

Aproveitamento agrônômico de escória de siderurgia de alto-forno na correção da acidez do solo



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Amazônia Oriental
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

DOCUMENTOS 444

Aproveitamento agronômico de escória de siderurgia de alto-forno na correção da acidez do solo

*Edilson Carvalho Brasil
Emerson Vinicius Silva do Nascimento*

***Embrapa Amazônia Oriental
Belém, PA
2019***

Disponível no endereço eletrônico:
<https://www.embrapa.br/amazonia-oriental/publicacoes>

Embrapa Amazônia Oriental
Tv. Dr. Enéas Pinheiro, s/n
CEP 66095-903, Belém, PA
Fone: (91) 3204-1000
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicação

Presidente
Bruno Giovany de Maria

Secretária-Executiva
Ana Vânia Carvalho

Membros
Alfredo Kingo Oyama Homma, Alysson Roberto Baizi e Silva, Andréa Liliane Pereira da Silva, Luciana Gatto Brito, Michelliny Pinheiro de Matos Bentes, Narjara de Fátima Galiza da Silva Pastana, Patrícia de Paula Ledoux Ruy de Souza

Supervisão editorial e revisão de texto
Narjara de Fátima Galiza da Silva Pastana

Normalização bibliográfica
Andréa Liliane Pereira da Silva

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Tratamento de fotografia e editoração eletrônica
Vitor Trindade Lôbo

Foto da capa
Edilson Carvalho Brasil

1ª edição
Publicação digitalizada (2019)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Nome da unidade catalogadora

Brasil, Edilson Carvalho.

Aproveitamento agrônomico de escória de siderurgia de alto-forno na correção da acidez do solo / Edilson Carvalho Brasil, Emerson Vinicius Silva do Nascimento. – Belém, PA : Embrapa Amazônia Oriental, 2019.

34 p. ; 16 cm x 22 cm. – (Documentos / Embrapa Amazônia Oriental, ISSN 1983-0513; 444).

1. Acidez do solo. 2. Resíduo industrial. 3. Corretivo. 4. Ferro-gusa. 5. Marabá. I. Nascimento, Emerson Vinicius Silva do. II. Título. III. Embrapa Amazônia Oriental. IV. Série.

CDD 21 ed. 631.428115

Autores

Edilson Carvalho Brasil

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA

Emerson Vinicius Silva do Nascimento

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências Agrárias (Agroecossistemas Amazônicos), Belém, PA

Apresentação

A atividade siderúrgica representa um importante segmento da economia do estado do Pará e tem na produção de ferro-gusa um de seus destaques, uma vez que o estado é um dos maiores produtores do País. A escória é o principal resíduo gerado no processo de produção de ferro-gusa e, muitas vezes, tem sido acumulada nos pátios ou aterros das indústrias, ocasionando problemas de ordem ambiental.

No Brasil, ainda há muita resistência quanto ao aproveitamento dos resíduos industriais, apesar da Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos e versa sobre a prevenção e a redução na geração de resíduos sólidos, tendo como alternativa um conjunto de instrumentos que permitem o aumento da reciclagem e da reutilização desses resíduos.

A utilização de escórias de alto-forno na agricultura representa uma forma muito interessante de aproveitamento desse resíduo, que pode ser usado como corretivo de acidez do solo e fonte de cálcio, magnésio e silício para as culturas. Essa possibilidade se torna mais relevante em regiões onde a ocorrência de jazidas de calcário é reduzida, já que o custo do transporte tem uma importante participação no custo final de utilização desse corretivo.

O presente documento apresenta uma série de resultados de pesquisa de um conjunto de ensaios conduzidos sobre a eficiência agrônômica de escória de alto-forno, gerada no parque siderúrgico de Marabá, no estado

do Pará, demonstrando a possibilidade de aproveitamento do resíduo na correção da acidez do solo e na disponibilização de nutrientes para algumas culturas de interesse econômico do estado.

Adriano Venturieri

Chefe-Geral da Embrapa Amazônia Oriental

Sumário

Introdução	09
Caracterização química da escória de siderurgia	10
Composição química da escória	10
Metais pesados na escória de siderurgia	12
Estudos da eficiência agronômica	14
Escória de alto-forno sobre atributos químicos do solo e produção de matéria seca de plantas de arroz	14
Reatividade de escória de alto-forno em um Latossolo Amarelo Distrófico	19
Escória de alto-forno nas produções de milho e feijão-caupi e nas alterações de atributos químicos de um Latossolo Amarelo Distrófico ...	24
Efeito residual de escória de alto-forno sobre os atributos químicos do solo e a produção de milho	27
Frações granulométricas de escória de alto-forno e sua influência em atributos químicos do solo e na produção de milho	29
Conclusão	31
Referências	32

Introdução

O Brasil produziu, em 2016, aproximadamente 3,5 milhões de toneladas de ferro-gusa, provenientes de produtores regionais. Cerca de 24% desse montante foram originários dos parques siderúrgicos dos estados do Pará e do Maranhão, que juntos possuem o segundo maior volume de produção do País (Brasil, 2017). O ferro-gusa produzido nesse polo utiliza minério de ferro da jazida de Carajás e serve para a produção de aço e de peças fundidas, materiais que formam os principais pilares de sustentação da moderna tecnologia industrial.

A escória é o principal resíduo gerado durante o processo de produção de ferro-gusa e resulta da mistura de ganga do minério (SiO_2 , Al_2O_3), fundentes (CaO , MgO) e cinzas do carvão vegetal, o que proporciona elevados teores de sílica (SiO_2) e de óxido de cálcio (CaO), além de óxidos de alumínio (Al_2O_3), de magnésio (MgO) e de ferro (FeO). Assim, na produção total de ferro-gusa, cerca de 10% a 15% corresponde à escória. A sua composição varia em decorrência da constituição química da matéria-prima (minério de ferro, carvão, calcário) utilizada no processo de produção de ferro-gusa (Prado et al., 2001).

Por apresentar constituintes neutralizantes da acidez do solo e bases como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si), a escória possui potencial de uso agrícola como alternativa ao calcário, especialmente em regiões que possuem poucas jazidas de calcário em exploração, como é o caso do estado do Pará (Vidal; Prado, 2011).

As melhorias das características químicas do solo pela utilização de escórias são decorrentes da ação neutralizante do SiO_3^{2-} e, conseqüentemente, da elevação dos valores de pH, capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%), além de poder ser usada como fonte de alguns nutrientes como Ca, Mg, zinco (Zn), boro (B), ferro (Fe) e manganês (Mn) (Deus; Bull, 2013). Além disso, na dissolução da molécula de silicato de cálcio, há a formação do ânion H_3SiO^4 , que exerce efeito competitivo pelos sítios de adsorção de fósforo (P) no solo, reduzindo a adsorção e aumentando a disponibilidade do nutriente para as plantas (Prado et al., 2002).

Apesar dos indicativos de aproveitamento agrícola da escória, existe uma carência de estudos técnicos envolvendo o sistema solo-planta, para

fundamentar o uso na agropecuária, nas condições específicas de diferentes regiões do País e para diferentes sistemas de produção de culturas de interesse econômico. No estado do Pará, são escassos os trabalhos a respeito do aproveitamento de resíduos de siderúrgicas como insumo agrícola, o que ensejou o desenvolvimento de pesquisa agrônômica para avaliação das possibilidades de uso.

Neste trabalho são apresentados os principais resultados de pesquisa obtidos no âmbito do Projeto Alternativas Tecnológicas para o Aproveitamento de Resíduos Gerados Durante o Processo de Produção de Ferro Gusa Voltadas para Utilização Agroflorestal, Programa InovarPará, financiado pela Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisa (Fapespa) e conduzido pela Embrapa Amazônia Oriental.

Caracterização química da escória de siderurgia

Para a caracterização química da escória utilizada no presente trabalho foram coletadas amostras em vazamentos de alto-forno de uma siderúrgica, localizada no município de Marabá, Pará. Após a coleta, as amostras foram preparadas para a determinação da composição química e da ocorrência de metais pesados no material, conforme descrito a seguir.

Composição química da escória

Para a caracterização da composição química da escória de alto-forno, as amostras foram trituradas manualmente, passadas em peneira ABNT nº 50, com abertura de malha de 0,30 mm, e colocadas em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65 °C, até obtenção de massa constante. As determinações das concentrações de óxidos de cálcio, magnésio, silício, alumínio, ferro e manganês foram realizadas por meio de espectrometria de fluorescência de raios X. Paralelamente, realizou-se a análise química de reação alcalina na escória para avaliar a capacidade reativa (poder de neutralização – PN) e estimar o poder relativo de neutralização total (PRNT), que é um parâmetro utilizado na avaliação da qualidade de produtos corretivos existentes no mercado.

Com base nos teores de alguns compostos químicos da escória (Tabela 1), pode-se inferir que o resíduo apresenta propriedades químicas para utilização como material corretivo de acidez, em decorrência do valor da soma dos teores de CaO + MgO (38,97%), que encontra-se acima da exigência mínima estabelecida pela legislação brasileira de corretivos, a qual preconiza o teor mínimo de 38% para a soma desses óxidos, como parâmetro de referência para outros produtos corretivos (Brasil, 2007b).

Tabela 1. Compostos químicos da escória de siderurgia de alto-forno, utilizada nos ensaios de avaliação agronômica.

Composto químico	Composição (%)
CaO	35,51
MgO	3,46
Al ₂ O ₃	10,89
SiO ₂ total	46,07
FeO	0,81
MnO	0,80

Com relação ao PN da escória, obteve-se valor equivalente a 70% E_{CaCO_3} . Considerando-se que a amostra continha granulometria inferior a 0,30 mm e que esse tamanho de partícula, para a caracterização de calcários, representa uma taxa de reatividade igual a 100%, o PRNT da escória manteve o mesmo valor do PN (70%). Conforme a legislação brasileira de corretivos de acidez, esse valor encontra-se acima da exigência mínima estabelecida para calcário agrícola, que preconiza o valor do PN acima de 67% E_{CaCO_3} (Brasil, 2007b).

Além das características corretivas de acidez, pela composição química da escória (Tabela 1), observou-se alto teor de SiO₂ total (46,07%), indicando a possibilidade de o resíduo ser utilizado como fonte de Si para as plantas. O Si tem um importante papel nas relações planta-ambiente, pois pode proporcionar a determinadas culturas melhores condições para suportar adversidades climáticas, edáficas e biológicas, tendo como resultado final um aumento e maior qualidade na produção. Estresses causados por temperaturas extremas, veranicos, metais pesados ou tóxicos, por exemplo, podem ter seus efeitos reduzidos com o uso do Si.

A adubação com Si pode aumentar a produtividade de certas culturas, principalmente pelo aumento da resistência destas ao ataque de pragas e doenças e a maior resistência ao acamamento e ao estresse hídrico. Os

benefícios do uso do Si se manifestam não apenas em plantas conhecidas como acumuladoras (arroz, cana e pastagem), mas também em plantas não acumuladoras, como tomate e plantas da vegetação do Cerrado (Miyake; Takahashi, 1978, 1983; Elawad et al., 1982; Snyder et al., 1986; Clark et al., 1990; Anderson, 1991; Korndörfer et al., 2001; Carvalho-Pupatto et al., 2004; Pereira et al., 2007).

Metais pesados na escória de siderurgia

Para avaliar a ocorrência de metais pesados na escória de siderurgia utilizada nos estudos de eficiência agrônômica realizados no presente trabalho, procedeu-se a análise química do resíduo, determinando-se as concentrações de metais pesados (cádmio, cromo, níquel e chumbo), conforme metodologia preconizada pelo Ministério da Agricultura (Brasil, 2007a). O silício solúvel foi determinado utilizando-se o extrator alcalino de carbonato de sódio e nitrato de amônio.

Para efeito de comparação, utilizou-se os limites estabelecidos no Anexo III, da Instrução Normativa SDA nº 27 do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), publicada em 5 de junho de 2006, o qual estabelece as concentrações máximas admitidas para metais pesados tóxicos contidos em corretivos de acidez. Considerando-se que a legislação brasileira admite apenas a presença de cádmio e chumbo nos corretivos de acidez do solo, também foram usadas as normas de aplicação de resíduos sólidos, conforme a NBR 10004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006) e os valores de lodo de esgoto impostos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) (1999) na Norma P4230.

Considerando-se os valores de referência indicados na legislação brasileira, as concentrações de metais pesados encontrados na escória de alto-forno (Tabela 2) encontraram-se abaixo dos limites máximos exigidos para os elementos cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) e chumbo (Pb), indicando que o resíduo atende às exigências legais para ser utilizado como corretivo de acidez.

Tabela 2. Teores de óxidos, granulometria e metais pesados contidos em escória de alto-forno usada nos estudos de eficiência agronômica.

Teor de óxido		PN	PRNT	Outros elementos				
CaO	MgO			Si solúvel	Cd	Cr	Ni	Pb
dag kg ⁻¹		%		mg kg ⁻¹				
24,85	12,49	75	74	6,34	10,5	42,1	40,0	24,1
Limites máximos de metais pesados permitidos em corretivo de acidez ⁽¹⁾					20	n.a. ⁽⁴⁾	n.a.	1.000
Limites máximos de metais pesados permitidos em lodo de esgoto ⁽²⁾					85	3.000	420	840
Limites máximos de metais pesados permitidos em resíduos sólidos ⁽³⁾					n.a.	n.a.	n.a.	1.000

⁽¹⁾ Anexo III, IN SDA 27 do Brasil (2006); ⁽²⁾ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1999);

⁽³⁾ Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006); ⁽⁴⁾ n.a. = não aplicável (não foi descrito o limite na norma).

A caracterização química desses resíduos pode dar uma ideia da capacidade de contaminação do solo. Poucos trabalhos de pesquisa no Brasil avaliaram a biodisponibilidade de metais pesados pela aplicação de escória ao solo.

Alguns trabalhos com escória de aciaria têm apresentado resultados que indicam teores de metais pesados abaixo dos níveis estabelecidos pela legislação. Estudo realizado em área com cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho-Amarelo, demonstrou que não foram detectadas as presenças de Ni, Cd e Pb no solo nem na planta, com a aplicação de escória de aciaria de forno elétrico (4,0 t ha⁻¹) no sulco de plantio, indicando que a utilização do resíduo não causou contaminação desses elementos (Sobral et al., 2011).

Corrêa et al. (2008), avaliando a disponibilidade de metais pesados em consequência da aplicação superficial de escória de aciaria em um Latossolo Vermelho Distrófico sob sistema plantio direto, observaram que doses elevadas (até 8 t ha⁻¹) de escória de aciaria foram passíveis de aplicação ao solo sem causar fitotoxicidade às culturas.

Para efeito de comparação dos teores de metais pesados encontrados em outros estudos, Nehrenheim e Gustafsson (2008), utilizando escórias de alto-forno resfriadas rapidamente em grandes bacias de água (estrutura cristalina), obtiveram valores de Cd, Cr, Ni e Pb equivalentes a 0,018 mg kg⁻¹, 42,3 mg kg⁻¹, 2,0 mg kg⁻¹ e 0,59 mg kg⁻¹, respectivamente.

Estudos da eficiência agrônômica

Para a avaliação da eficiência agrônômica da escória de alto-forno, realizou-se estudos em condições controladas de casa de vegetação e experimentos no campo, utilizando-se solos representativos do estado do Pará, com diferentes variações texturais. Nesses estudos foram utilizadas culturas de interesse econômico do Pará, considerando-se as variáveis de respostas relacionadas aos componentes de produção, como: desenvolvimento em altura, produção de biomassa, produtividade de grãos, dentre outros.

Em todos os ensaios realizados na avaliação da eficiência agrônômica, os valores dos atributos químicos iniciais relacionados à acidez (pH água, Ca, Mg, Al e V%) dos solos utilizados indicaram elevada acidez, com base nos indicadores apresentados em Brasil e Cravo (2007), o que representa uma condição desejável para a condução de experimentos dessa natureza.

Escória de alto-forno sobre atributos químicos do solo e produção de matéria seca de plantas de arroz

Visando avaliar o efeito da aplicação de escória de alto-forno sobre atributos químicos do solo e a produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz cultivadas, conduziu-se um experimento em condições de casa de vegetação, no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra), em Belém, Pará, utilizando-se amostras da camada superficial (0 cm–20 cm) de dois Latossolos Amarelos Distróficos, com classe textural argilosa (LAarg) e média (LAm).

As amostras de solo apresentaram as seguintes características químicas e físicas (Claessen, 1997):

- a) Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa (LAarg): pH (H₂O) igual a 4,1; K (Mehlich 1), Ca, Mg, Al e CTC (pH 7,0) iguais a 0,08 cmol_c dm⁻³, 0,50 cmol_c dm⁻³, 0,35 cmol_c dm⁻³, 1,46 cmol_c dm⁻³ e 6,43 cmol_c dm⁻³, respectivamente; V% igual a 14,5%; P (Mehlich 1) igual a 3 mg dm⁻³; e teores de argila, areia grossa, areia fina e silte iguais a 300 g kg⁻¹, 388 g kg⁻¹, 284 g kg⁻¹ e 28 g kg⁻¹, respectivamente.

- b) Latossolo Amarelo Distrófico textura média (LAm): pH (H_2O) igual a 4,4; K (Mehlich 1), Ca, Mg, Al e CTC (pH 7,0) iguais a $0,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $0,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $0,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $1,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $5,79 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente; V% igual a 13,6%; P (Mehlich 1) igual a 5 mg dm^{-3} ; e teores de argila, areia grossa, areia fina e silte iguais a 100 g kg^{-1} , 682 g kg^{-1} , 158 g kg^{-1} e 60 g kg^{-1} , respectivamente.

Em ambos os solos, procedeu-se a aplicação de doses crescentes de escória e calcário calcítico, com objetivo de elevar o valor de saturação por bases para 15%, 45%, 75% e 105%. As quantidades estabelecidas para cada solo foram ajustadas ao PRNT de cada produto.

Utilizou-se uma escória de siderurgia coletada em vazamento de alto-forno da Companhia Siderúrgica Paraense (Cosipar), localizada no município de Marabá, que foi passada em peneira com abertura de malha de 0,3 mm (ABNT 50). As características químicas do calcário e da escória foram determinadas segundo Brasil (1988) e os respectivos valores foram os seguintes: 94,0% e 67,6% de PRNT; 45,8% e 35,5% de CaO e 4,5% e 3,4% de MgO. Após a aplicação dos corretivos, cada unidade experimental, constituída de $3,0 \text{ dm}^3$ de terra, ficou em incubação por um período de 45 dias, com umidade mantida em torno de 70% da capacidade máxima de retenção de água, por meio de regas diárias e pesagem dos vasos.

Como planta teste utilizou-se a cultura de arroz (variedade BRS Soberana), que foi semeada colocando-se dez sementes por vaso (capacidade para $5,0 \text{ dm}^3$) e, após 14 dias da germinação, realizou-se o desbaste, deixando-se três plântulas. Na ocasião da semeadura, cada unidade experimental recebeu adubação básica complementar com nitrogênio (N), potássio (K), fósforo (P) e micronutrientes, em quantidades calculadas com base nos resultados da análise do solo e seguindo as recomendações de adubação para o estado do Pará (Cravo et al., 2007). Aos 60 dias da semeadura efetuou-se a colheita das plantas de arroz, retirando-se a parte aérea, que foram secadas em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$, para determinação da massa da matéria seca.

Conforme os resultados, em ambos os solos, o aumento dos valores de saturação por bases, associado à aplicação de doses crescentes das fontes corretivas, promoveu aumento de forma linear no valor do pH (água) do

solo, observando-se que os maiores incrementos ocorreram com aplicação de calcário nas quantidades mais elevadas (Figura 1). A ação da escória de siderurgia sobre o valor de pH do solo está relacionada à hidrólise da base química SiO_3^{2-} , presente na escória, proporcionando a redução do H^+ presente na solução do solo, promovendo a elevação do valor do pH do solo e a neutralização da acidez. Porém, esse efeito diferenciado do calcário pode estar relacionado às características distintas dos materiais corretivos utilizados e sua ação na eficiência da neutralização da acidez do solo, já que possuem natureza química diferente (silicato e carbonato).

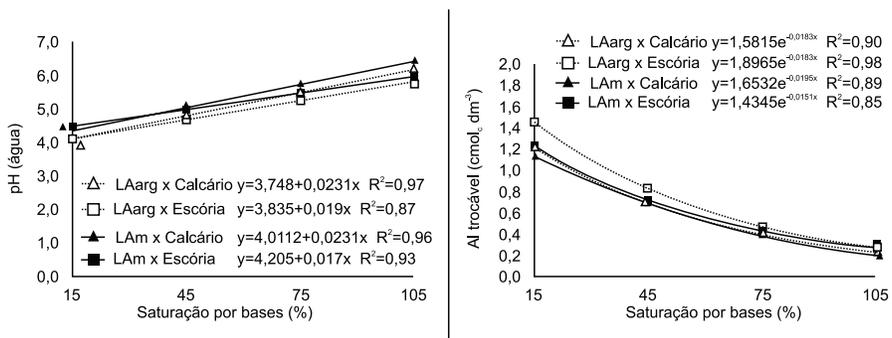


Figura 1. Valores de pH em água e teores de alumínio trocável de Latossolos Amarelos com textura argilosa (LAarg) e média (LAM), em função de índices de saturação por bases, associados à aplicação de doses de calcário e escória de alto-forno.

Independente do tipo de solo, houve redução dos teores de alumínio (Al) trocável do solo com o aumento dos valores de saturação por bases (Figura 1), demonstrando a semelhança na ação neutralizante da escória de siderurgia em relação ao calcário. O efeito neutralizante da escória de siderúrgica no solo é devido à diminuição da acidez potencial (H^+Al), por consequência do aumento do valor do pH, gerado pela reação da base SiO_3^{2-} presente nesse resíduo (Alcarde, 2005), e promovendo a precipitação de formas de Al trocável que podem ser tóxicas (Prado et al., 2001).

Em ambos os solos, houve aumento dos teores de Ca e Mg com o incremento das doses aplicadas dos materiais corretivos (Figura 2). No entanto, a aplicação de calcário promoveu os maiores incrementos nos teores de Ca e Mg do solo. Os incrementos obtidos entre as médias dos teores de Ca associadas aos valores dos índices de saturação por bases, para cada tipo

de solo, foram da ordem de $3,04 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o calcário, enquanto para a escória foi equivalente a $2,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os teores de Mg no solo também apresentaram maiores incrementos médios com aplicação de calcário ($0,44 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) do que com escória ($0,21 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

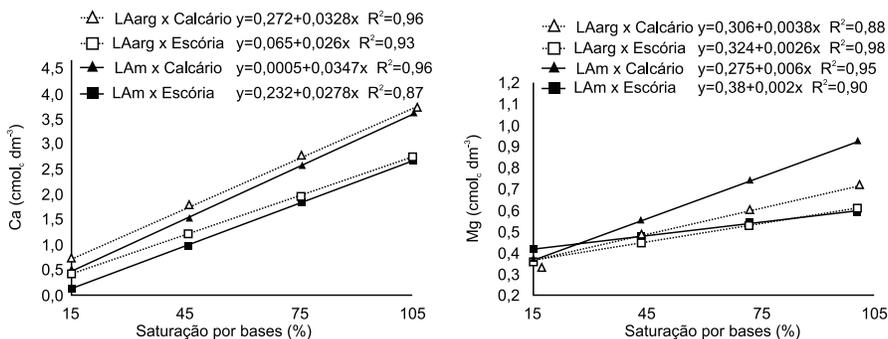


Figura 2. Teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) de Latossolos Amarelos com textura argilosa (LAarg) e média (LAm), em função de índices de saturação por bases, associados à aplicação de doses de calcário e escória de siderurgia.

Esses resultados são devido às maiores concentrações desses nutrientes na composição do calcário. Porém, os resultados obtidos permitem considerar a escória como uma excelente fonte fertilizante de Ca e Mg, uma vez que a aplicação do resíduo promoveu a elevação dos teores desses nutrientes a valores considerados adequados para a maioria das espécies de interesse econômico do estado do Pará (Brasil; Cravo, 2007).

De modo geral, os resultados indicam que o calcário foi mais eficiente do que a escória na correção da acidez dos solos, o que pode ser devido às características químicas (PRNT) da primeira fonte corretiva, que promoveu melhorias nos atributos químicos do solo. No entanto, quando comparadas aos calcários, as escórias podem apresentar maior efeito residual no solo, em razão da liberação mais lenta de nutrientes (Prado et al., 2003).

A aplicação de escória promoveu aumento nos teores de K trocável, observando-se que, independente do solo, houve aumento nos teores do nutriente, cujos valores passaram de $0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a valores próximos a $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, nas doses mais elevadas (Figura 3).

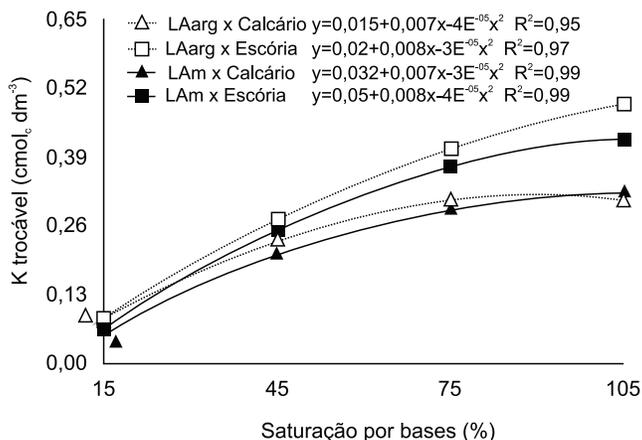


Figura 3. Teores de potássio (K) trocável em Latossolos Amarelos com textura argilosa (LAarg) e média (LAm), em função de índices de saturação por bases, associados à aplicação de doses de calcário e escória de siderurgia.

Em ambos os solos, houve aumento da massa seca da parte aérea de plantas de arroz, com a aplicação de doses crescentes de escória e de calcário, associadas ao aumento dos níveis de saturação por bases (Tabela 3).

Tabela 3. Produção de matéria seca da parte aérea de arroz (MSPA) e teores de potássio (K) em Latossolo Amarelo textura média e argilosa que receberam aplicação de doses de corretivos de acidez (calcário e escória).

Solos	Saturação por bases (%)	MSPA (g por vaso)	
		Calcário	Escória
LAarg	15	0,66 a A	0,75 a A
	45	0,98 a B	0,93 a B
	75	0,92 a B	0,89 a B
	105	1,07 a B	0,95 a B
LAm	15	0,66 b A	0,87 a A
	45	1,80 a A	1,26 b A
	75	1,68 a A	1,56 a A
	105	1,55 b A	1,77 a A

Médias seguidas por mesma letra minúscula comparam os produtos na linha e maiúscula comparam os tipos de solo na coluna, e não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott Knott ($P < 0,05$).

No solo com maior teor de argila (LAarg), a escória e o calcário não diferiram em termos de produção de matéria seca, mostrando a semelhança de resultados entre os corretivos e indicando a viabilidade de uso desse resíduo como alternativa para a correção da acidez do solo. No Latossolo Amarelo textura média (LAm), as respostas em produção de matéria seca da parte aérea em decorrência do uso de ambos os produtos corretivos foram superiores às obtidas no solo mais argiloso.

A máxima produção de massa seca da parte aérea de arroz obtida com a escória, estimada com base nas curvas de resposta em função de doses aplicadas, foi decorrente das melhorias nos atributos do solo e na nutrição das plantas, e esteve associada ao teor de $3,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de $\text{Ca}+\text{Mg}$ e ao valor de 63,47% de saturação por bases do solo. Esses resultados são considerados adequados para o bom desenvolvimento das plantas, além de reduzir o teor de Al^{3+} para $0,28 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, valor este considerado não tóxico para a maioria das plantas (Brasil; Cravo, 2007).

Os resultados permitem concluir que a aplicação de doses crescentes de escória de siderurgia promove melhorias nos atributos químicos do solo, reduzindo a acidez e aumentando os teores de Ca, Mg e K. A aplicação de escória de siderurgia promoveu aumento satisfatório na produção de matéria seca da parte aérea de arroz, indicando que esse resíduo pode ser usado como corretivo de acidez do solo e fornecedor de nutrientes para cultura de arroz.

Reatividade de escória de alto-forno em um Latossolo Amarelo Distrófico

Objetivando avaliar a ação neutralizante da escória de siderurgia, sua reatividade e o efeito sobre a concentração de nutrientes em solo representativo da região, conduziu-se um trabalho no Campo Experimental da Embrapa Amazônia Oriental, localizado no município de Terra Alta, Pará. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico textura média e apresentou as seguintes características químicas na camada 0 cm–20 cm: pH (H_2O) de 4,9; P e K (Mehlich 1) iguais a 2 mg dm^{-3} e 24 mg dm^{-3} , respectivamente; V% igual a 23,9%; Ca, Mg, Al e CTC iguais a $0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente.

Foram testados dois corretivos de acidez (escória de alto-forno e calcário dolomítico), aplicados em três doses equivalentes a 1 t ha^{-1} , 2 t ha^{-1} , e 3 t ha^{-1} , mais um tratamento testemunha (sem corretivo). As quantidades dos materiais corretivos foram ajustadas para o PRNT 100%. A escória utilizada no presente trabalho foi coletada em vazamento de alto-forno da Companhia Siderúrgica Paraense, localizada no município de Marabá.

Os corretivos foram passados em peneira de 0,3 mm de abertura de malha (ABNT 50) e as características químicas foram de 94,0% e 67,6% de PRNT; 45,8% e 35,5% de CaO e 4,5% e 3,4% de MgO, respectivamente, para o calcário e a escória. Os corretivos foram incorporados ao solo, colocando-se metade das quantidades antes da aração e o restante antes da gradagem.

Para avaliação da reatividade dos produtos corretivos, procedeu-se a coleta de amostras na profundidade de 0 cm–20 cm, antes da aplicação dos corretivos e posteriormente aos 7, 14, 21, 28 e 35 dias. Realizou-se as análises dos atributos químicos nas amostras por meio das seguintes determinações: pH em água, teores de Al trocável, Ca+Mg, P e K do solo.

De acordo com os resultados, observou-se que ambos os produtos promoveram a redução da acidez do solo (Tabela 4). No entanto, a ação do calcário foi mais efetiva do que a da escória, verificando-se aumento dos valores de pH do solo, em função das doses crescentes de calcário, na maioria dos períodos avaliados. A escória promoveu um menor aumento nos valores de pH, indicando a lenta solubilização do produto no solo.

Esse mesmo comportamento também foi observado com o Al trocável, verificando-se redução dos teores, em função da aplicação dos corretivos, sendo o calcário mais efetivo do que a escória. Resultados semelhantes foram obtidos por Prado et al. (2003), em que a ação neutralizante da escória foi mais lenta no solo, em comparação ao calcário, o que pode ser devido à natureza química dos produtos.

Tabela 4. Atributos químicos do solo em função da aplicação de doses de corretivos de acidez em diferentes períodos de amostragem em um Latossolo Amarelo Distrófico.

Atributo do solo	Período (dia)	Corretivo de acidez			
		Calciário	Escória		
		Modelo de regressão	Modelo de regressão	R ²	
pH (água)	0	$y = 0,013x + 4,847$	$y = 0,007x + 4,84$	0,53 _{ns}	0,02 _{ns}
	7	$y = 0,17x + 4,737$	$y = -0,027x + 4,873$	0,85*	0,80*
	14	$y = 0,167x + 4,783$	$y = 0,037x + 4,770$	0,73*	0,69 _{ns}
	21	$y = 0,195x + 4,753$	$y = 0,027x + 4,893$	0,82*	0,16 _{ns}
	28	$y = 0,17x + 4,937$	$y = 0,028x + 4,853$	0,94*	0,30 _{ns}
	35	$y = 0,173x + 5,007$	$y = 0,063x + 4,872$	0,98*	0,71 _{ns}
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0	$y = 0,790e^{0,0281x}$	$y = 0,752e^{0,0066x}$	0,89*	0,02 _{ns}
	7	$y = 0,724e^{-0,3755x}$	$y = 0,648e^{-0,0462x}$	0,89*	0,25 _{ns}
	14	$y = 0,630e^{-0,3376x}$	$y = 0,692e^{-0,0922x}$	0,89*	0,60 _{ns}
	21	$y = 0,725e^{-0,4916x}$	$y = 0,711e^{-0,0617x}$	0,88*	0,80*
	28	$y = 0,632e^{-0,5404x}$	$y = 0,642e^{-0,0711x}$	0,89*	0,90*
	35	$y = 0,606e^{-0,6454x}$	$y = 0,753e^{-0,1795x}$	0,97*	0,97*
Ca+Mg (cmol _c dm ⁻³)	0	$y = -0,042x + 1,083$	$y = -0,0017x + 0,898$	0,90*	0,00 _{ns}
	7	$y = 0,317x + 1,283$	$y = 0,115x + 1,048$	0,76*	0,88*
	14	$y = 0,367x + 1,25$	$y = 0,055x + 1,238$	0,88*	0,13 _{ns}
	21	$y = 0,38x + 1,23$	$y = 0,08x + 1,138$	0,94*	0,31 _{ns}
	28	$y = 0,412x + 1,345$	$y = 0,115x + 1,148$	0,83*	0,64 _{ns}
	35	$y = 0,513x + 1,247$	$y = 0,125x + 1,092$	0,97*	0,68 _{ns}

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Atributo do solo	Período (dia)	Corretivo de acidez			
		Calcário		Escória	
		Modelo de regressão	R ²	Modelo de regressão	R ²
P (mg dm ⁻³)	0	$y = -0,152x^2 + 0,388x + 4,107$	0,01 ^{ns}	$y = 0,059x^2 - 0,091x + 4,255$	0,22 ^{ns}
	7	$y = -0,815x^2 + 2,812x + 3,824$	0,06 ^{ns}	$y = -0,125x^2 + 1,639x + 3,925$	0,91*
	14	$y = -0,879x^2 + 3,338x + 3,558$	0,01 ^{ns}	$y = -1,127x^2 + 4,683x + 3,088$	0,98*
	21	$y = -0,745x^2 + 2,896x + 4,154$	0,07 ^{ns}	$y = -0,385x^2 + 2,281x + 4,859$	0,95*
	28	$y = -0,110x^2 + 1,338x + 4,565$	0,18 ^{ns}	$y = -0,485x^2 + 2,399x + 4,510$	0,91*
	35	$y = -1,352x^2 + 6,009x + 2,712$	0,27 ^{ns}	$y = -1,080x^2 + 5,105x + 2,796$	0,97*
K+ (mg dm ⁻³)	0	$y = -0,067x + 21,188$	0,58 ^{ns}	$y = 0,607x + 19,501$	0,18 ^{ns}
	7	$y = -0,271x + 25,136$	0,79*	$y = 4,201x + 21,816$	0,48 ^{ns}
	14	$y = -0,138x + 23,029$	0,98*	$y = 6,501x + 21,715$	0,98*
	21	$y = 0,207x + 23,029$	0,81*	$y = 6,501x + 21,024$	0,88*
	28	$y = 0,405x + 18,961$	0,62*	$y = 7,658x + 17,611$	0,79*
	35	$y = -0,501x + 19,457$	0,96*	$y = 7,458x + 20,938$	0,94*

* significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Os maiores efeitos, tanto do calcário, como da escória, na redução da acidez do solo, foram observados na amostragem realizada aos 35 dias da aplicação. As tendências observadas nas curvas de regressão (Tabela 4) indicam que a escória exige maior tempo de reação no solo, para a sua plena dissolução, em relação ao calcário. A adição dos corretivos ao solo promoveu aumentos lineares nos teores de Ca+Mg (Tabela 4), com maiores incrementos observados com a aplicação de calcário, confirmando a lenta solubilidade da escória, refletida na menor disponibilização dos nutrientes.

Embora tenha apresentado menor efetividade na neutralização da acidez do solo, a escória também promoveu aumento na disponibilidade de P (Figura 4), com valores da mesma magnitude dos obtidos com calcário, indicando que a redução da adsorção do nutriente no solo ocorreu mais pela ação do silicato em deslocar ou saturar os sítios de adsorção de P, do que pelos incrementos do pH e redução do alumínio do solo. A maioria dos trabalhos com utilização de escória não evidenciam claramente esse efeito, especialmente em condições de campo (Prado; Fernandes, 2001).

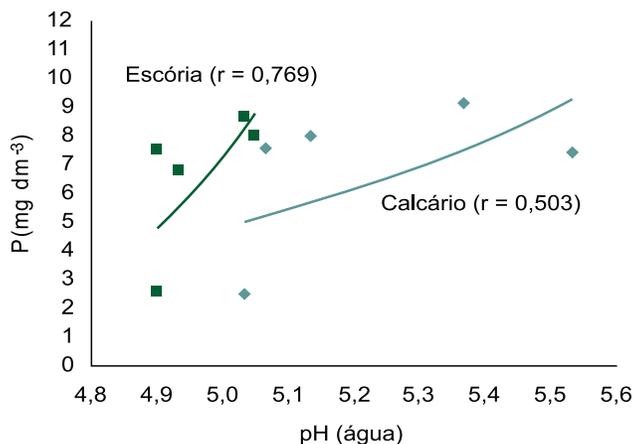


Figura 4. Disponibilidade de fósforo (P) no solo em função de valores de pH em água do solo, avaliados em diferentes períodos de amostragem e associados à aplicação de calcário e escória.

Os teores de K no solo aumentaram linearmente (Tabela 4) com a aplicação de doses de escória, em decorrência de o resíduo conter o nutriente em sua constituição, resultado este também verificado por Carvalho-Pupatto et al. (2004). Não houve resposta do K em função da aplicação de calcário.

Os resultados permitem concluir que a aplicação de escória de alto-forno minimizou os efeitos da acidez do solo, promovendo o aumento do valor do pH, a redução dos teores de Al trocável e o aumento de Ca+Mg. As alterações dos atributos químicos do solo foram mais pronunciadas aos 35 dias da aplicação de ambos os corretivos. A escória promoveu aumento nos teores de K e na disponibilidade de P no solo.

Escória de alto-forno nas produções de milho e feijão-caupi e nas alterações de atributos químicos de um Latossolo Amarelo Distrófico

O trabalho foi conduzido no Campo Experimental da Embrapa Amazônia Oriental, localizado no município de Terra Alta, PA, em um solo classificado como Latossolo Amarelo Distrófico textura média, possuindo as seguintes características químicas na camada superficial: pH (H_2O) de 4,9; P e K (Mehlich 1) iguais a 2 mg dm^{-3} e 24 mg dm^{-3} , respectivamente; V% igual a 23,9%; Ca, Mg, Al e CTC iguais a $0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente.

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial $2 \times 5 + 1$, correspondendo a dois materiais corretivos de acidez (escória de alto-forno e calcário dolomítico), cinco doses (1 t ha^{-1} , 2 t ha^{-1} , 3 t ha^{-1} e 4 t ha^{-1} , mais um tratamento testemunha sem corretivo). Utilizou-se uma escória coletada em vazamento de alto-forno da Companhia Siderúrgica Paraense, localizada no município de Marabá.

Os corretivos foram passados em peneira de 0,3 mm de abertura de malha (ABNT nº 50) e as características químicas foram: 94,0% e 67,6% de PRNT; 45,8% e 35,5% de CaO e 4,5% e 3,4% de MgO, respectivamente, para o calcário e a escória. Os corretivos foram incorporados ao solo, aplicando-se metade das quantidades referentes aos tratamentos (ajustadas para PRNT 100%), por ocasião da aração e o restante na gradagem.

Após 30 dias da aplicação dos tratamentos realizou-se a semeadura do milho (BRS 1030) em parcelas com área de 20 m², as quais receberam adubação básica com N, P e K, além de micronutrientes, em quantidades definidas com base nos resultados iniciais da análise de solo e conforme as recomendações de adubação para o estado do Pará (Cravo et al., 2007). Para avaliar o efeito residual dos corretivos, após a colheita do milho, que ocorreu após os 120 dias da semeadura, efetuou-se o plantio de feijão-caupi (BRS Tracuateua) nos mesmos tratamentos da cultura anterior. Nessa cultura, efetuou-se adubação básica apenas com K, na forma de cloreto de potássio (KCl), também, seguindo o mesmo critério utilizado para o milho.

De acordo com os resultados, a aplicação de ambos os corretivos promoveu aumento nas produtividades de grãos de milho (Tabela 5). No entanto, não houve diferença significativa entre os corretivos, indicando o potencial de utilização da escória na correção da acidez do solo e seu reflexo na produtividade da cultura.

Tabela 5. Produção de grãos de milho em função da aplicação de doses crescentes de corretivos de acidez em Latossolo Amarelo Distrófico.

Dose (t ha ⁻¹)	Produção de grãos (kg ha ⁻¹)		Média
	Calcário	Escória	
0	1.518	1.282	1.573
1	3.149	2.611	2.880
2	3.135	1.920	2.527
3	2.853	3.348	3.100
4	2.106	2.963	2.534
Média	2.552 a	2.425 a	2.523

Médias seguidas por mesma letra na linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott Knott ($P < 0,05$).

O aumento das quantidades aplicadas de ambos os materiais corretivos favoreceu aumento nos teores de P disponível no solo (Figura 5), indicando que houve diferentes causas para esse comportamento, já que a ação neutralizante da escória no solo foi inferior à do calcário. Isto demonstra que a maior disponibilidade de P nas doses mais elevadas de escória pode estar mais associada à ação competitiva dos ânions silicatos contidos na escória, com os fosfatos nos mesmos sítios de adsorção, do que à ação neutralizante da acidez do solo.

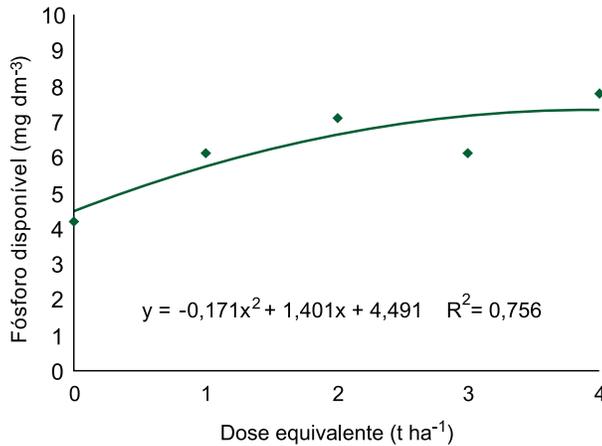


Figura 5. Teores médios de fósforo disponível em função da aplicação de doses de escória e calcário em um Latossolo Amarelo distrófico.

A aplicação de escória de siderurgia promoveu o aumento nos teores de K trocável no solo, a partir da dose de 2 t ha⁻¹ (Figura 6). Os maiores teores de K no solo nas doses mais elevadas de escória ocorreram em razão de esse resíduo apresentar o elemento na sua constituição.

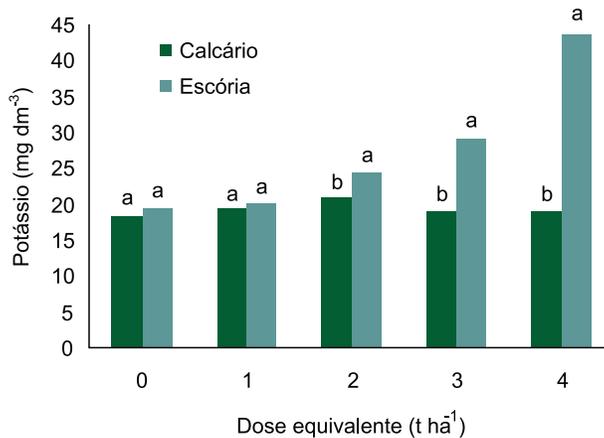


Figura 6. Teores de potássio no solo em função da aplicação de doses de escória e calcário em um Latossolo Amarelo Distrófico.

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$), dentro de cada dose dos corretivos.

O incremento dos teores do nutriente no solo com aplicação das doses mais elevadas de escória pode ser a razão para o aumento da produção de milho, já que o efeito de neutralização da acidez do solo pela escória, em geral, é menos pronunciado que o calcário.

Os corretivos promoveram aumento na produtividade de grãos de feijão-caupi cultivado após a colheita do milho, verificando-se que o calcário foi superior à escória (Figura 7). A influência do efeito residual dos corretivos pode ser observada pelos acréscimos de produtividade obtidos em relação à testemunha (sem corretivo), com incrementos da ordem de 22% e 31% na produção de feijão-caupi, respectivamente, com a aplicação de escória e calcário. Esses resultados demonstram o efeito benéfico da escória na produtividade da cultura, apesar de ter sido observada pouca influência desse corretivo sobre os atributos químicos do solo relacionados à acidez.

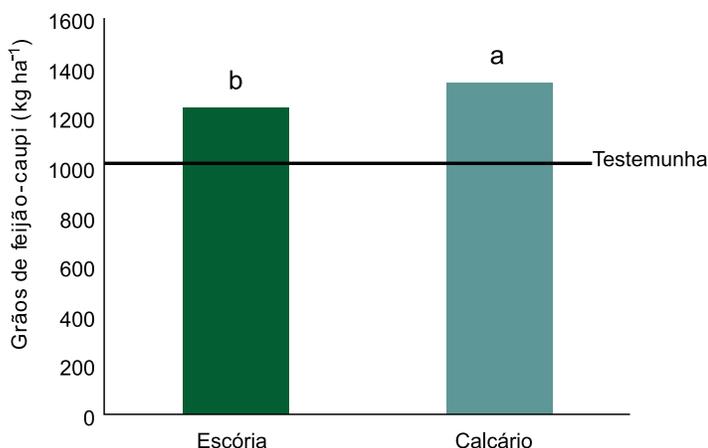


Figura 7. Produção de grãos de feijão-caupi em função da aplicação de doses equivalentes de escória e calcário em um Latossolo Amarelo Ddistrófico.

Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott Knott ($P < 0,05$).

Efeito residual de escória de alto-forno sobre os atributos químicos do solo e a produção de milho

O estudo foi conduzido no Campo Experimental da Embrapa Amazônia Oriental, localizado no município de Terra Alta, PA, em um solo classificado

como Latossolo Amarelo Distrófico textura média. Para avaliar o efeito residual, utilizou-se a mesma área do experimento anterior, na qual foram aplicados dois corretivos de acidez (escória e calcário dolomítico) em cinco doses (0 t ha⁻¹, 1 t ha⁻¹, 2 t ha⁻¹, 3 t ha⁻¹ e 4 t ha⁻¹).

Após a sucessão milho/feijão-caupi, procedeu-se novo plantio do milho (BRS 1030) no ano agrícola subsequente. Aos 10 dias da semeadura, todas as parcelas receberam adubação básica com 140 kg ha⁻¹, 120 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, N e K₂O, respectivamente, nas formas de superfosfato triplo, ureia e cloreto de potássio, sendo a adubação com N e K realizadas de forma parcelada.

Após um período de 12 meses de aplicação dos tratamentos, tanto o calcário, quanto a escória continuaram promovendo efeito nos atributos do solo (pH, K, Ca, Mg e Al), o que indica a ocorrência de efeito residual dos tratamentos. Independente do corretivo aplicado, a produção de milho (massa de grãos e espigas) foi influenciada pelo aumento das doses aplicadas (Figura 8).

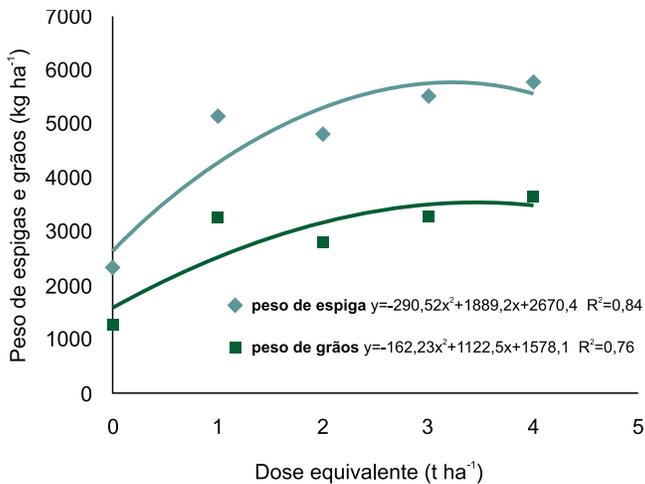


Figura 8. Produção de espigas e grãos de milho em resposta à aplicação de doses crescentes de corretivos (escória e calcário) da acidez em um Latossolo Amarelo Distrófico.

O aumento das doses dos corretivos promoveu aumento nas produções de milho, de modo que o modelo quadrático apresentou o melhor ajuste. Os acréscimos dos teores dos nutrientes no solo com aplicação das doses dos corretivos podem ser a razão para o aumento crescente da produção de milho, uma vez que os efeitos de neutralizante da acidez dos corretivos continuaram, mesmo sendo aplicado no ano anterior, demonstrando o aproveitamento do seu efeito residual (Prado et al., 2003).

Frações granulométricas de escória de alto-forno e sua influência em atributos químicos do solo e na produção de milho

Visando avaliar a influência de diferentes frações granulométricas de escória de siderúrgica sobre alguns atributos químicos do solo e a produção de milho, conduziu-se um estudo no Campo Experimental da Embrapa Amazônia Oriental, em Terra Alta, PA. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, textura média, possuindo as seguintes características químicas na camada 0 cm–20 cm: pH (H₂O) de 4,9; P e K (Mehlich 1) iguais a 2 mg dm⁻³ e 24 mg dm⁻³, respectivamente; Ca, Mg e Al iguais a 0,6 cmol_c dm⁻³, 0,3 cmol_c dm⁻³ e 0,8 cmol_c dm⁻³, respectivamente; CTC pH 7 igual a 5,34 e V% igual a 17%. Os teores de argila, areia e silte corresponderam a 149 g kg⁻¹, 736 g kg⁻¹ e 115 g kg⁻¹, respectivamente.

A escória utilizada foi coletada em vazamentos de um alto-forno da Usina Siderúrgica do Pará, localizada no município de Barcarena, Pará. O resíduo passou pelo processo de secagem e, posteriormente, moagem. Após a trituração, a escória passou por peneiras ABNT nº 20, 50, 100 e 200, que possuem aberturas de malha equivalentes a 0,850 mm, 0,300 mm, 0,150 mm e 0,075 mm, respectivamente.

Foram testadas quatro frações granulométricas da escória (material retido entre as peneiras ABNT 20-50; 50-100; 50-100 e <200), em três saturações por bases (40%, 70% e 100%) e um tratamento adicional com calcário, além de uma testemunha absoluta (sem calcário e escória), totalizando 42 parcelas com dimensões de 28 m². As quantidades de escória aplicadas corresponderam a 1,65 t ha⁻¹, 3,81 t ha⁻¹ e 5,98 t ha⁻¹. Utilizou-se a granulometria ABNT <50 para o calcário, pelo fato de ser essa fração definida

com eficiência relativa equivalente a 100%, conforme a legislação brasileira (Brasil, 1988). Os corretivos foram aplicados manualmente a lanço em cada parcela, colocando-se metade das quantidades estimadas antes da aração e a outra metade antes da gradagem.

Após a aplicação, os corretivos ficaram em incubação no solo por período de 30 dias e, em seguida, realizou-se a semeadura do milho (BRS 1030), que recebeu adubação básica com N, P e K, além de micronutrientes, em todas as parcelas do experimento.

Aos 120 dias da semeadura, em geral, observou-se que a aplicação de doses crescentes de escória promoveu aumento na massa de espigas e de grãos de milho. Independente da dose aplicada, as maiores produções de grãos de milho foram obtidas nos tratamentos com frações granulométricas de 100-200 e <200, cujos valores de produtividade não diferiram significativamente entre si (Tabela 6), demonstrando a maior reação da escória no solo quando aplicada em granulometrias mais finas, com reflexos diretos na produtividade da cultura do milho.

Tabela 6. Produtividade de grãos ($t\ ha^{-1}$) de plantas de milho em função da aplicação de doses crescentes e frações granulométricas de escória de siderurgia no município de Terra Alta, PA.

Fração granulométrica (ABNT n°)	Dose de escória ($t\ ha^{-1}$)		
	1,65	3,81	5,98
20-50	3,77 c B	4,18 c B	5,88 b A
50-100	4,82 b B	5,32 b B	6,35 a A
100-200	5,53 a B	6,21 a A	6,70 a A
<200	5,80 a B	6,57 a A	6,72 a A

Médias seguidas por mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na mesma linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott Knott ($P < 0,05$).

Comparando-se as frações granulométricas utilizadas para a escória com a do tratamento adicional de calcário (Tabela 7), observou-se diferença entre os tratamentos para pH, Ca+Mg, Al, e V%, em que o tratamento com calcário (<50) e escória nas granulometria mais finas (100-200 e <200) apresentaram maiores valores de pH e dos teores de Ca+Mg, além de menores teores de Al trocável. O maior índice de saturação por bases do solo foi obtido com o calcário, que apresentou valor superior aos demais.

Tabela 7. Frações granulométricas de escória de siderurgia e de calcário sobre alguns atributos químicos do solo (pH, Ca+Mg, Al e V%), no município de Terra Alta, PA.

Tratamento	Fração granulométrica		Atributos do solo		
	ABNT nº	pH	Ca+Mg	Al ³⁺	V
		H ₂ O	cmol _c dm ⁻³	%	
Escória	20-50	5,06 b	1,20 b	0,70 a	22,8 c
Escória	50-100	5,13 b	1,30 b	0,60 a	27,1 c
Escória	100-200	5,23 a	1,56 a	0,53 b	30,7 b
Escória	<200	5,30 a	1,86 a	0,50 b	32,6 b
Calcário	<50	5,33 a	2,10 a	0,36 b	37,7 a
Testemunha	Sem corretivo	5,03 b	0,86 c	0,90 a	17,6 d

Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott Knott ($P < 0,05$).

Em relação aos teores de Ca+Mg e valores de V%, todos os tratamentos com escória foram superiores ao tratamento testemunha, embora esse comportamento não tenha sido observado para os valores de pH e teores de Al (Tabela 7). Esses resultados indicam que, independente da granulometria, a solubilização dos produtos promoveu aumento dos teores desses nutrientes no solo, o que demonstra a eficiência da escória como fonte dos nutrientes para as plantas.

Os resultados permitem concluir que houve maior eficiência da escória de alto-forno na neutralização da acidez do solo quando aplicada em frações granulométricas mais finas (peneiras ABNT 100-200 e <200), as quais proporcionaram melhorias nos atributos químicos do solo relacionados à redução da acidez do solo. A dose mais elevada de escória, correspondente à porcentagem de saturação por bases estimada em 100%, foi considerada a mais eficiente na produção de grãos de milho.

Conclusão

As informações apresentadas no presente trabalho permitem concluir que a escória apresenta potencialidade de aproveitamento como insumo agrícola na correção da acidez do solo e como fornecedor de Ca para as plantas. Do ponto de vista agrônomo, a utilização da escória de alto-forno proporciona melhoria em atributos químicos do solo, com reflexos positivos na produção de culturas, apresentando potencial de uso, especialmente em regiões

que possuem a disponibilidade desse produto e que apresentam restrição de acesso ao calcário, por inexistência de jazidas próximas às regiões de consumo desse insumo.

Referências

- ALCARDE, J. C. **Corretivo de acidez do solo**: características e interpretações. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 2005. 24 p. (ANDA. Boletim técnico, 6).
- ANDERSON, D. L. Soil and leaf nutrient interactions following application of calcium silicate slag to sugarcane. **Fertilizer Research**, v. 30, n. 1, p. 9-18, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Classificação de resíduos. Rio de Janeiro, 2006. 71 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Laboratório Nacional de Referência Vegetal. **Análise de corretivos, fertilizantes inoculantes**: métodos oficiais. Brasília, DF, 1988. 104 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 27, de 09 de junho de 2006. concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas. **Diário Oficial da União**, 21 jun. 2006. Seção 1, p. 15.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 24, de 20 de junho de 2007. Métodos reconhecidos para determinação de metais pesados tóxicos em fertilizantes, corretivos agrícolas, condicionadores de solo e substratos para plantas. **Diário Oficial da União**, 21 jun. 2007a. Seção 1, p. 23.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução normativa nº 5, de 23 de fevereiro de 2007. Normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade, de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**, 1 mar. 2007b. Seção 1, p. 10.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico**: Setor Metalúrgico. Brasília, DF: SGM, 2017. 95 p.
- BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S. Interpretação dos resultados de análise do solo. In: CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M.; BRASIL, E. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Pará**. 1. ed. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. p. 19-29.
- CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BULL, 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, n. 12, p. 1213-1218, 2004.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

CLARK, R. B.; FLORES, C. I.; GOURLEY, L. M.; DUNCAN, R. R. Mineral element concentration and grain field of sorghum (*Sorghum bicolor*) and pearl millet (*Pennisetum glaucum*) grow on acid soil. In: BEUSICHEM, M. L. van (Ed.). **Plant nutrition: physiology and applications**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 391-396.

CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M.; BRASIL, E. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Pará**. 1. ed. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 262p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo, 1999. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

CORREA, J. C.; BULL, L. T.; PAGANINI, W. da S.; 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, n. 3, p. 411-419, mar. 2008.

DEUS, A. C. F.; BULL, L. T. Eficiência de escórias de siderurgia na cultura do feijoeiro em sistema de semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 43, n. 10, p.1783-1789, 2013.

ELAWAD, S. H.; STREET, J. J.; GASCHO, G. J. Response of sugarcane to silicate source: and rate. I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 3, p. 481-484, 1982.

KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H.; ULLOA, M.; DATNOFF, L. E. Calibration of soil and plant silicon for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 7, p. 1071-1084, 2001.

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of cucumber plant in soil culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 29, p. 463-471, 1983.

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon deficiency of tomato plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 2, p. 175-189, 1978.

NEHRENHEIM, E.; GUSTAFSSON, J. P. Kinetic sorption modelling of Cu, Ni, Zn, Pb and Cr ions to pine bark and blast furnace slag by using batch experiments. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 6, p. 1571-1577, 2008.

PEREIRA, H. S.; BARBOSA, N. C.; CARNEIRO, M. A. C.; KORNDÖRFER, G. H. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 239-247, 2007.

PRADO, R. de M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; VILLAR, M. L. P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e do calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1199-1204, 2001. Notas Científicas.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. 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, n. 2, p. 287-296, 2003.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo**: estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal: Fundação de Estudos e Pesquisas em Medicina Veterinária, Agronomia e Zootecnia, 2001. 67 p.

SNYDER, G. H.; JONES, D. B.; GASCHO, G. J. Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 5, p. 1259-1263, 1986.

SOBRAL, M. F.; NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V.; FERREIRA, H. A.; SILVA, A. J.; SILVA, F. B. V. R. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 867-872, 2011.

VIDAL, A. A.; PRADO, R. M. Aplicação de escória siderúrgica, calcário e uréia em Latossolo cultivado com arroz. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 2, p. 264-272, abr./jun. 2011.



Amazônia Oriental