

APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO E DIFERENTES RESÍDUOS EM SOJA CULTIVADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO ⁽¹⁾

JULIANO CORULLI CORRÊA ^(2*); ELISA ENI FREITAG ⁽³⁾; LEONARDO THEODORO BÜLL ⁽³⁾;
CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL ⁽³⁾; DIRCEU MAXIMINO FERNANDES ⁽³⁾,
RAFAEL MARCELINO ⁽³⁾

RESUMO

A prática da correção da acidez do solo pela aplicação superficial de corretivos sobre a palha no sistema plantio direto se restringe ao calcário, não havendo maiores estudos em relação à escória de aciaria, lama cal e lodo de esgoto centrifugado. O objetivo do trabalho foi avaliar os índices de acidez do solo e a produtividade da soja em função da aplicação superficial de lodo de esgoto centrifugado, lama cal, escória de aciaria e calcário dolomítico. O trabalho foi desenvolvido em Latossolo Vermelho distrófico, durante os anos agrícolas de 2002 a 2005, sob sistema plantio direto. Os tratamentos constituíram da aplicação superficial de escória de aciaria (E), lama cal (Lcal), lodo de esgoto centrifugado (LC), calcário dolomítico e sem aplicação de corretivo, em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições. A aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal e lodo de esgoto centrifugado permite a correção da acidez do solo, o deslocamento do Ca^{2+} , o aumento da saturação por bases e redução do Al^{3+} até 40 cm, e para o calcário, até 20 cm, fatores que condicionaram o aumento da produtividade da soja para os tratamentos LC, E e Lcal em 2003/2004 e 2004/2005 e para LC e E em 2002/2003 no sistema plantio direto.

Palavras-chave: Lodo de esgoto, escória de aciaria, lama cal, calcário.

ABSTRACT

SURFACE APPLICATION OF LIMESTONE AND DIFFERENT RESIDUES ON SOYBEAN GROWN IN NO-TILL SYSTEM

The practice of correcting soil acidity by surface application of pH-correcting materials on crop residues in the no-till system is restricted to limestone. No further studies are available on the use of steel slag, lime mud, and centrifuged sewage sludge. The objective of this study was to evaluate soil acidity and yield of soybean as a function of surface application of centrifuged sewage sludge, lime mud, steel slag, and dolomitic limestone. The study was conducted on a dystrophic Clayey Rhodic Hapludox soil, during the 2002–2005 cropping seasons, under no-till system. Treatments consisted on surface application of slag – E, lime mud – Lcal, centrifuged sewage sludge – LC, dolomitic limestone, and zero application of correcting materials, conducted in a random block design with four replicates. Surface application of steel slag, lime mud, and centrifuged sewage sludge allowed soil acidity correction, Ca^{2+} displacement, increased base saturation, and Al^{3+} reduction down to 40cm depth, whereas for limestone those effects occurred down to 20 cm. The interaction among those factors promoted a soybean yield increase for the LC, E, Lcal, and limestone treatments in the 2003/04 and 2004/05 seasons, as well as for the LC and E treatments in the 2002/03 season, under the no-till system.

Key words: Sewage sludge, steel slag, lime mud, limestone.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 16 de setembro de 2008 e aceito em 24 de abril de 2009.

⁽²⁾ Embrapa Suínos e Aves, Caixa Postal 21, 89700-000 Concórdia (SC). E-mail: juliano@cnpa.embrapa.br (*) Autor correspondente.

⁽³⁾ Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Fazenda Experimental Lageado, Caixa Postal 237, 18603-970 Botucatu (SP). E-mail: correajc@superig.com.br; elisa.freitag@hotmail.com; bull@fca.unesp.br; crusciol@fca.unesp.br; rmarcelino@iac.sp.gov.br

1. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos solos agrícolas brasileiros possui alta acidez (QUAGGIO, 2000), principalmente os solos do cerrado, sendo esse fator um dos principais responsáveis pela baixa produtividade das culturas, independentemente do sistema de produção. Portanto, é de fundamental importância a utilização correta de corretivos na neutralização da acidez do solo, a fim de assegurar, de maneira sustentável, o rendimento da produção agrícola.

Um dos aspectos mais polêmicos no manejo do solo no sistema plantio direto é a não-incorporação do calcário, mesmo sabendo ser esse corretivo um produto de baixa solubilidade em água, com mobilidade limitada de seus produtos de reação (carbonatos e bicarbonatos) no perfil do solo, o que lhe confere lenta reatividade (RAMOS et al., 2006). No entanto, existem outros corretivos de acidez, como a escória de aciaria, lama cal e lodo de esgoto centrifugado, que podem possibilitar maior solubilidade, além de seus produtos da reação de dissociação possuírem maior mobilidade no solo, permitindo assim, a correção da acidez do solo e o deslocamento da frente alcalinizante no perfil com menor intervalo de tempo em relação ao calcário (PRADO et al., 2002; CORRÊA et al., 2007, 2008A, B, C, 2009).

A grande preocupação da reutilização desses resíduos industriais e urbanos na agricultura está relacionada à presença de metais pesados e microrganismos patogênicos em sua composição química, bem como ao tipo de sistema de produção agrícola a ser explorado, devendo a maior taxa de aplicação não ultrapassar os valores pré-estabelecidos pela resolução n.º 375 do CONAMA (2006) para lodo de esgoto e pela lei NBR 10004 (ABNT, 1987) para os resíduos industriais. Vale ressaltar que CORRÊA et al. (2008a, b), utilizando os mesmos resíduos industriais e urbanos não observaram alteração nos teores de metais pesados em Latossolo Vermelho distrófico sob sistema plantio direto.

A aplicação de corretivos de acidez na superfície do solo no sistema plantio direto consolidado tem sido eficaz em reduzir a acidez do solo, principalmente nas camadas mais superficiais, até 10 cm (MOREIRA et al., 2001, AMARAL et al., 2004A) e, em alguns casos, nas camadas subsuperficiais, para profundidades maiores que 20 cm (CAIRES et al., 2000; 2006; MELLO et al., 2003), além do aumento dos teores de cálcio e redução do alumínio tóxico. Esses fatores justificam o aumento da produtividade da soja, por proporcionar melhor crescimento do sistema radicular,

sem haver o comprometimento quanto à disponibilidade de água e nutrientes às plantas, permitindo desenvolvimento adequado à cultura (CAIRES et al., 2006).

Nota-se que na maioria dos experimentos o poder de neutralização adotado para o calcário, a partir do método de saturação por bases, não segue o mesmo comportamento para outros materiais corretivos da acidez do solo, como a escória de siderurgia, lama cal e lodo de esgoto centrifugado (PRADO e FERNANDES, 2000; CARVALHO-PUPPATO et al., 2004; RAMOS et al., 2006; CORRÊA et al., 2007; 2008a, b, c; 2009). Há, portanto, a necessidade de mais estudos em relação à aplicação de materiais que permitam a correção da acidez do solo, com o objetivo de favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e aumentar a disponibilidade de água e nutrientes à cultura.

O objetivo do trabalho foi avaliar os índices de acidez do solo e a produtividade da soja em função da aplicação superficial de lodos de esgoto centrifugado, lama cal, escória de aciaria e calcário dolomítico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido, durante os anos agrícolas de 2002 a 2005, em condições de campo, em área sob sistema plantio direto, em Botucatu (SP), na latitude de 22° 51'15''S, longitude de 48° 26'30''W e altitude de 740 m. O clima predominante é do tipo Cwb, de acordo com a classificação climática de Köppen.

O trabalho foi desenvolvido em Latossolo Vermelho distrófico, textura média (EMBRAPA, 1999), no sistema plantio direto. O solo foi caracterizado quimicamente, segundo método descrito por RAIJ et al. (2001), nas profundidades de 0 - 5, 5 - 10, 10 - 20 e 20 - 40 cm (Tabela 1).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos de quatro materiais corretivos (1 - calcário dolomítico; 2 - lodo de esgoto centrifugado - LC; 3 - escória de aciaria - E; 4 - lama cal - Lcal) e uma testemunha (sem aplicação de corretivos). As parcelas tinham 6 m de largura e 7 m de comprimento, com 1 m entre parcelas e 3 m entre blocos.

Antes da instalação do experimento, determinou-se a quantidade de metais pesados presentes em cada resíduo (Tabela 2), empregando-se o método descrito pelo Laboratório Nacional de Referência Vegetal (1983). As leituras foram analisadas em espectrofotômetro de emissão em

plasma induzida em argônio (ICP/AES), comparando-se os valores dos resíduos industriais (Lcal e E) às quantidades permitidas na norma de aplicação de resíduos sólidos de acordo com a NBR 10004/1987 e

os valores do lodo de esgoto (LC) à legislação imposta pela resolução nº 375 do CONAMA (2006). Com os três resíduos os resultados foram inferiores aos valores limítrofes propostos pela legislação brasileira.

Tabela 1. Análise química inicial do solo nas varias profundidades de amostragem

Profundidade cm	pH	M.O. g dm ⁻³	P res. mg dm ⁻³	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
				mmol _c dm ⁻³							
0 – 5	4,0	16	6	7	38	0,6	12	6	19	57	33
5 – 10	4,0	18	6	6	45	1,0	19	9	29	74	39
10 – 20	4,2	15	5	5	45	0,7	13	5	19	64	30
20 – 40	3,9	10	4	6	42	0,6	12	3	16	58	27

Tabela 2. Resultados da análise química dos resíduos industriais e urbanos

Resíduos	Umíd %	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	Ca	Mg	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb
		g100 g ⁻¹ matéria seca			mmol _c dm ⁻³							
LC	5	2,0	0,3	2,5	28	0,4	14	traço	4	traço	7	17
Lcal	19	0,2	0,1	0,4	37	0,6	1,4	traço	13	traço	96	60
E	2	1,4	0,1	0,3	23	2,1	5,0	traço	61	traço	19	308
Calcário	4	0,0	0,0	0,0	20	14	traço	traço	traço	traço	traço	traço
CONAMA 2006 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	41	39	1000	17	420	300
NBR 10004 ⁽²⁾	-	-	-	-	-	-	1000	n.a. ⁽³⁾	n.a.	100	n.a.	1000

⁽¹⁾ Legislação para os padrões legais vigentes de metais pesados para lodos de esgoto: Resolução Conama n.º 375 (Conama, 2006). ⁽²⁾ Legislação para os padrões legais vigentes de metais pesados para resíduos sólidos: NBR 10004 (ABNT, 1987). ⁽³⁾ Não aplicável (não descrito o limite na NBR 10004).

As características físicas e químicas dos corretivos, determinadas segundo metodologia descrita em LABORATÓRIO... (1983), estão contidas nas Tabelas 2 e 3. Mediante as características de cada material, foram estipuladas as doses para elevar a saturação por bases à 60%, na camada de 0–20 cm, seguindo o método proposto por RAJ et al. (1996). Assim, utilizaram-se as doses de 2,3, 2,6, 3,5 e 1,7 t ha⁻¹ de matéria seca do produto *in natura*, respectivamente, para os tratamentos com calcário, LC, E e Lcal.

Antes da instalação do experimento, realizou-se a dessecação do feijão guandu, cultivado com a finalidade de produzir palhada para o sistema de plantio direto; essa espécie produziu 7400 kg ha⁻¹ de matéria seca. Posteriormente, os produtos foram aplicados a lanço (agosto de 2002) sobre a palhada. A soja (safra 2002/2003) foi semeada três meses após a aplicação dos produtos.

A semeadura da soja nas safras de 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005 foi realizada com a

cultivar Embrapa 48, sendo as sementes submetidas à inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* no espaçamento de 45 cm entre linhas e densidade de 32 sementes por metro, com densidade final de 22 plantas m⁻¹, em média, aplicando-se adubação de 300 kg ha⁻¹ com a fórmula 00-20-10. Durante o período de inverno, em 2003 e 2004, cultivou-se aveia preta, cultivar aveia preta comum, aplicando-se 100 kg ha⁻¹ de uréia, com a finalidade de formação de palhada.

A amostragem do solo foi realizada antes da semeadura da soja, aos 3, 15 e 27 meses após a aplicação dos produtos, nas profundidades de 0 a 5; 5 a 10; 10 a 20 e 20 a 40 cm utilizando-se trado tipo sonda, coletando-se quatro amostras por parcela, para constituir uma amostra composta. Foram analisadas as seguintes variáveis: pH (CaCl₂), Ca²⁺, Al³⁺ e V% (RAJ et al., 2001). A soja foi colhida com colhedora mecânica de parcelas; em seguida, o material colhido foi peneirado e os grãos de cada unidade experimental, tiveram sua umidade corrigida para 13%.

Tabela 3. Resultados em porcentagem de partículas retidas nas peneiras de 10, 20, 50 e Fundo e Reatividade (RE), Poder Neutralizante (PN) e Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT)

Resíduos	*Pen 10	*Pen 20	*Pen 50	*Fundo	RE	PN	PRNT
	Ø = 2 mm	Ø = 0,84 mm	Ø = 0,30 mm				
Lcal	0,00	0,00	0,05	99,95	99,98	99,00	98,98
LC	2,40	14,63	40,10	42,87	69,85	93,00	65,00
E	2,20	6,15	32,53	59,10	79,80	60,00	47,88
Calcário	0,00	4,20	18,80	77,00	89,12	80,00	71,29

Os resultados foram submetidos à análise de variância e posterior teste de média, com a aplicação do teste Tukey a 5% para formação do erro-padrão da média, com a finalidade de comparar os tratamentos para cada profundidade no solo. A análise estatística para variável produtividade foi realizada utilizando parcela subdividida, cujas parcelas foram constituídas pelos tratamentos e as subparcelas pelos anos de cultivo, com a aplicação do teste Tukey a 5%. O programa utilizado para as análises foi o SAS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise de variância (Tabela 4) nota-se que aos três meses de reação do calcário e dos resíduos houve efeito significativo para saturação por bases (V%) e alumínio (Al) em todas as camadas

estudadas, já para pH e cálcio (Ca) essa diferença foi verificada até 20 cm de profundidade. Aos 15 meses de reação houve significância para pH, V% e Ca em todas as camadas, mas não foram verificadas diferenças para o Al na camada 10 a 20 cm de profundidade. Na última amostragem, aos 27 meses, pode-se verificar diferença para Ca e V% em todas as camadas e não houve efeito significativo para pH nas camadas de 10 a 20 cm e para Al na camada 20 a 40 cm de profundidade.

Os índices de acidez do solo foram favorecidos mediante a aplicação superficial de calcário, lodo de esgoto (LC), escória de aciaria (E) e lama cal (Lcal), no sistema plantio direto, resultados justificados pelo aumento das variáveis pH, V%, Ca²⁺, e redução do Al³⁺ do solo (Figuras 1 e 2), em especial nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm do solo.

Tabela 4. Quadro de análise de variância para as propriedades químicas do solo) em função da aplicação superficial de calcário, lodo de esgoto centrifugado (LC), escória de aciaria (E), lama cal (Lcal) e sem aplicação de corretivos do solo (Testemunha), em sistema plantio direto, aos 3, 15 e 27 meses de reação do calcário e resíduos

	3 meses				15 meses				27 meses			
	pH	V %	Ca	Al	pH	V %	Ca	Al	pH	V %	Ca	Al
	0 – 5 cm											
Trat.	*	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**
Valores de F	3,41	5,18	7,03	9,30	8,67	26,7	72,4	3,33	6,89	70,2	52,9	7,43
CV (%)	4	12	15	24	9	12	14	54	7	5	12	41
	5 – 10 cm											
Trat.	*	**	**	**	*	**	**	*	*	**	**	n.s.
Valores de F	3,74	31,6	64,6	14,4	3,82	11,8	23,5	3,23	2,36	10,4	22,5	0,50
CV (%)	5	9	12	34	10	18	20	50	7	9	13	55
	10 – 20 cm											
Trat.	**	*	*	**	*	*	**	n.s.	n.s.	**	**	n.s.
Valores de F	4,67	3,25	3,03	29,4	2,80	2,63	9,39	1,20	0,70	8,89	27,6	0,29
CV (%)	6	18	22	17	5	20	13	43	4	9	14	51
	20 – 40 cm											
Trat.	n.s.	*	n.s.	*	*	*	*	n.s.	n.s.	**	**	n.s.
Valores de F	1,05	3,32	1,69	4,40	3,72	3,63	3,57	0,72	1,89	20,3	35,4	0,42
CV (%)	7	15	24	40	6	21	17	63	5	10	13	43

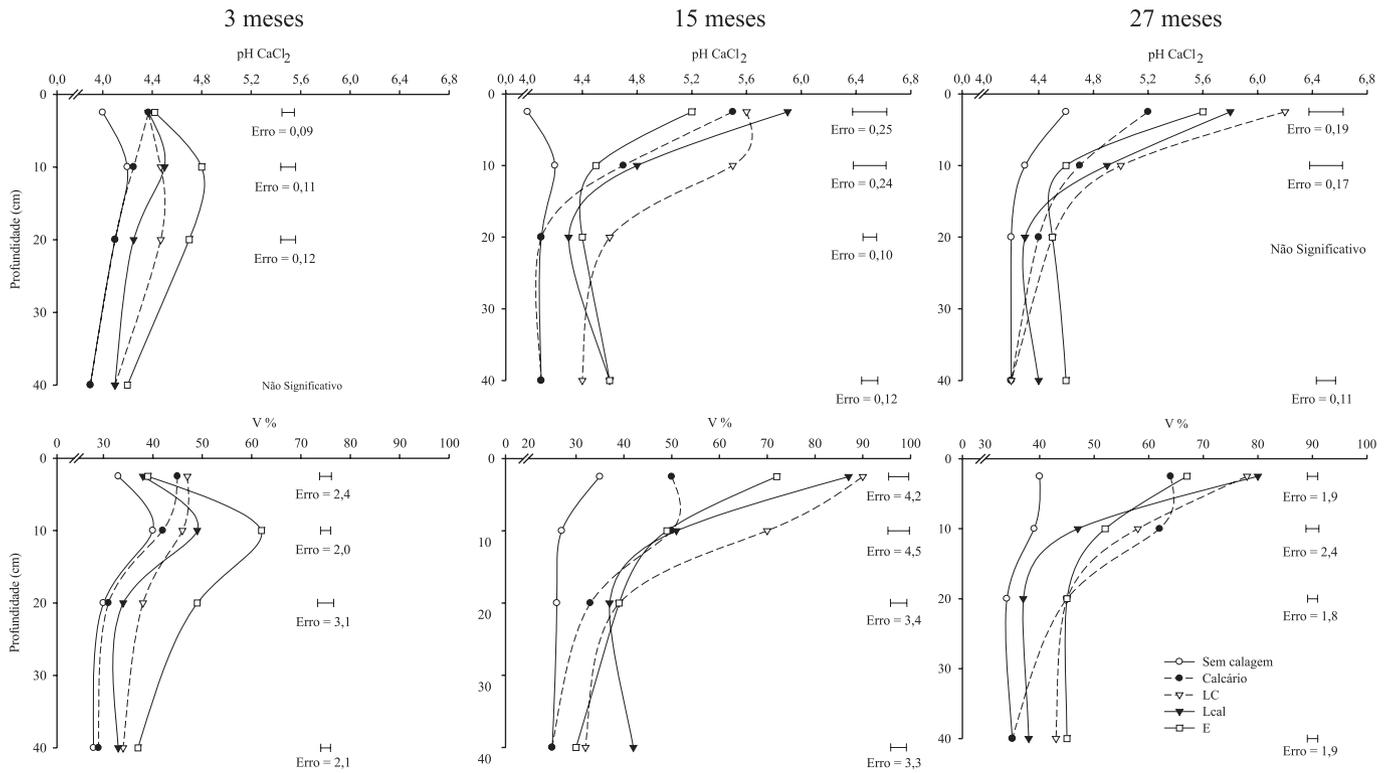


Figura 1. Valores de pH e saturação por bases (V%), em diferentes profundidades de um Latossolo Vermelho distrófico, aos 3, 15 e 27 meses após aplicação superficial de calcário, lodo de esgoto centrifugado (LC), escória de aciaria (E) e lama cal (Lcal) no sistema plantio direto.

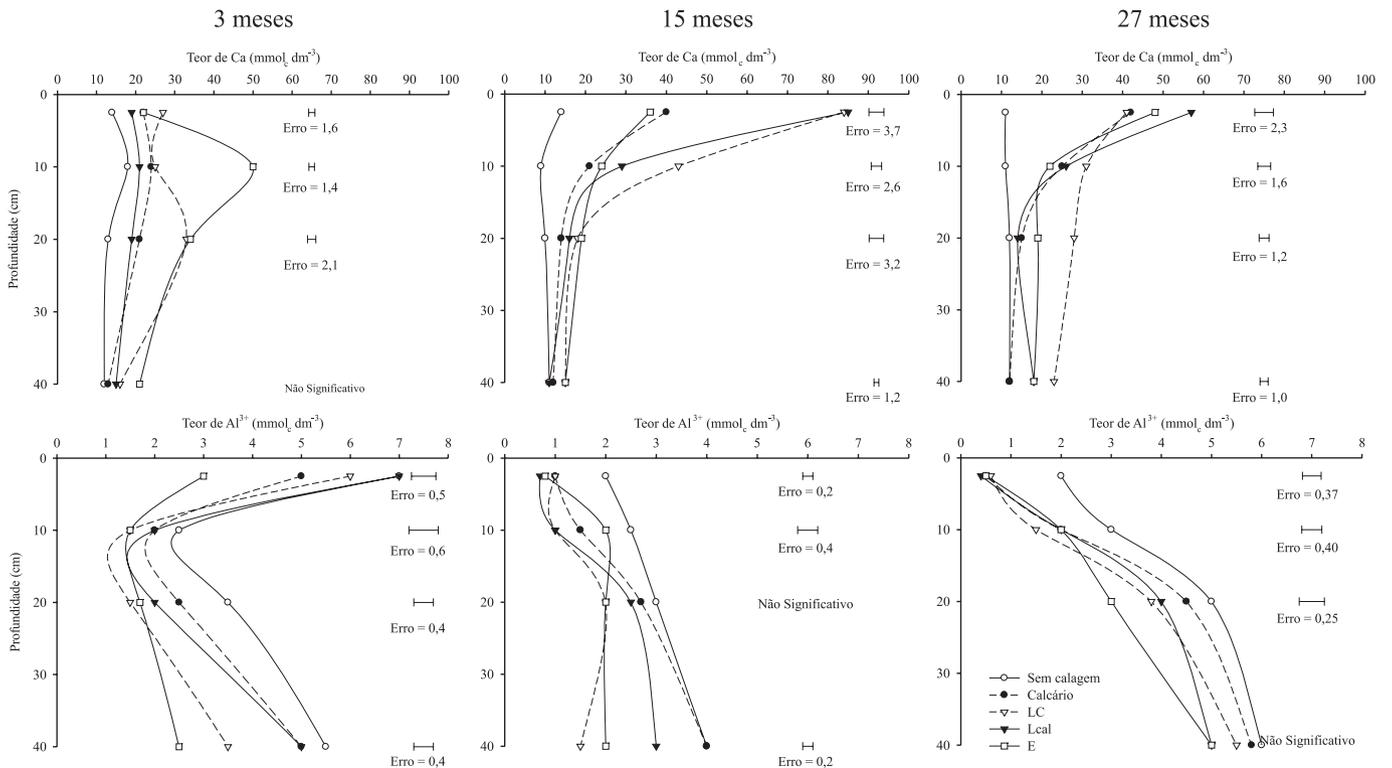


Figura 2. Teores de cálcio e alumínio em diferentes profundidades de um Latossolo Vermelho distrófico, aos 3, 15 e 27 meses após aplicação superficial de calcário, lodo de esgoto centrifugado (LC), escória de aciaria (E) e lama cal (Lcal) no sistema plantio direto.

Esses resultados permitem demonstrar que os resíduos escória de aciaria, lama cal e lodo de esgoto centrifugado podem promover a neutralização da acidez do solo até a profundidade de 40 cm, enquanto a calagem proporcionou efeito até a profundidade de 20 cm, com 27 meses de reação.

Aos três meses de reação dos resíduos e do calcário, pode-se constatar que as reações de neutralização da acidez do solo estão nas camadas de 10 – 20 cm para os resíduos E e LC, 5 – 10 cm para Lcal e, ainda, na superfície para a calagem, em razão dos resultados de pH e V%. Entre os resíduos, a escória de aciaria foi mais eficaz na correção da acidez do solo, nas camadas de 5 – 10 e 10 – 20 cm nesse curto intervalo de tempo. Com base nesses resultados, pode-se inferir que há a necessidade de se realizar a calagem com antecedência superior a três meses de reação à instalação da cultura de interesse, quando esta for realizada sobre a palhada no sistema plantio direto.

Os valores de pH do solo e de saturação por bases foram intensificados com o passar do tempo em razão da aplicação superficial dos resíduos e do calcário. Aos 15 meses, as reações de neutralização da acidez do solo alcançaram novos patamares, representados pelas seguintes camadas de 20 a 40 cm para os corretivos E, LC e Lcal e de 5 a 10 cm para o calcário (Figura 1). Aos 27 meses pode-se constatar que as reações de neutralização da acidez do solo, impostas pela calagem, alcançaram a camada de 10 a 20 cm, aumentando os valores de V%, mesmo ainda sem haver diferença significativa de pH em relação ao tratamento sem calagem (Figura 1). Esses resultados corroboram os de MELO et al. (2001) e OLIVEIRA et al. (2002) para lodo de esgoto incorporado; os de PRADO e FERNANDES (2003); CARVALHO-PUPATTO et al. (2004) e RAMOS et al. (2006) para escória de aciaria incorporada; e os de MOREIRA et al. (2001), AMARAL et al. (2004a) para o calcário aplicado em superfície.

A maior eficiência na neutralização da acidez do solo pelos resíduos E, Lcal e LC em relação ao calcário pode ser explicada em razão do silicato (CaSiO_3), hidróxido de sódio (NaOH) e óxidos de cálcio (CaO). Em materiais silicatados há partículas mais porosas, resultado do processo de sua fusão para fabricação de ferro-gusa e aço. Esta característica aumenta sua área específica, possibilita solubilidade de seis a sete vezes maior que o calcário (ALCARDE, 1992 e ALCARDE e RODELLA, 2003), facilitando também sua mobilidade no perfil do solo (RAMOS et al., 2006). Na lama cal observaram-se os maiores valores de PN e RE quando comparados ao calcário (Tabela 3), em razão de em sua composição haver NaOH e CaOH, e ser o ânion da reação de dissociação a hidroxila (OH^-)

mais solúvel que o carbonato (HCO_3^-) do calcário, ambos responsáveis pela correção da acidez do solo.

No lodo de esgoto – LC, por receber CaO (cal virgem) em sua composição para eliminação de patógenos, estabilização de resíduos e redução do teor de umidade, há maior PN que o calcário que é composto de CaCO_3 e MgCO_3 (Tabela 3). Isso permite maior dissociação do ânion acompanhante (QUAGGIO et al., 2000), e ocorre também a formação de íons amônio devido à oxidação do N-orgânico (BERTON et al., 1989); esses dois fatores fazem com que ocorra a neutralização da acidez do solo.

A partir de 15 meses, pode-se notar incremento nos teores de pH e V%, com a aplicação superficial dos resíduos e do calcário, principalmente nos primeiros centímetros do perfil, representado pelas camadas de 0 a 5 e de 5 a 10 cm (Figura 1). É importante lembrar que aumento de V% na superfície do solo atingiu as camadas subjacentes em razão do estabelecimento da frente alcalinizante, pela neutralização da acidez do solo.

Durante o período experimental, o volume de precipitação pluvial total foi adequado, com aproximadamente 3200 mm. A manutenção da umidade do solo permite a dissolução das partículas dos corretivos, aumentando sua reação no solo. Este fato aliado ao manejo da adubação e à rotação de culturas (MIYAZAWA et al., 2002) favoreceram a correção da acidez em subsuperfície observada em todos os tratamentos após 27 meses.

A aplicação superficial de resíduos possibilitou o incremento dos teores de Ca^{2+} no solo, em especial nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm, principalmente, a partir de 15 meses de reação, denotando a solubilidade dos resíduos e do calcário para o fornecimento desse nutriente ao solo (Figura 2). Deve-se ressaltar o rápido deslocamento desse nutriente no perfil do solo, chegando à profundidade de 40 cm com apenas três meses de reação para os resíduos E, LC e Lcal, enquanto a calagem alcançou a profundidade de 20 cm, aos 27 meses de reação. Os resultados verificados para calcário aplicado em superfície até 20 cm e aos 27 meses de reação confirmam os resultados de CAIRES et al. (2004), CIOTTA et al. (2004) e FIDALSKI e TORMENA (2005).

Para a calagem superficial, a lixiviação de cátions depende, principalmente, do teor do nutriente na solução e da quantidade de água percolada através do perfil do solo. Este processo é favorecido quando as cargas negativas dos ácidos húmicos e das argilas nas camadas superficiais já estiverem sido ocupados, permitindo com que haja a ligação com ânions solúveis como Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , OAc^- , e HCO_3^-

(ROSOLEM et al., 2003). Essa justificativa auxilia a explicação para o deslocamento Ca^{2+} no perfil do solo, somado o fato desses resíduos proporcionarem alto teor desse nutriente nas camadas superficiais do solo (Figura 2), em razão da alta concentração em suas composições químicas (Tabela 2).

Tabela 5. Produtividade da soja (cultivar Embrapa 48) em função da aplicação superficial de calcário, lodo de esgoto centrifugado (LC), escória de aciaria (E), lama cal (Lcal) e sem aplicação de corretivos do solo (Testemunha), em sistema plantio direto, em 2003, 2004 e 2005

Tratamentos	2003	2004	2005
	t ha ⁻¹		
Calcário	4055 ABa	3571 Ab	3027 Bc
LC	4377 Aa	3809 Ab	3272 ABc
Lcal	4049 ABa	3584 Aab	3223 ABb
E	4457 Aa	3885 Ab	3578 Ab
Sem calagem	3786 Ba	2997 Bb	2626 Cb
Tratamentos (T)	-	**	-
Época (E)	-	**	-
T x E	-	*	-
CV (%)	-	7,78	-

Letras maiúsculas comparam os tratamentos nas colunas e letras minúsculas comparam os tratamentos nas linhas. Os símbolos ** e * representam o efeito significativo a 1 e 5 % pelo teste Tukey.

É importante ressaltar que as partículas de calcário, aplicadas superficialmente, associadas a cátions-ligantes alcançam maiores profundidades em razão do deslocamento mecânico através de canais radiculares, microcanais biológicos (bioporos) e planos de fraqueza do próprio solo, pela lixiviação da água de chuva nestas passagens naturais do solo, mantidas intactos em razão da ausência de movimentação do solo (PAVAN, 1994; OLIVEIRA e PAVAN, 1996; PETRERE e ANGHINONI, 2001; AMARAL et al., 2004b). Sabendo-se que a água de percolação está enriquecida com os produtos de dissolução do calcário, esse fato vem contribuir para explicar as maiores neutralizações de acidez e deslocamento de cátions de reação básica, permitindo assim atuação em profundidade (RHEINHEIMER et al., 2000).

A redução do teor de Al^{+3} (acidez trocável) em função da aplicação dos resíduos E e LC podem ser percebidos até a profundidade de 20 cm, com 27 meses de reação (Figura 2). Esses resultados corroboram os de BERTON et al. (1989), MELO e MARQUES (2000), e OLIVEIRA et al. (2002) para lodo de esgoto, que atribuem esses resultados a alcalinidade dos materiais

utilizados, visto que no processo de produção são adicionados cal virgem (CaO). Já PRADO e FERNANDES (2000 e 2003) e CARVALHO-PUPATTO (2004) demonstraram redução de acidez potencial para a escória de aciaria em razão de agentes neutralizantes da acidez como SiO_3^{2-} .

O calcário proporcionou redução do alumínio tóxico do solo (Figura 2) até a camada de 10 a 20 cm, quando comparado à testemunha, na última época de reação, ficando restrito à mesma camada do pH do solo (Figura 1). Quando o calcário é aplicado em superfície, menores volumes de solo são atingidos, concentrando-se assim seu efeito inicial nas primeiras camadas superficiais e com o tempo de cultivo os valores das camadas subsuperficiais tendem a aumentar (OLIVEIRA e PAVAN, 1996; CAIRES et al., 1998).

A calagem não teve efeito rápido na redução da acidez do subsolo, pois de acordo com COSTA (2000), a lixiviação de sais através do perfil e o avanço da correção da acidez do solo somente ocorrerão após a neutralização da camada de aplicação ou da alcançada pela migração (RHEINHEIMER et al., 2000). A evolução da correção da acidez do solo foi contínua durante o período de 27 meses, permitindo assim que as camadas mais profundas pudessem ser corrigidas em razão da alcalinização destes horizontes com o passar do tempo (FIDALSKI e TORMENA, 2005), contrariando assim alguns resultados de que a calagem ficaria restrita apenas a camada de 0 a 5 cm (MOREIRA et al., 2001). Pode-se dizer que a aplicação superficial de calcário, LC, E e Lcal traz grandes benefícios na redução da acidez trocável, em razão da diminuição do alumínio tóxico (Figura 2), proporcionando melhor ambiente ao crescimento radicular e com isso maior absorção de água e nutrientes, o que induz melhor desenvolvimento da parte aérea e produtividade das culturas (CAIRES et al. 2006).

Em maiores profundidades do perfil do solo onde predomina maiores teores de Al^{+3} , como a camada de 20 a 40 cm (Figura 2), o alumínio pode ocupar o lugar do cálcio, por estar em maior concentração e por possuir maior capacidade eletrostática e maior afinidade de ligação (trivalente), permitindo assim haver maior concentração de cálcio e redução do teor do alumínio tóxico. É importante lembrar que o deslocamento do Ca-ligante para camadas subsuperficiais só ocorre quando a constante de estabilidade do complexo é maior que a constante de estabilidade do cálcio-solo e a constante alumínio-ligante deve ser menor que a do alumínio-solo (AMARAL et al., 2004b).

A aplicação superficial das diferentes fontes de corretivos, no sistema plantio direto, aumentou a produtividade da soja em, 671, 888 e 952 kg ha⁻¹, respectivamente, em 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005, entre o tratamento com escória e a testemunha (Tabela 5).

Em 2003, os tratamentos com maiores produtividades foram o LC e E; em 2004 e 2005, os resíduos e o calcário foram superiores a testemunha (sem calagem); vale ressaltar que no último ano (2005) a E foi superior ao calcário (Tabela 5), resultado justificado pelo seu maior efeito residual para pH, V% e Al na camada de 20 – 40 cm (Figuras 1 e 2). Para o desdobramento de ano, para cada tratamento, pode-se verificar que, com exceção do tratamento Lcal, 2003 foi o ano em que houve maior produtividade de soja; também em 2003, em relação a 2005, existe maior produtividade para Lcal.

A razão para a redução da produtividade em relação aos anos de plantio estaria ligado às melhores condições climáticas, principalmente, precipitação pluvial no primeiro ano; ausência de ferrugem asiática neste mesmo ano; aumento dos teores de Al nas maiores profundidades do solo aos 27 meses de reação; redução nos valores de V% nas primeiras camadas, também neste último período de reação dos resíduos e do calcário. CORRÊA et al. (2007, 2008a, b, c e 2009) demonstraram a eficiência dos resíduos E, Lcal, LC e calcário nas propriedades químicas e físicas do solo sem prejuízo ao ambiente com relação à presença de metais pesados no solo e nas plantas, quando aplicados sobre a superfície no sistema plantio direto.

Esse ganho de produtividade demonstrado pela soja pode ser explicado em razão de esses resíduos (LC, Lcal e E) terem favorecido os atributos químicos do solo como pH, V%, Ca²⁺, reduzir o Al³⁺ (Figuras 1 e 2), além de notar em suas composições a presença de N, P₂O₅ e K₂O (Tabela 2), durante os três anos de cultivo dessa leguminosa. Portanto, a aplicação desses resíduos sobre a superfície do solo, no sistema plantio direto, pode ser uma alternativa para se obter melhores produtividades para a cultura da soja, com especial ênfase para escória de aciaria, lodo de esgoto centrifugado e lama cal, sem impacto ao ambiente, uma vez que foram atendidas as diretrizes de utilização na resolução do CONAMA 375 (2006) para lodo de esgoto e a lei NBR 10004 (ABNT 1987) para resíduos industriais.

No ano agrícola de 2004/2005, no tratamento calcário, os resultados foram inferiores à escória de aciaria, em razão de sua ação de pH e V% ficarem restritas à profundidade de 20 cm após 27 meses de

reação (Figuras 1 e 2), bem como por esse corretivo não ter em sua composição N, P e K (Tabela 2), fato que provavelmente condicionou menor exploração radicular em profundidade reduzindo a absorção de água e nutrientes. A disponibilidade adequada de Ca e Mg trocáveis ao longo do perfil do solo contribuiu para a alta produtividade da soja, corroborando os resultados de OLIVEIRA e PAVAN (1996); CAÍRES et al. (1998; 2000 ;2003); MOREIRA et al. (2001), que constataram aumento de produção de soja pela aplicação da calagem superficial em solos ácidos; esses autores atribuem a resposta da cultura à neutralização da acidez do solo na camada superficial e subsuperficial.

4. CONCLUSÃO

A aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal e lodo de esgoto centrifugado permite a correção da acidez do solo, o deslocamento do Ca²⁺, o aumento da saturação por bases e a redução do Al³⁺ até 40 cm e para o calcário até 20 cm, fatores que condicionam o aumento da produtividade da soja para os tratamentos LC, E e Lcal nos anos de 2003/2004 e 2004/2005 e para LC e E em 2002/2003 no sistema plantio direto.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987. 63p.
- ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez do solo**: Características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA, 1992. 62p. (Boletim Técnico 6)
- ALCARDE, J.A.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A. S.; ALVARES V., V.H. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.291-334.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.115-123, 2004a.
- AMARAL, A.S.; ANGHIONI, I.; HINRICHIS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.359-367, 2004b.
- BERTON, R.S.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.187-192, 1989.

- CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.161-169, 2000.
- CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUJO, F.G.; KUSMAM, M.T. Alterações químicas do solo e respostas da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.
- CAIRES, E.F.; KUSMAM, M.T.; BARTH, G.; GARBUJO, F.G.; PADILHA, J.M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.125-136, 2004.
- CAIRES, E.F.; CORRÊA, J.C.L.; CHURKA, S.; BARTH, G.; GARBUJO, F.J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agrícola**, v.63, p.502-509, 2006.
- CAIRES, E.F.; MADRUGA, E.F.; CHUEIRI, W.A.; FIGUEIREDO, A. Alterações das características químicas do solo e respostas da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.27-34, 1998.
- CARVALHO-PUPATTO, J.G.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1213-1218, 2004.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J.A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolos Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.317-326, 2004.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n.º 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=506/normas_01.htm>. Acesso em: 16 mar. 2008.
- CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MAUAD, M. & MARCELINO, M. Correção da acidez e mobilidade de íons pela aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1307-1317, 2007.
- CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; FERNANDES, D.M.; PERES, M.G.M. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1583-1590, 2008a.
- CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; PAGANINI, W.; GUERRINI, I.A. Disponibilidade de metais pesados em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.411-419, 2008b.
- CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; TECCHIO, M.A. Aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1209-1219, 2008c.
- CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MORAES, M.H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, 2009 (no prelo).
- COSTA, A. Doses e métodos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja/trigo em sistema de plantio direto. 2000, 146p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-FCA/UNESP, Botucatu.
- EMBRAPA **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1999. 412 p.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Dinâmica na calagem superficial em um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.235-247, 2005.
- LANARV, LABORATÓRIO NACIONAL DE REFERÊNCIA VEGETAL. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: Métodos Oficiais**. Brasília, 1983, 104p.
- MELLO, J.C.A.; VILLAS-BOAS, R.L.; LIMA, E.V.; CRUSCIOL, C.A.C.; BÜLL, L.T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo Distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.553-561, 2003.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; MELO, V.P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.P.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Biossólidos na Agricultura**. 1.ed. São Paulo: SABESP, 2001. Cap. 11, 468p.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.109-141.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRACHINI, J.C. Evolution of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.45, p.251-256, 2002.
- MOREIRA, S.G.; KIEHL, J.C. PROCHNOW, L.I. & PAULETTI, V. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade do milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.71-81, 2001.
- OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, v.38, p.47-57, 1996.
- OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R. & ROSSETO, R. Efeito das aplicações sucessivas de lodo de esgoto em Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana de açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.505-519, 2002.

PAVAN, M.A. Movimento de calcário no solo através de técnicas de manejo da cobertura vegetal em pomares de macieira. *Revista Bras. Ci. Frut.*, v.16, p.86-91 1994.

PETREIRE, C.; ANGHINONI, I. Alterações de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.885-895, 2001.

PRADO, R. de M.; COUTINHO, E.L.M.; ROQUE, C.G.; VILLAR, M.L. Avaliação da escória de siderurgia e de calcário como corretivo da acidez do solo no cultivo do alface. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.339-546, 2002.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo na soqueira da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.287-296, 2003.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana de açúcar em vaso. *Sciencia Agricola*, v.57, p.739-744, 2000.

QUAGGIO, J.A. **Acidez e Calagem em Solos Tropicais**. 1.ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2000. 111p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico & Fundação IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100)

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RAMOS, L.A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.849-857, 2006.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E.C.; GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.797-805, 2000.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; OLIVEIRA, R.H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.38, p.301-309, 2003.