



Alterações eletroquímicas do solo em resposta a elevação da saturação por bases

Léo Adriano CHIG *¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Cuiabá, Cuiabá, MT, Brasil.
*E-mail: leochig@gmail.com

Submetido em: 30/08/2024; Aceito em: 15/05/2025; Publicado em: 23/05/2025.

RESUMO: Este estudo investigou as mudanças eletroquímicas em um Latossolo Vermelho Distrófico sujeito a diferentes níveis de saturação por bases. O solo, coletado na região centro-sul do estado de Mato Grosso, foi submetido a nove tratamentos visando elevar a saturação por bases, utilizando calcário dolomítico, além de uma testemunha sem aplicação de CaCO₃. No laboratório, foram realizadas medições do Ponto de Efeito Salino Nulo (PESN) e do potencial elétrico superficial (PES) para avaliar as mudanças nos atributos químicos do solo após 30 e 90 dias da calagem. Os resultados indicaram um impacto significativo da elevação da saturação por bases nas propriedades eletroquímicas do solo, incluindo aumento do pH e dos teores de Mg²⁺, além da redução de prótons de H⁺ na solução do solo. Foi observado também que o PESN aumentou com o incremento do pH, demonstrando o efeito do aumento da saturação por bases neste atributo, enquanto o pH do solo permaneceu consistentemente superior ao PESN em todos os tratamentos, indicando uma alta quantidade de cargas negativas no solo. Notavelmente, nos primeiros 30 dias após a calagem, houve uma diminuição dos ânions com o aumento das doses de cálcio, mas após 90 dias de incubação, eles voltaram a aumentar.

Palavras-chave: eletroquímica do solo; fertilidade do solo; solos ácidos; correção do solo.

Electrochemical changes in the soil in response to increased base saturation

ABSTRACT: This study investigated the electrochemical changes in a Dystrophic Red Oxisol subjected to different base saturation levels. The soil, collected in the central-southern region of Mato Grosso, underwent nine treatments aimed at increasing base saturation, utilizing dolomitic limestone, alongside a control without applying CaCO₃. In the laboratory, measurements of the Zero Salt Effect Point (PESN) and surface electrical potential (PES) were conducted to assess changes in the soil's chemical attributes after 30 and 90 days of liming. The results revealed a significant impact of increasing base saturation on the soil's electrochemical properties, including pH elevation, an increase in Mg²⁺ content, and a reduction in H⁺ protons in the soil solution. Furthermore, it was observed that PESN rose with the pH increase, illustrating the influence of heightened base saturation on this characteristic. Meanwhile, soil pH consistently exceeded PESN across all treatments, indicating a substantial presence of negative charges in the soil. Remarkably, within the initial 30 days post-liming, there was a decline in anions with escalating calcium doses, yet after 90 days of incubation, they rebounded.

Keywords: electrochemical soil; soil fertility; acid soils; soil correction.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da saturação por bases através da calagem é uma prática essencial para melhorar a produtividade das culturas em solos tropicais usados para agricultura. Essa prática contribui para melhorar o ambiente radicular das plantas, aumentando a eficiência dos adubos e, por consequência, a produtividade e o rendimento das culturas. É de grande importância seguir às recomendações de calagem sugeridas pela pesquisa. Pois, existem relatos de muitos casos, onde o calcário vem sendo utilizado como substituto de fertilizantes, resultando em danos ao solo devido ao seu uso excessivo (DENARDIN et al., 2008). É importante ressaltar que qualquer macro ou micronutriente pode se tornar tóxico quando presente em concentrações excessivas no meio, ou seja, "a dose faz o veneno".

A utilização correta da calagem tem o potencial de corrigir a acidez do solo, elevando o pH e insolabilizando elementos que podem ser tóxicos para as plantas, como o

alumínio (Al³⁺) e o manganês (Mn²⁺). Além disso, o calcário afeta as relações eletroquímicas do solo, como a carga líquida negativa e o potencial elétrico negativo superficial. Essas cargas elétricas na superfície das partículas do solo são responsáveis pela adsorção de íons, permitindo que o solo funcione como um reservatório de nutrientes (RAIJ, 2010). Com a calagem, ocorre a incorporação de cargas positivas nas superfícies sólidas do solo, provocada na redução da carga líquida negativa e no aumento do Ponto de Efeito Salino Nulo (PESN) (PARKER et al., 1979; SPOSITO, 1989; ALBUQUERQUE et al., 2000).

O PESN desempenha um papel crucial nas propriedades de carga elétrica do solo, uma vez que a diferença entre o PESN e o pH do solo determina o sinal e a magnitude da carga elétrica variável presente. Quando o pH do solo é inferior ao valor do PESN, os sítios de carga variável são predominantemente carregados positivamente, o que facilita a retenção de íons aniónicos. Por outro lado, se o pH do solo

é maior que o PESN, o solo desenvolve carga predominantemente negativa, favorecendo a troca de íons catiônicos (UEHARA; GILLMAN, 1981). Assim, o PESN é um dos parâmetros mais importantes para descrever os fenômenos eletroquímicos em solos com cargas variáveis (ALLEONI et al., 2009).

Estabelecer as relações entre os atributos eletroquímicos, químicos e mineralógicos do solo facilita a compreensão dos fenômenos de adsorção/dessorção de íons. As cargas elétricas das partículas do solo têm influência na adsorção de cátions e ânions, e a quantidade de íons adsorvidos pelo solo depende da densidade de cargas, que está relacionada à superfície dos coloides (CORINGA; WEBER, 2008). De acordo com Melo; Alleoni (2009), a superfície de exposição das cargas varia entre os solos, dependendo do tipo e teor de seus constituintes minerais e orgânicos.

Dessa forma, as reações eletrolíticas que ocorrem na superfície dos coloides desempenham um papel crucial na qualidade ambiental do solo. Essas reações têm um impacto direto na fertilidade dos solos e na nutrição das plantas, tornando essencial a avaliação das cargas elétricas para recomendação de manejo adotado em diferentes tipos de solos e regiões.

Com base nesses aspectos, o objetivo deste estudo foi avaliar as alterações eletroquímicas em um Latossolo Vermelho Distrófico típico da região Centro-Sul do Estado de Mato Grosso, quando submetido a diferentes doses de calcário dolomítico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo utilizada neste estudo foi coletada na região Centro-Sul Mato-grossense, especificamente de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, na camada de 0 a 20 cm de profundidade. O solo foi submetido ao processo de secagem ao ar, destorrado e subsequente peneirado em duas etapas: primeiro em uma peneira de 4 mm e, em seguida, em uma peneira de 2 mm, para retirada de torrões e resíduos orgânicos. Após essa etapa de triagem, foi coletada uma amostra de 500 g que foi enviada ao laboratório para análise físico-química, conforme descrito na Tabela 1, seguindo as orientações da Embrapa (1997). A análise revelou que a classe textural do solo enquadra-se como muito argilosa.

Tabela 1. Análise do solo antes da calagem.

Table 1. Soil analysis before liming.

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H
H ₂ O	CaCl ₂	mg/dm ³		cmol _c /dm ³		
5,8	5,0	21,4	70,4	3,73	0,6	0,0

M.O	Arcia	Silte	Argila
g/dm ³		g/kg	
39	122	229	649

Com base na análise do solo, estabeleceram-se diferentes tratamentos (conforme Tabela 2) para este estudo. Esses tratamentos consistiram em nove doses de calcário, além de um grupo de controle, sendo utilizado o método de Saturação por Bases, conforme descrito por Sousa e Lobato (2004). Os tratamentos foram designados como T₀, T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈ e T₉, correspondendo a Saturação de Base desejada (V₂) de 43, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 e 85, respectivamente. Cada tratamento foi replicado quatro vezes, totalizando 40 unidades experimentais. O solo foi acondicionado em sacos plásticos, com uma quantidade de 4,4 kg de solo por saco, ao

qual foi adicionado calcário dolomítico com Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) de 100%, contendo 32% de CaO e 24% de MgO.

Tabela 2. Doses de calcário em gramas adicionadas a solução de solo para os tratamentos realizados.

Table 2. Doses of lime in grams added to the soil solution for the treatments carried out.

Tratamento	V%	NC (PRNT 100%) - t ha ⁻¹
Testemunha	43	0
1	45	0,21
2	50	0,73
3	55	1,26
4	60	1,78
5	65	2,31
6	70	2,83
7	75	3,36
8	80	3,88
9	85	4,41

V% - saturação de bases; NC – Necessidade de calagem.

Para viabilizar a reação do calcário, foi aplicada uma quantidade de água destilada correspondente a 30% (720 mL) da Capacidade de Campo em cada amostra. A suplementação de água ao solo ocorria a cada dois dias, de forma lenta e gradual, levando em consideração a capacidade de infiltração do solo. Dessa maneira, garantiu-se que a água fluísse suavemente, permitindo que o solo absorção de forma gradual, evitando qualquer escoamento excessivo.

Após 30 e 90 dias de incubação do solo, coletou-se uma amostra de solo de cada saco plástico e invejou-se para análises químicas em laboratório, seguindo o protocolo da EMBRAPA (1997). Além disso, foi realizada a análise do Ponto de Efeito Salino Nulo – PESN e potencial elétrico superficial (Ψ_0),

2.1. Determinação do PESN

A análise do Ponto de Efeito Salino Nulo (PESN) foi conduzida de acordo com a metodologia descrita por Raij; Peech (1972), com modificações feitas por Tan (1982) e Tan et al. (2008). As curvas potenciométricas foram iniciadas a partir de dados experimentais, utilizando a titulação da solução de solo em três concentrações eletrolíticas: KCl 1 M, 0,1 M e 0,01 M, para cada repetição, totalizando 21 unidades por amostra de solo.

O valor do PESN para cada amostra de solo analisada foi obtido por meio da interseção das curvas de titulação utilizando o programa computacional PESN para Windows versão 1.0, de acordo com Álves et al. (2002).

A partir dos valores de pH e PESN, calculou-se o potencial elétrico superficial (Ψ_0), foi calculado em milivolts (mV), segundo a recomendação simplificada de Nernst (Eq. 1), da equação estabelecida por Raij; Peech (1972):

$$\Psi_0 = 59,1 (\text{PESN} - \text{pH}) \quad (01)$$

Os resultados foram submetidos à análise da variância pelo teste F, com posterior comparação de médias pelo teste de Tukey 5%. Efetuou-se análise de correlação de Pearson entre PESN, em relação aos demais atributos químicos e eletroquímicos do solo.

3. RESULTADOS

Os resultados do Ponto de Efeito Salino Nulo (PESN) para o solo em todos os tratamentos (Figura 1) indicaram

valores positivos, variando de 3,6 a 4,6. Esses valores são característicos da pedogênese de um Latossolo.

Os valores de PESN (Figura 1K) mantiveram-se acima de 4,5 em todos os tratamentos (V%) e em ambos os períodos de incubação (30 a 90 dias). No entanto, após 30 dias de incubação, observaram-se mudanças nos valores de PESN

entre os diferentes tratamentos, que se estabilizaram após 90 dias de incubação. Houve também variações no Potencial elétrico - Ψ_0 (Figura 1L) ao longo do tempo, mas não foram significativas entre os tratamentos. Após 90 dias de incubação, observou-se uma tendência de aumento da negatividade do Ψ_0 com o aumento das doses de cálcio.

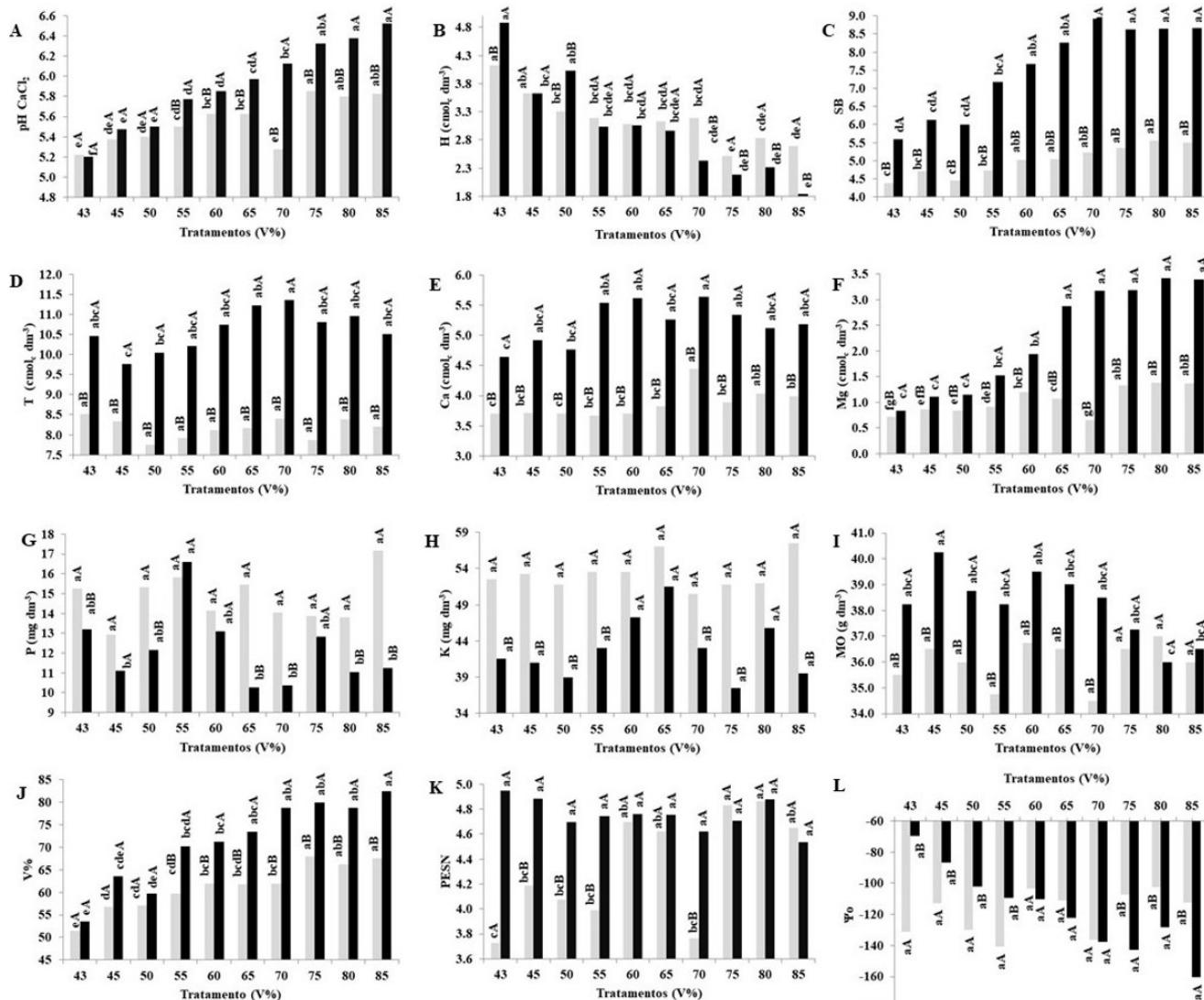


Figura 1. Efeito dos tratamentos (V%) em relação aos atributos químicos do solo. Letras Minúsculas iguais na mesma coluna, os tratamentos não diferem entre si pelo teste Tukey ($p<0.05$).

Figure 1. Effect of treatments (V%) on soil chemical attributes. Lowercase letters are equal in the same column, treatments do not differ using the Tukey test ($p<0.05$).

Após um período de 30 dias de incubação, foi observada uma forte correlação entre o PESN e os valores de pH, potencial elétrico superficial (Ψ_0) e Mg (conforme apresentado na Tabela 4). Era esperado que os valores de pH e potencial elétrico superficial (Ψ_0) estivessem correlacionados, pois eles têm uma relação direta com o PESN.

Além disso, foram observadas correlações fortes com os valores de acidez potencial ($H+Al$), Ca+Mg, Mg, soma de bases (SB), capacidade de troca efetiva (t) e saturação de bases (V%), uma correlação moderada com Fe e uma correlação fraca com MO. No entanto, após um período de 90 dias de incubação, não foram encontradas correlações entre os atributos químicos do solo e o PESN (conforme evidenciado na Tabela 4). Essa falta de correlações pode ser atribuída à

possibilidade de que as reações químicas no solo tenham alcançado um estado de equilíbrio ou estabilização ao longo desse período. Consequentemente, as alterações nos atributos químicos podem ter diminuído ao longo do tempo, o que justifica a ausência de correlações observadas após 90 dias de incubação.

Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) apresentaram um aumento significativo com o aumento das doses de calcário em comparação aos períodos de 30 e 90 dias após a incubação, conforme ilustrado na Figura 2. Observou-se que os teores de Mg foram os mais beneficiados, com um aumento variando de 0,12 a 2,5 cmolc dm⁻³ à medida que as doses de calcário aumentaram. Em contraste, os teores de Ca apresentaram um aumento de 0 a 1,2 cmolc dm⁻³. Consequentemente, a relação cálcio/magnésio diminuiu

Alterações eletroquímicas do solo em resposta a elevação da saturação por bases

significativamente com o aumento das doses de calcário, destacando-se ainda mais após 90 dias de incubação.

As correlações observadas neste estudo podem ser explicadas pelo fato de que a aplicação de calcário aumenta o pH do solo, bem como os teores de magnésio (Mg) e, consequentemente, o PESN. Essa explicação é respaldada por estudos anteriores, como o de Albuquerque et al. (2000). Foi observado um aumento no pH, de 5,8 para 6,7, à medida que as doses de calcário aumentaram (conforme mostrado na Figura 3A). Esse aumento no pH ocorre devido à reação dos íons carbonato (CO_3^{2-}) com a solução do solo, resultando em um excesso de íons hidroxila (OH^-) que consomem os íons de hidrogênio (H^+) presentes na solução do solo (conforme ilustrado na Figura 1B). Esse processo reduz a acidez ativa do solo, levando-a a uma faixa considerada adequada para o

desenvolvimento das plantas, conforme mencionado por Malavolta (1979).

É possível observar uma relação positiva entre os valores de PESN e a acidez ativa do solo, conforme mostrado na Figura 3A, e uma relação negativa com a acidez potencial, conforme demonstrado na Figura 3C. Esses resultados indicam que os valores de pH encontrados foram superiores aos valores de PESN, evidenciando um predomínio de carga líquida negativa no solo.

Observou-se que, com o aumento do pH do solo, as cargas eletroquímicas na superfície dos minerais se tornaram mais negativas. A prática da calagem resultou na diminuição dos teores de hidrogênio (H) e alumínio (Al) no solo, como consequência do aumento do pH, causado pela adição de íons hidroxila (OH^-) e neutralização do alumínio.

Tabela 4. Correlação de Pearson entre atributos químicos e o PESN.
Table 4. Pearson correlation between chemical attributes and PESN.

Após 30 dias de incubação									
PESN	pH CaCl ₂	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	H	H+Al	MO
	0,804**	-0,002	0,187	0,606**	0,171	0,794**	-0,617**	-0,617**	0,421**
PESN	Zn	Cu	Fe	SB	T	t	(Ψo)	V%	
	0,164	-0,147	-0,550**	0,607**	-0,082	0,607**	0,890**	0,671**	
Após 90 dias de incubação									
PESN	pH CaCl ₂	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	H	H+Al	MO
	-0,135	-0,086	-0,073	-0,095	-0,01	-0,115	0,121	0,121	0,009
PESN	Zn	Cu	Fe	SB	T	t	(Ψo)	V%	
	-0,244	-0,024	-0,068	-0,096	-0,011	-0,096	0,854**	-0,118	

** A correlação é significativa ao nível de 0,01 (2-tailed). Classificação da correlação de Pearson segundo Franzblau (1958), se: $|r| < 0,20$, a correlação é negligenciável; $0,20 < |r| < 0,40$, a correlação é fraca; $0,40 < |r| < 0,60$, a correlação é moderada; $0,60 < |r| < 0,80$, a correlação é forte; $|r| > 0,80$, a correlação é muito forte.

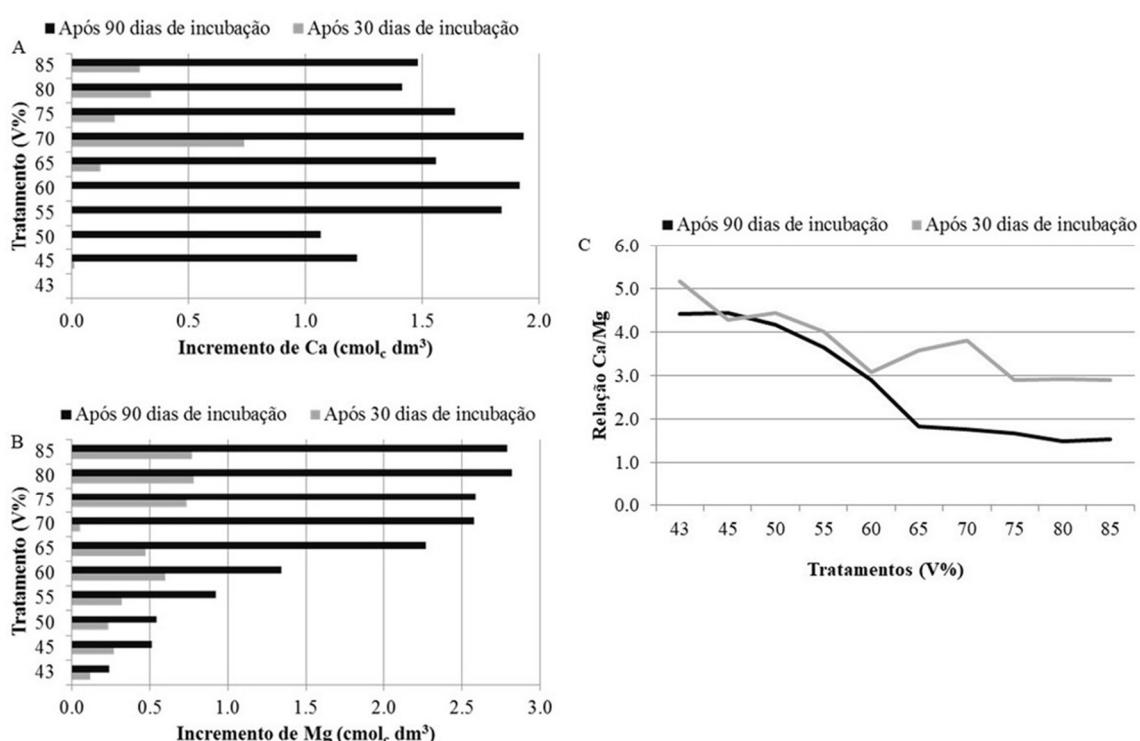


Figura 2. A relação entre o aumento dos teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e a relação Ca/Mg em diferentes doses de calcário foi analisada após 30 e 90 dias de incubação.

Figure 2. The relationship between the increase in calcium (Ca), magnesium (Mg) and the Ca/Mg ratio in different doses of limestone was analyzed after 30 and 90 days of incubation.

Além disso, verificou-se uma relação positiva entre o aumento dos valores de PESN e os teores de magnésio (Mg), que estão diretamente relacionados à aplicação de calcário. Durante os primeiros 30 dias de incubação, a aplicação de calcário resultou em uma redução das cargas negativas, passando de -159 mV no tratamento sem calcário para -87 mV.

Uma forte correlação positiva foi observada entre o PESN e a Saturação de Bases (%), assim como uma relação positiva com a soma de bases. O aumento do PESN foi atribuído à adsorção específica de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), resultando na diminuição da carga líquida negativa e no aumento do PESN.

A prática de calagem também mostrou impacto na correção do pH do solo, promovendo a precipitação do íon trivalente Al^{3+} e tornando-o insolúvel. O aumento do PESN e do PES não causou mudanças na capacidade de troca catiônica total (CTC). A alteração das cargas elétricas no solo foi associada à interação de cátions liberados na solução com íons carboxila e silicatos.

Foi observada uma correlação negativa entre o aumento dos valores de PESN e PES e os teores de ferro no solo, sugerindo que a adição de calcário precipitou o Fe na forma de óxidos. Por outro lado, os teores de matéria orgânica (MO) apresentaram uma relação positiva com os valores de PESN e PES, indicando possíveis características peculiares do solo estudado (Figura 4).

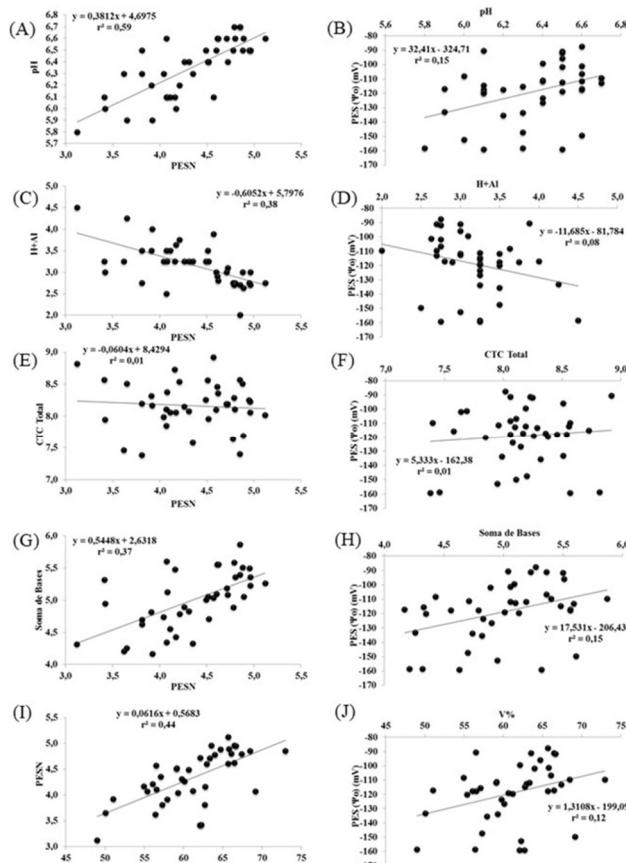


Figura 3. Relação entre os valores de Ponto de Efeito Salino Nulo (PESN) e potencial elétrico superficial (PES mV) e os atributos do solo, após 30 dias de incubação.

Figure 3. Relationship between the values of Zero Saline Effect Point (PESN) and surface electric potential (PES mV) and soil attributes, after 30 days of incubation.

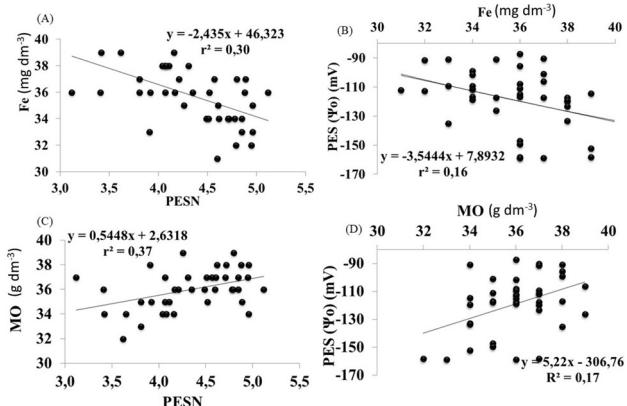


Figura 4. Valores de PES (mV) e PESN em relação aos teores de Fe e MO, após 30 dias de incubação.

Figure 4. PES (mV) and PESN values in relation to Fe and MO contents, after 30 days of incubation.

4. DISCUSSÃO

A alteração eletroquímica do solo, conforme descrito por Coringa; Weber (2008), é atribuída à perda de sílica em profundidade, uma característica típica do processo de latolização. O aumento linear dos valores do PESN, também foram constatados por Albuquerque et al. (2000; 2003).

Este processo pode ser identificado pelos valores de PESN, conforme demonstrado por Magalhães; Page (1984), Sposito (1989) e Albuquerque et al. (2000). Valores de PESN próximos a 4,6 indicam o predomínio de minerais silicatados do tipo 1:1, como a caulinita (Sposito, 1989; Silva et al., 1996; Alves, 2002). Além disso, a presença de óxidos de Fe e Al, observada por Fontes et al. (2001), é comum em solos de regiões tropicais e subtropicais. Os valores de PESN registrados neste estudo são inferiores aos da goethita (6,4) e da gibbsita (5,1), conforme relatado por Varadachari; Chattopadhyay (1997).

Essa constatação está de acordo com estudos anteriores, como os de Albuquerque et al. (2003) e Silva et al. (1996). Em relação à acidez potencial, a presença de hidroxila (OH^-) reage tanto com os íons H^+ quanto com Al^{3+} , reduzindo sua quantidade na solução do solo e, consequentemente, na superfície das partículas. Tanto os cátions quanto os ânions presentes no calcário são responsáveis pela redução da acidez, enquanto o aumento do pH promove o aumento da densidade de cargas negativas no solo (MELO; ALLEONI, 2009).

O impacto diferenciado no teor de magnésio em relação ao cálcio, e a consequente alteração na relação Ca/Mg, destaca a importância da composição química do calcário nas reações de neutralização e na estabilização das cargas do solo, confirmando a importância do manejo da acidez do solo e da aplicação de calcário para a melhoria das condições edáficas em Latossolos, promovendo um ambiente mais favorável para o desenvolvimento das plantas (MALAVOLTA, 1979).

Os resultados observados neste estudo corroboram as observações de Haynes (1984) e Raij (2010), que indicam que o aumento do pH do solo tende a tornar as cargas eletroquímicas na superfície dos minerais mais negativas. No entanto, quando há condições que favorecem a geração de cargas positivas, estas tendem a aumentar com a diminuição do pH, um comportamento também registrado por Alleoni; Camargo (1994); Silva et al. (1996).

A prática da calagem, conforme relatado, resultou na diminuição dos teores de hidrogênio (H) e alumínio (Al) no solo, devido ao aumento do pH causado pela adição de íons hidroxila (OH^-) e à neutralização do alumínio. Essa neutralização promoveu a disponibilização de nutrientes ao solo (MELO; ALLEONI, 2009).

Além disso, observou-se uma relação positiva entre o aumento dos valores de PESN e os teores de magnésio (Mg), corroborando as observações de Sposito (1989). A presença de magnésio, associada à aplicação de calcário, levou à formação de cargas positivas nas superfícies dos coloides, resultando no aumento do PESN e na diminuição da carga líquida negativa, o que, por sua vez, aumentou a capacidade de troca catiônica do solo (MCBRIDE, 1989).

A aplicação de calcário também resultou em uma alteração significativa no caráter eletroquímico do solo, refletida no aumento dos valores de Saturação de Bases (V%) e no PESN, conforme evidenciado por Sposito (1989). Por outro lado, Benedites; Mendonça (1998) observaram uma redução no PESN com a adição de ácidos húmicos, atribuída à presença de grupos carboxílicos na matéria orgânica que exigem valores de pH mais baixos para equilibrar as cargas no solo (SCHNITZER, 1986; OADES, 1989).

A prática da calagem desempenhou um papel crucial na correção do pH do solo, resultando na precipitação do íon trivalente Al^{3+} e tornando-o insolúvel, como destacado por Meurer (2006). Em solos que passaram por calagem, a elevação da concentração de eletrólitos reduziu a espessura da dupla camada elétrica difusa nas proximidades das partículas coloidais, favorecendo a agregação das partículas carregadas negativamente (MCBRIDE, 1989).

No entanto, o aumento do PESN e do PES não provocou alterações na capacidade de troca catiônica total (CTC), o que pode ser explicado pelo aumento das cargas positivas com o somatório de bases (SB) e a diminuição das cargas negativas devido ao aumento da acidez potencial. Esse fenômeno pode estar neutralizando a relação entre o PESN e a CTC total, uma vez que a CTC está diretamente relacionada à soma de bases e à acidez potencial (ALBUQUERQUE et al., 2003).

A alteração das cargas elétricas no solo, observada neste trabalho, pode estar relacionada aos cátions liberados na solução do solo que se associam a íons carboxila e silicatos, formando eletrólitos fracos de carboxila e silicatos de Ca e Mg, que são sais pouco solúveis. Essa associação pode resultar na neutralização momentânea das cargas elétricas, conforme descrito por Fontes et al. (2001), onde a dissociação de íons H^+ dos grupos OH^- em minerais silicatados de argila do tipo 1:1, como a caulinita, também pode contribuir para esse processo.

Smith; Emerson (1976) associaram a presença de caulinita às cargas elétricas negativas permanentes do solo, embora essas sejam menos significativas em comparação com as cargas elétricas variáveis, que podem ser tanto negativas quanto positivas, dependendo dos tamanhos iônicos envolvidos. Gast (1977) observou que as cargas negativas se manifestam na superfície do coloide devido a substituições que ocorrem com um elemento de menor valência substituindo outro de maior valência, como Al^{3+} por Si^{4+} ou Mg^{2+} por Al^{3+} , resultando em um déficit de carga positiva na estrutura cristalina.

O aumento do potencial elétrico negativo das partículas de solo, devido à adsorção química de hidroxilas na superfície de óxidos e hidróxidos, principalmente de ferro e alumínio,

conforme descrito por Cornell; Schwertmann (1996), também foi observado neste estudo. Essa alteração está associada à ionização de grupos funcionais da matéria orgânica, sendo os grupos carboxílicos os mais relevantes, (UEHARA; GILLMAN, 1981; SCHNITZER, 1986).

Albuquerque et al. (2000) relataram que a aplicação de 18 t/ha de calcário em um Latossolo Bruno resultou em um aumento do PESN de 3,77 para 4,30, provavelmente devido à redução nos teores de matéria orgânica e à adsorção específica de cálcio e magnésio. Esse processo levou à diminuição da carga líquida negativa e ao consequente aumento do PESN (SPOSITO, 1989).

A presença de altos teores de óxidos de ferro e alumínio no solo, conforme observado neste estudo, contribui para o aumento das cargas positivas, uma característica comum em solos tropicais e subtropicais, como destacado por Fontes et al. (2001). Ao manejar a fertilidade de solos como os Latossolos, é fundamental considerar atributos como o PESN e o incremento de cargas positivas ou negativas no solo.

A correlação negativa entre o aumento dos valores de PESN e PES e os teores de ferro no solo pode ser explicada pela adição de calcário, que precipita o Fe na forma de óxidos, conforme relatado por Moraes Neto (2009). Além disso, os teores de matéria orgânica (MO) apresentaram uma relação positiva com os valores de PESN e PES, uma condição que pode ter ocorrido devido a particularidades do solo estudado. Embora Costa et al. (1984), Benites; Mendonça (1998) tenham indicado que a matéria orgânica tende a diminuir o valor do PESN, o tipo e grau de decomposição da matéria orgânica podem ter um impacto mais significativo nas interações do solo (SILVA et al., 1996).

5. CONCLUSÕES

A prática de calagem não apenas aumenta o pH e os teores de magnésio, mas também reduz os prótons de hidrogênio (H^+) presentes na solução do solo e a disponibilidade de ferro, o que influencia no Potencial do Efeito Salino Nulo (PESN).

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) não tem correlação com o Potencial do Efeito Salino Nulo (PESN) ou o potencial elétrico superficial (PES).

Com o aumento de doses de calcário, houve um aumento predominante de cargas negativas no solo.

As cargas elétricas negativas do solo são afetadas nos primeiros 30 dias de incubação com calcário, mas voltam a se estabilizar após 90 dias de incubação.

6. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTANA, E. C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, p. 295-300, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000200006>
- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 799-806, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500004>
- ALVES, M. E.; MACEDONIO, C. R.; LAVORENTI, A. Ponto de efeito salino nulo: determinação analítico-computacional a partir de dados de titulação potenciométrica. *Revista Brasileira de Ciência do*

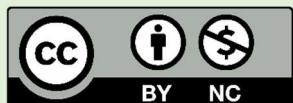
- Solo**, v. 26, p. 553-559, 2002.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200030>
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.) **Química e mineralogia do solo**. Volume 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 381-447.
- BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. Viçosa: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 215-221, 1998.
- BOHNEN, H. Acidez do solo: Origem e correção. In: KAMINSKI, J. (Coord.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: Núcleo Regional Sul, 2000. p. 9-19. (Boletim Técnico, 4).
- CORINGA, E. A. O.; WEBER, O. L. dos S. Ponto de efeito salino nulo de Latossolos da microbacia Chico Nunes, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 441-448, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100042>
- CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence and uses. New York: VHC, 1996. 573p.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 281-284, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000100045>
- DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do sistema plantio direto levam a degradação do solo. **Revista Plantio Direto**, v. 18, p. 33-34, 2008.
- EMBRAPA_Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual e métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Classificação dos Solos - SNLCS, 1997. 225p.
- FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 627-646, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>
- FRANZBLAU, A. **A primer of statistics for non-statisticians**. New York: Harcourt, Brace & World, 1958. 150p.
- GAST, R. G. Surface and colloid chemistry. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1977. p. 27-73.
- HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, v. 37, p. 249-315, 1984.
- MAGALHÃES, A. F.; PAGE, A. L. Características das cargas elétricas dos solos da Zona da Mata de Pernambuco: I. Determinação das cargas de superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 173-177, 1984.
- MALAVOLTA, E. **ABC da Adubação**. 4 ed. São Paulo SP, Editora Agronomia Ceres, 1979. 255p.
- MCBRIDE, M. B. Surface chemistry of soil minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds) **Minerals in soil environments**. 2 ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 35-88. (Series, 1).
- MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo, Parte II**. Viçosa: SBCS, 2009. 685p.
- MENDES, R. A. **Alguns métodos e terminologias em eletroquímica de solos**. Cuiabá: Eletroquímica de Solos, 2001.
- MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 3 ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285p.
- MORAES NETO, S. P. de. **Acidez, alcalinidade e efeitos da calagem no solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. 4p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bits/tream/doc/657358/1/art005.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- OADES, J. M. An introduction to organic matter in mineral soils. In: DIXON, J. B. E., WEED, S. B. (Eds) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 89-160.
- PARKER, J. C.; ZELAZNY, L. W.; SAMPATH, S.; HARRIS, W. G. A critical evaluation of the extension of zero point of charge (ZPC). Theory to soil systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, n. 4, p. 668-673, 1979. <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300040008x>
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo no Brasil**: contribuições do instituto agronômico de Campinas. Piracicaba: IPNI, 2010. 233p.
- RAIJ, B. van; PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, p. 587-593, 1972. <https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600040027x>
- SCHNITZER, M. Binding of humic substances by the soil colloids. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M. (Eds.) **Interactions of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 77-102.
- SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M. Ponto de efeito salino nulo e suas relações com propriedades mineralógicas e químicas de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 663-671, 1996. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1996.v31.4535>
- SMITH, B. H.; EMERSON, W. W. Exchangeable aluminum in kaolinite. **Australian Journal of Soil Research**, v. 14, n. 1, p. 45-53, 1976.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.
- TAN, K. H. **Principles of soil chemistry**. New York: Marcel Dekker, 1982. 392p.
- TAN, W.; LU, S.; LIU, F. Determination of the point-of-zero-charge of manganese oxides with different methods, including an improved salt titration method. **Soil Science**, v. 173, p. 277-286, 2008. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31816d1f12>
- UEHARA, G.; GILLMAN, G. P. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays**. Boulder: Westview Press, 1981. 170p.
- VARADACHARI, C.; CHATTOPADHYAY, T. Complexation of humic substances with oxides of iron and aluminum. **Soil Science**, v. 162, n. 1, p. 28-34, 1997.

Contribuições dos autores: O autor realizou todas as etapas de desenvolvimento da pesquisa, preparação e publicação do artigo. O autor leu o artigo na sua versão final e aprovou a sua publicação.

Financiamentos: Fundação Nacional de Desenvolvimento do Ensino Superior Particular – FUNADESP.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: O autor declara não haver conflito de interesses.



Copyright: © 2024 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NonCommercial \(CC BY-NC\)](#) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).