação por base para o valor almejado de 60%. Para atingir este valor foi necessária a aplicação de $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, como revelado pelos resultados das análises de solo de amostras coletadas 11 meses após a aplicação do calcário e cultivos sucessivos de milho e feijão.

De acordo com a Ribeiro et al. (1999), os valores máximos de saturação por alumínio na camada superficial (20 cm) tolerados pelas culturas são de 15% para o milho e o sorgo e de 20% para a soja. Para as braquiárias, esses valores são de 20 a 30%. Entretanto, em um sistema intensivo de produção de grãos e forragem, como o utilizado nesse trabalho, o objetivo deve ser o de neutralizar totalmente o Al na camada superficial, o que pode ser obtido pela aplicação de calcário em dose adequada e incorporado no solo na profundidade máxima possível. Esse manejo se torna mais importante quando o objetivo é o de implantar o sistema de plantio direto, onde as aplicações posteriores de calcário serão realizadas na superfície do solo e, portanto, sem possibilidades de incorporação.

No sistema de plantio direto estabelecido, a correção da acidez do solo se torna mais problemática nas camadas inferiores do solo em razão da baixa solubilidade em água do calcário que, normalmente, não é eficaz para corrigir a acidez em subsuperfície (20 a 40 cm). Nessa situação, o gesso pode ser recomendado por causa da sua alta capacidade de mobilizar Ca trocável e outros cátions básicos associados aos ânions sulfato no perfil do solo, aliviando a toxicidade do Al^{3+} (Bortoluzzi et al., 2014; Caires; Guimarães, 2018).

No presente trabalho, embora aplicações de gesso tenham sido realizadas em 2005 ($1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 2014 ($2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), verificou-se ainda a presença de Al^{3+} trocável na camada de 20 a 40 cm, cujos valores representavam de 6 a 21% de

saturação por alumínio da CTC-efetiva (Figura 6.4). As recomendações existentes para aplicação de gesso em solos brasileiros para o cultivo de culturas produtoras de grãos são baseadas nos seguintes limites críticos na camada subsuperficial (20–40 cm): $\geq 20\%$ para saturação de Al (m) e/ou $\geq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Al^{3+} trocável e/ou $\leq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Ca^{2+} trocável (Souza; Lobato, 2004; Pauletti; Motta, 2017). Considerando esses critérios, apenas para a gleba 4 (Figura 6.4) seria recomendada a aplicação de gesso. Considerando que as principais recomendações de doses de gesso para solos brasileiros são baseadas no teor de argila, a seguinte equação tem sido sugerida: dose de gesso (Mg ha^{-1}) = $0,05 \times$ teor de argila (%) (Souza; Lobato, 2004). Portanto, com base nessa equação, a dose de gesso recomendada para a gleba 4 é de $3,10 \text{ Mg ha}^{-1}$.

De acordo com Pias et al. (2020), os cereais (milho, trigo, aveia branca, cevada e arroz) tiveram uma alta probabilidade (77 a 97%) de seus rendimentos de grãos serem aumentados pela aplicação de gesso em solos com saturação de Al superior a 5% na camada de 20 cm a 40 cm. O aumento médio na produção de grãos foi de 14% e 7% nas lavouras que se desenvolveram na presença e na ausência de déficit hídrico, respectivamente. Foi observada uma resposta positiva da soja ao gesso em solos deficientes em água e com saturação de Al superior a 10%. Sob estas condições, a probabilidade de resposta positiva da soja foi de 88%, e o aumento médio da produção de grãos foi de 12%.

Com relação aos teores de P e K revelados pelas análises de solo de amostras coletadas no período de condução do sistema ILP (Figuras 6.8 e 6.9), houve variações ao longo dos anos e entre glebas, indicando também que um manejo diferenciado poderia ser empregado nas adubações das culturas, de modo a equilibrar as reservas desses nutrientes entre as glebas.

Para o P, os teores disponíveis (extrator Mehlich1) apresentaram-se, no decorrer do período de condução do sistema ILP (Figura 6.9), com pequenos acréscimos, mas com valores sempre acima do nível crítico de 8 a $10 \text{ mg de P dm}^{-3}$, estabelecido anteriormente para o solo da área manejado sob preparo convencional (Coelho; França, 1994) e de $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ para este mesmo tipo de solo manejado sob plantio direto já estabelecido (Sá, 1999; Sousa et al., 2019). Isso ocorreu provavelmente por causa da aplicação para as culturas de doses de P maiores do que a quantidade exportada nas colheitas, criando assim uma reserva de P no solo que poderia ser mais bem aproveitada, ajustando as

doses desse nutriente a serem aplicadas de acordo com a expectativa de produtividades das culturas e as respectivas exportações de P pelas colheitas.

Para o K, verificou-se uma situação inversa em relação ao P, ou seja, os teores disponíveis no solo, no período de 2005 a 2014 (Figura 6.8), decresceram para valores bem abaixo do nível crítico de 100 mg dm^{-3} de K no solo (Coelho, 2005b), refletindo uma maior exportação do nutriente nas colheitas em relação às doses aplicadas. Entretanto, a partir desse período, os teores de K no solo aumentaram consideravelmente para valores acima do nível crítico, refletindo um melhor ajuste nas doses aplicadas, como ocorreu em 2014, com aplicação a lanço de 200 kg ha^{-1} de KCl (120 kg ha^{-1} de K_2O).

Com relação aos micronutrientes, verificou-se que, no período de condução do sistema ILP, os teores no solo sempre se mantiveram próximos ou acima dos níveis críticos estabelecidos de: $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn; $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu; 8 mg dm^{-3} de Mn; 30 mg dm^{-3} de Fe (extrator Mehlich1); e $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ de B (extrator água quente) (Ribeiro et al., 1999), não constituindo assim limitações para o desenvolvimento e a produtividades das culturas.

Cronograma de manejo da fertilidade do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária

As atuais recomendações para um adequado planejamento de correção e adubação dos solos e dos sistemas de produção envolvem as etapas de diagnóstico da fertilidade dos solos, das exigências nutricionais das diferentes culturas e finalidades de uso (grãos e forragem) e do potencial produtivo a ser almejado.

As ferramentas disponíveis para esse diagnóstico envolvem as análises físicas e químicas dos solos, as análises químicas de plantas (foliar), a diagnose visual e o uso de sensores de solo e de planta. Entretanto, para uma melhor interpretação dessas informações, elas devem sempre estar associadas com o histórico de uso das glebas.

Assim, com este enfoque, no manejo da fertilidade do solo, um planejamento adequado de amostragens de solo deve ser elaborado, visando obter um histórico para auxiliar na interpretação dos resultados das análises químicas e físicas e ajustar as recomendações de corretivos e fertilizantes (químicos e orgânicos) para

a adequada manutenção da fertilidade do solo e conseqüentemente sua sustentabilidade.

Esse planejamento pode ser construído seguindo as seguintes etapas:

- 1) Para amostragens de solo mais representativas, dividir a área a ser trabalhada em glebas uniformes com relação à vegetação ou cultura anterior, topografia, cor dos solos, etc. O uso de imagens aéreas obtidas por satélites ou drones é ferramenta importante para essa divisão.
- 2) Para a amostragem de solo pode-se utilizar o sistema tradicional ou sistematizado em grades georreferenciadas de 1 a 2 ha, coletando-se amostras de solo nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm.
- 3) Para análises físicas e químicas, enviar as amostras para laboratórios integrantes dos programas de controle de qualidade e que possuem selos como comprovantes de suas participações e eficiência.
- 4) Nas solicitações do que analisar, informar o tipo de análises desejadas, por exemplo: granulometria (teores de areia, silte e argila), análises químicas de fertilidade de rotina com a inclusão de matéria orgânica e micronutriente (zinco, cobre, boro, ferro e manganês).
- 5) Para a interpretação dos resultados e definição das necessidades de calagem, gessagem e adubação, sempre solicitar a assistência de especialistas que também podem auxiliar na definição das fontes de corretivos e fertilizantes a serem adquiridas no mercado.
- 6) Acompanhar o desenvolvimento inicial das lavouras para identificação visual de possíveis deficiências nutricionais passíveis de serem corrigidas em tempo.
- 7) Amostragens de folhas das culturas para análises e diagnóstico do estado nutricional podem ser úteis no programa de manejo de nutrientes do sistema ILP. Para isso, devem-se observar os procedimentos específicos indicados para cada espécie vegetal.
- 8) Sempre registrar informações das produtividades obtidas, o que permite verificar se as adubações realizadas foram compatíveis com as quantidades de nutrientes exportadas nos produtos colhidos. Isto é possível com as

informações disponíveis sobre as quantidades de nutrientes, em kg Mg⁻¹ de produto colhido (grãos e forragem), principalmente para o nitrogênio, o enxofre, o fósforo, o potássio, o magnésio, e o cálcio, exportados nas colheitas.

- 9) Mesmo os especialistas devem sempre buscar constante atualização de informações e critérios de interpretação de e recomendação de corretivos e fertilizantes, mais adequados às características da região, do sistema ILP adotado e da propriedade rural.
- 10) Os passos de 1 a 9 devem ser seguidos e repetidos periodicamente, visando aferir as condições de fertilidade do solo e proceder aos ajustes necessários, ao longo de todo o período de condução do sistema ILP.

Considerações finais

De modo geral, o sistema ILP conduzido no projeto-piloto na Embrapa Milho e Sorgo possibilitou a manutenção de condições satisfatórias de fertilidade química do solo ao longo do tempo, sobretudo considerando que se trata de um esquema realístico de manejo/produção, análogo a uma pequena propriedade rural, associado à dinâmica de alternância de culturas/animais/finalidades nas glebas. Não obstante, constataram-se possibilidades de melhorias no monitoramento nutricional e manejo de correção e adubação das glebas.

Os resultados dos indicadores da fertilidade do solo nas glebas em ILP, avaliados no período de 2005 a 2018, revelam alguns resultados interessantes que servem de base para as tomadas de decisões neste e, principalmente, nos trabalhos futuros a serem desenvolvidos com sistemas intensivos de produção envolvendo a consorciação, a rotação e a sucessão de culturas com diferentes propósitos, como a produção de grãos, forragem e pastagem.

O primeiro aspecto está relacionado ao planejamento para a realização das amostragens de solo, considerando a necessidade de se obter resultados mais consistentes e padronizados. Neste aspecto, o sistema de amostragens sistematizadas, em grades e georreferenciadas, com repetições, possibilitaria obter resultados mais consistentes e análises estatísticas utilizando modelos adequados.

Outro aspecto é estabelecer programas de adubação utilizando o conceito de adubação de sistemas de produção de acordo com as exigências das culturas

e exportação de nutrientes, levando em consideração a finalidade de exploração, se para produção de grãos, silagem ou foragem.

Essas informações são essenciais para o estabelecimento de um balanço de nutrientes que, associado aos resultados das análises de solo, possibilita a elaboração de um programa mais adequado de correção do solo e adubação do sistema, evitando assim aplicações excessivas ou insuficientes de corretivos e fertilizantes e proporcionando uma maior sustentabilidade do sistema de produção.

Recomenda-se que o manejo da fertilidade do solo seja baseado no balanço de nutrientes o que permite melhor ajuste no fornecimento de fósforo e potássio, aumentando a eficiência de aproveitamento das reservas de P já existentes no solo e evitando que níveis deficitários de K venham a limitar o potencial produtivo das glebas.

Referências

- BORTOLUZZI, E. C.; PARIZE, G. L.; KORCHAGIN, J.; SILVA, V. R.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 262-271, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100026>.
- CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1987-1995, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.11.0642>.
- COELHO, A. M. Correção da acidez do solo e equilíbrio cálcio e magnésio em cultivos sucessivos de milho e feijão sob irrigação. In: EMBRAPA. Centro de Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo**: período 1992-1993. Sete Lagoas, 1994. p. 34-36.
- COELHO, A. M. **Potencial de utilização das técnicas de agricultura de precisão na recuperação da fertilidade dos solos sob pastagens degradadas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005a. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 68).
- COELHO, A. M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005b. p. 613-658.
- COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. de. Adubação fosfatada na cultura do milho sob condições irrigadas. In: EMBRAPA. Centro de Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo**: período 1992-1993. Sete Lagoas, 1994. p. 40-42.
- PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017.
- PIAS, O. C. de C.; TIECHER, T.; CHERUBIM, M. R.; SILVA, A. G. B.; BAYER, C. Does gypsum increase crop yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 675-692, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20125>.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. (ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5a. aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

SÁ, J. C. M. de. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (ed.). **Soil fertility, soil biology, and plant nutrition interrelationships**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p. 267-320.

SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; REIN, T. A. Manejo do fósforo em sistemas de cultivo na região de Cerrado. In: SEVERIANO, E. da C.; MORAIS, M. F. de; PAULA, A. M. de (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 239-285.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.