



GABRIELLY NAYARA TAVARES DA SILVA

**ESCÓRIA DE METALURGIA COMO CORRETIVO DE
ACIDEZ DO SOLO E FONTE DE NUTRIENTES PARA
ARROZ E SOJA**

**LAVRAS – MG
2021**

GABRIELLY NAYARA TAVARES DA SILVA

**ESCÓRIA DE METALURGIA COMO CORRETIVO DE ACIDEZ DO SOLO E
FONTE DE NUTRIENTES PARA ARROZ E SOJA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do solo e nutrição de plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Guilherme Lopes
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Gabrielly Nayara Tavares da.

Escória de metalurgia como corretivo de acidez do solo e fonte
de nutrientes para arroz e soja / Gabrielly Nayara Tavares da Silva.
- 2021.

50 p. : il.

Orientador(a): Guilherme Lopes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Acidez de solos. 2. Escória metalúrgica. 3. Fonte de
nutrientes para plantas. I. Lopes, Guilherme. II. Título.

GABRIELLY NAYARA TAVARES DA SILVA

**ESCÓRIA DE METALURGIA COMO CORRETIVO DE ACIDEZ DO SOLO E
FONTE DE NUTRIENTES PARA ARROZ E SOJA**

**METALLURGY SLAG AS A SOIL ACIDITY CORRECTIVE AND A SOURCE OF
NUTRIENTS FOR RICE AND SOYBEAN**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do solo e nutrição de plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 22 de abril de 2021.

Ph. D. Luiz Roberto Guimarães Guilherme – DCS/UFLA

DSc. Silvio Junio Ramos – Instituto Tecnológico Vale

Prof. DSc. Guilherme Lopes
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

*À minha mãe, pelo apoio incondicional,
ao meu noivo, por todos os incentivos e
à minha família, que sempre se fez presente*
Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida e por toda proteção;
À minha mãe Lílian pelo seu amor incondicional, por ser meu porto seguro e por nunca ter medido esforços para a realização de todos os meus sonhos;
Ao meu pai Geraldo pelo apoio e compreensão;
Ao meu irmão Marcos por todo o amor e carinho;
À minha família por todos os ensinamentos, pelos valores e sabedoria;
Ao meu noivo Leandro pelo amor, amizade e companheirismo;
Aos meus amigos de vida e faculdade pelo companheirismo e força;
Aos colegas do DCS pelo apoio durante a trajetória do mestrado;
Ao professor Guilherme Lopes pela orientação, conselhos e ensinamentos desde os meus anos de iniciação científica até o mestrado;
À UFLA por ter me oferecido grandes oportunidades desde a graduação;
Ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade e apoio;
Aos professores do DCS pelos ensinamentos durante o mestrado;
Aos técnicos do DCS pelo apoio durante minhas atividades;
Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado;
À CAPES e FAPEMIG por demais financiamentos;
E a todos que de certa forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho,
os meus sinceros agradecimentos.

“A vida é como andar de bicicleta, para ter equilíbrio você tem que se manter em movimento” (Albert Einstein)

RESUMO

Os solos brasileiros são altamente intemperizados, apresentam baixa fertilidade natural e alta acidez. Com isso, a prática da calagem é essencial para seu manejo em busca de uma boa produtividade agrícola. As escórias são subprodutos gerados em grandes quantidades na produção de aço e ligas metálicas. Esses subprodutos podem apresentar potencial de correção de acidez em solos devido apresentarem silicatos e óxidos de Ca e Mg. Por isso, a escória surge como uma fonte sustentável para ser usado como corretivo de acidez em solos brasileiros e como fonte de Ca e Mg para as plantas. Contudo, antes de ser utilizada para tal fim, devem ser realizados estudos avaliando sua eficiência agronômica. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi de estudar o potencial de utilização de uma escória metalúrgica, em comparação com um calcário comercial, como corretivo de acidez em dois solos contrastantes brasileiros e como fonte de nutrientes para o cultivo de arroz e soja. Para isso, realizou-se o estudo de vasos em casa de vegetação, sendo a escória e o calcário comercial aplicados previamente aos solos (textura média e argilosa) em duas doses, para aumentar a saturação por bases dos solos para 50 e 100%. Considerando que cada cultura foi tratada como um experimento e que dentro de cada experimento os solos foram avaliados separadamente, o delineamento experimental em cada situação foi o de blocos inteiramente casualizados, constando de 2 produtos x 2 doses + 1 testemunha para cada tipo de solo, totalizando 40 vasos por cultura (4 repetições de cada tratamento). Foi realizada a adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mo, e Zn nas doses 300; 200; 150; 50; 0,5; 1,5; 0,1; e 5 mg dm⁻³ respectivamente. Para o arroz, foram semeadas 10 sementes e deixadas 3 por vaso após emergência, e para a soja foram semeadas 5 sementes e deixadas 2 por vaso após emergência. O experimento foi levado até o estágio final de maturação das culturas, nas quais realizaram-se as análises químicas nas plantas (raiz, parte aérea e grãos), além de análises nos solos após o cultivo. A escória apresentou características químicas e físicas dentro dos limites exigidos pela legislação vigente para corretivos de acidez do solo. A escória foi tão eficiente quanto o calcário em aumentar o pH dos solos e diminuir a saturação do Al³⁺ na menor dose aplicada nos dois solos cultivados com o arroz e a soja. Além disso, a escória foi capaz de fornecer Ca e Mg às plantas de arroz e soja, obtendo resultados semelhantes ao do calcário comercial.

Palavras-chave: Subproduto. Calagem. Fonte de Ca e Mg. Acidez. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Brazilian soils are highly weathered, have low natural fertility and high acidity. Thus, the practice of liming is essential for the management of these soils to achieve high crop productivity. Slags are by-products generated in great amounts during the production of steel and metal alloys. These by-products may have potential to amend soil acidity since they contain Ca and Mg silicates and oxides. Therefore, slag appears as a sustainable source to be used as an acidity amendment in Brazilian soils and as a source of Ca and Mg for plants. However, before being used for this purpose, studies must be carried out to assess its agronomic efficiency. Therefore, the objective of this work was to study the potential use of a metallurgical slag, in comparison with a commercial limestone, as an acidity amendment in two contrasting Brazilian soils and as a source of nutrients for the cultivation of rice and soybean. For this, pot studies were carried out in a greenhouse, with the slag and commercial limestone being previously applied to the soils (medium and clayey texture) in two doses, to increase the base saturation to 50 and 100%. Considering that each crop was treated as an experiment and that, within each experiment, the soils were evaluated separately, the experimental design in each situation was the completely randomized block, consisting of 2 products x 2 doses + 1 control for each type of soil, totaling 40 pots per crop (4 replicates of each treatment). The fertilization was carried out with N, P, K, S, B, Cu, Mo, and Zn at doses of 300, 200, 150, 50, 0.5, 1.5, 0.1, and 5 mg dm⁻³ respectively. For rice, 10 seeds were sown and 3 seeds per pot were left after emergence, whereas for soybeans, 5 seeds were sown and 2 seeds per pot were left after emergence. The experiment was carried out until the final stage of the crop maturation, in which chemical analyzes were carried out on plants (roots, shoots, and grains), as well as in the soil after the crop cultivation. The slag showed chemical and physical characteristics within the limits required by current legislation for soil acidity amendments. Slag was as efficient as limestone in increasing soil pH and decreasing Al³⁺ saturation at the lowest dose applied to both soils cultivated with rice and soybean. Furthermore, the slag was able to supply Ca and Mg to rice and soybean plants, similarly to what was verified for commercial limestone.

Keywords: By-product. Liming. Ca and Mg source. Acidity. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação entre o pH e a disponibilidade de nutrientes e Al no solo	16
Figura 2 – Esquema dos blocos dos experimentos de arroz e soja	27
Figura 3 – Culturas do arroz e da soja em vasos na casa de vegetação	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros físicos e químicos da escória e do calcário	24
Tabela 2 – Atributos físicos e químicos dos solos	26
Tabela 3 – Quantidades da escória e do calcário em t ha ⁻¹ , para a aplicação em duas doses, em cada solo estudado	26
Tabela 4 – Massa seca de parte aérea e de grãos de arroz e soja cultivados nos dois solos, com a aplicação de duas doses da escória e do calcário, como corretivos de acidez do solo	31
Tabela 5 – Teores de nutrientes nas folhas das plantas de arroz cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo	32
Tabela 6 – Teores de nutrientes nas folhas das plantas de soja cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo ...	33
Tabela 7 – Teores de nutrientes na parte aérea e raízes das plantas de arroz cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo (Continua)	35
Tabela 8 – Teores de nutrientes na parte aérea e raízes das plantas de soja cultivadas em dois com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo (Continua)	36
Tabela 9 – Teores de nutrientes nos grãos de arroz cultivado em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo	38
Tabela 10 – Teores de nutrientes nos grãos de soja cultivada em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo	39
Tabela 11 – Efeitos da aplicação de duas doses da escória e do calcário, como corretivos de acidez do solo, nos atributos químicos dos dois solos após o plantio do arroz ..	42

Tabela 12 – Efeitos da aplicação de duas doses da escória e do calcário, como corretivos de acidez do solo, nos atributos químicos dos dois solos após o plantio da soja	43
Tabela 13 – Teores de P, K, S, B, Zn, Fe, Mn, Cu, MOS e C org total nos solos após o plantio do arroz.....	44
Tabela 14 – Teores de P, K, S, B, Zn, Fe, Mn, Cu, MOS e C org total nos solos após o plantio da soja.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS

Al	Alumínio
As	Arsênio
B	Boro
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
K	Potássio
Mg	Magnésio
Mo	Molibdênio
Mn	Manganês
Na	Sódio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
S	Enxofre
Zn	Zinco

LISTA DE SIGLAS

C org	Carbono orgânico
CTC	Capacidade de troca catiônica
IABr	Instituto Aço Brasil
MG	Minas Gerais
MOS	Matéria orgânica do solo
NC	Necessidade de calagem
PN	Poder de Neutralização
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total
RE	Reatividade
TFSA	Terra fina seca ao ar
V%	Saturação por bases do solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Acidez dos solos	15
2.2	Manejo da acidez dos solos	17
2.3	Metalurgia, siderurgia e seus subprodutos.....	19
2.4	Escórias metalúrgicas e siderúrgicas	20
3	JUSTIFICATIVA.....	22
4	HIPÓTESES	22
5	OBJETIVOS.....	22
5.1	Objetivo Geral.....	22
5.2	Objetivos Específicos	22
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
6.1	Obtenção e caracterização da escória	23
6.2	Experimento em casa de vegetação	24
6.3	Amostragem, preparação das amostras e análises químicas	28
6.3.1	Amostragem e preparação das amostras	28
6.3.2	Análises dos materiais vegetais e dos solos	28
6.4	Análises estatísticas.....	29
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
7.1	Caracterização da escória	30
7.2	Experimento em casa de vegetação	30
7.2.1	Efeitos no crescimento e no estado nutricional das plantas	30
7.2.2	Efeitos nos atributos dos solos.....	40
8	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

No geral, os solos brasileiros são muito intemperizados, com predominância de argilas de baixa atividade, altamente ácidos e com alta saturação por Al^{3+} . Tais características acarretam em uma baixa disponibilidade de nutrientes, limitando o crescimento das plantas e a produtividade agrícola (LOPES; GUILHERME, 2016). A calagem é a principal prática na correção da acidez dos solos, a qual consiste na aplicação de corretivos de acidez para elevar o pH e a saturação por bases (V%) do solo, aumentar as concentrações de Ca e Mg e consequentemente reduzir a concentração de alumínio (FAGERIA; NASCENTE, 2014). Embora o calcário seja o produto mais utilizado, a aplicação de subprodutos industriais na agricultura, para a correção da acidez do solo, vem sendo muito estudada (JIU-YU, 2010; SHI, 2016; HARPER; MBAKWE, 2020), como é o caso das escórias siderúrgicas e metalúrgicas (NING, 2016; LEON-ROMERO, 2018).

Estima-se que são gerados no mundo todo cerca de 400 milhões de toneladas de escória por ano (BRANCA et al., 2020; DAS, 2020b). Por apresentarem, no geral, silicatos e óxidos em sua composição, as escórias surgem como uma fonte econômica e sustentável na correção de acidez dos solos, visto que, são resíduos gerados em alta escala na produção de ligas metálicas, como por exemplo, na produção de aço. E, além de terem a capacidade de corrigir a acidez do solo, podem ser fontes de macro e micronutrientes às plantas (DAS, 2020b).

Durante o processo siderúrgico, podem ser adicionadas ligas metálicas para melhorar algumas características do aço, como por exemplo, maleabilidade e dureza, e essas ligas podem ser de ferrocromo, manganês, silício, alumínio, vanádio, boro e titânio (FISHER; BARRON, 2019). E, assim como na produção do aço, a produção destas ligas também gera grande quantidade de escória, que deve ser gerenciada de forma ambientalmente correta.

Estudos sobre o uso de escórias como corretivo de acidez dos solos já são bem relatados na literatura. Deus et al. (2020) demonstraram que a aplicação de diferentes tipos de escória no solo em sistema de plantio direto foi eficiente na neutralização de acidez do solo e no fornecimento de nutrientes às plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Nunes et al. (2019) em um estudo avaliando o efeito de escória siderúrgica e de fungos micorrízicos associados à adubação fosfatada em plantas de milho.

Contudo, para que a escória seja utilizada como um produto agrícola, devem ser realizados experimentos que comprovem sua eficiência agrônômica na correção da acidez de

diferentes solos e no fornecimento de nutrientes para diferentes espécies de plantas. E, por isso, o objetivo deste trabalho foi de estudar o potencial de utilização de uma escória metalúrgica, em comparação com um calcário comercial, como corretivo de acidez em dois solos contrastantes brasileiros e como fonte de nutrientes para o cultivo de arroz e soja, em condições de casa de vegetação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Acidez dos solos

A acidez dos solos é um dos principais fatores limitantes da produtividade agrícola, que ocorre em cerca de 30% da área total de terras não cobertas por gelo no mundo (SUMMER; NOBLE, 2003). Essa acidez tem origem natural durante o processo de formação do solo, no entanto, pode ser acelerada por atividades antropogênicas e por processos que ocorrem no solo devido a agricultura intensiva (SUMMER; NOBLE, 2003; FAGERIA; NASCENTE, 2014).

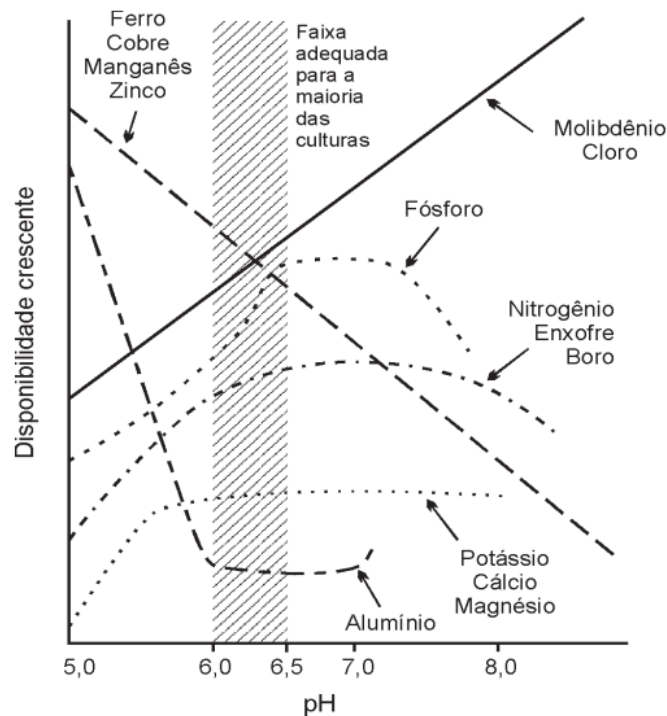
A acidez natural dos solos pode ser devido ao material de origem ser pobre em cátions básicos ou devido ao intenso processo de intemperismo, no qual promove a remoção dos cátions básicos do solo, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ que são substituídos por cátions ácidos, como Al^{3+} e H^+ (FAGERIA; BALIGAR, 2008). Além disso, a deposição ácida, ou chuva ácida (causada pelo acúmulo de gases na atmosfera devido à queima de combustíveis fósseis), também pode ser um agravante na acidez dos solos (ALEWELL, 2003). Ademais, a aplicação de fertilizantes nitrogenados, a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), a fixação de nitrogênio, o balanço entre a absorção de cátions e ânions pelas raízes das plantas, a exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes das plantas, e até mesmo o processo de colheita, são fatores que influenciam na acidez dos solos (SUMMER; NOBLE, 2003; FAGERIA; NASCENTE, 2014; GOULDING, 2016).

No solo, a acidez pode ser representada por diversos componentes, sendo eles: a acidez ativa, que é a quantidade de H^+ presente na solução do solo medida em água ou CaCl_2 ; acidez trocável que refere-se a quantidade de Al^{3+} e H^+ adsorvido pelas cargas negativas do solo; acidez não trocável que refere-se a quantidade de hidrogênio ligado por ligações covalentes aos grupos funcionais dos coloides orgânicos (MO) e inorgânicos (argilas e óxidos); e acidez potencial que se refere ao somatório do $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ presente no solo (LOPES, 1998).

A acidez do solo implica diretamente na produtividade e no crescimento saudável das plantas, uma vez que influencia nas reações químicas e biológicas que controlam a disponibilidade, concentração e forma iônica dos nutrientes no solo e conseqüente absorção pelas plantas, além de influenciar a solubilidade de outros elementos considerados tóxicos pelas culturas (FAGERIA; BALIGAR; JONES, 1997; PAGANI; MALLARINO, 2012;

GOULDING, 2016). De forma prática, o pH ideal para a maioria das culturas, está entre 6 e 6,5. Essa faixa leva em consideração o equilíbrio da disponibilidade de todos os nutrientes (FIGURA 1) (LOPES, 1998).

Figura 1 – Relação entre o pH e a disponibilidade de nutrientes e Al no solo



Fonte: Lopes (1998)

Ademais, a acidez do solo aumenta a solubilidade do Al, que é a principal fonte de toxicidade para plantas em pH abaixo de 5,5. Em pHs abaixo de 4,5 o Al^{3+} é a forma trocável de alumínio e, à medida que o pH se eleva são formados hidróxidos de alumínio (FAGERIA; BALIGAR, 2008). O Al no solo está geralmente associado às estruturas cristalinas dos minerais de silicato de alumínio, como feldspato e mica, ou em seu estado solúvel em água, ou pode estar associado a compostos orgânicos, sendo as mudanças ambientais do solo, principalmente o pH, determinantes para a sua solubilidade (LIU, 2015).

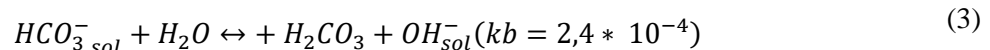
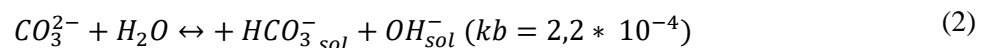
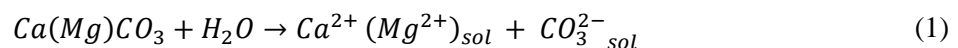
A inibição do crescimento das raízes das plantas é o principal sintoma de toxidez por Al, no qual é causado pela danificação do ápice da raiz, que leva ao declínio da qualidade do grão e, em última análise, afeta a produtividade da cultura (FOY, 1974; RASHEED, 2020). Outros sintomas também podem ser utilizados como indicadores de toxidez por Al, como por exemplo, a acumulação de tecido caloso, redução da biomassa e possíveis alterações da

fotosíntese (SILVA, 2012). Além disso, o alumínio também interfere na absorção, transporte e utilização de nutrientes e inibe a atividade enzimática e o equilíbrio hormonal (ZHAO, 2020).

2.2 Manejo da acidez dos solos

Devido aos efeitos negativos provocados pela acidez dos solos, são necessárias práticas de manejo para a correção da acidez e da fertilidade do solo a fim de atingir uma boa produtividade agrícola. E, neste caso, a calagem é a principal prática para a correção da acidez dos solos, na qual consiste na aplicação de corretivos de acidez para elevar o pH e a saturação por bases (V%) do solo, aumentar as concentrações de Ca e Mg e conseqüentemente reduzir a concentração de alumínio (FAGERIA; NASCENTE, 2014; GURMESSA, 2020). A calagem deve ser a primeira prática a ser realizada no solo para criar condições favoráveis para o crescimento produtivo das culturas, uma vez que o pH têm influência direta na disponibilidade dos nutrientes e a eficiência das adubações dependerá deste atributo do solo (STANOJKOVIC-SEBIC, 2017).

Os materiais geralmente utilizados na calagem são o calcário, cal virgem e cal hidratada (GOULDING, 2016). No Brasil e no mundo, o material mais utilizado na prática da calagem é o calcário (CASTRO, 2016; DAS, 2020b), que deve ser incorporado ao solo e com água disponível para sua completa reação (1, 2, 3 e 4) (ALCARDE; RODELLA, 2003). O calcário é uma rocha sedimentar, pertencente ao grupo dos carbonatos, sendo sua principal constituição o grupo CO_3^{2-} que se combina com os cátions divalentes, Ca^{2+} e Mg^{2+} (MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009).



O Ca e o Mg são nutrientes de plantas e são lixiviados do solo com a ação do intemperismo. Sendo assim, a prática da calagem é viável não só para a correção da acidez como também para o fornecimento de Ca e Mg para as plantas. E para a realização desta prática de manejo é necessário estimar a quantidade de calcário que deverá ser aplicada no

solo, e essa quantidade é conhecida como necessidade de calagem (NC), que pode ser estimada por métodos diretos ou indiretos.

O método direto para estimar a NC consiste na realização de curvas de incubação/calibração específicas para cada solo ou cultura desejada, a fim de alcançar uma saturação por bases ou pH específicos, e é a forma mais eficiente de determinar a quantidade de corretivo de acidez que deve ser aplicada (FAGERIA; BALIGAR, 2008). No entanto, devido a este método ser trabalhoso e mais demorado, os métodos indiretos são mais utilizados em laboratórios de análises de solo. Os métodos indiretos podem utilizar os parâmetros saturação por bases (V%), Al trocável, Ca e Mg, e saturação por Al, obtidos pela análise química do solo, e também as características da cultura a ser implantada, para calcular a NC, considerando a camada referencial de 0 a 20 cm de espessura (STANOJKOVIC-SEBIC, 2017; GURMESSA, 2020).

A eficiência de um produto na correção da acidez do solo depende de suas características químicas e físicas. Dentre as características químicas, o poder de neutralização (PN) é dado pela quantidade de ácido que o mesmo pode neutralizar, e é determinado pela comparação com o poder de neutralização do carbonato de cálcio puro (CaCO_3), considerado como 100%. O cálculo do PN é realizado conforme a equação 5 abaixo. Já, a característica física é representada pela reatividade (RE), a qual refere-se ao tamanho das partículas do produto que influenciam diretamente na velocidade de reação no solo. As partículas grosseiras do corretivo reagem de forma mais lenta, enquanto que as partículas mais finas reagem de forma mais rápida e muito mais completamente. O cálculo da RE pode ser realizado pela equação 6 abaixo. E, o poder relativo de neutralização total (PRNT), que é um parâmetro que leva em consideração o PN e a RE, pode ser calculado conforme equação 7 (RAIJ, 1997; LOPES, 1998; MAPA, 2006b).

$$PN = E_{\text{CaCO}_3} = (\%CaO * 1,79) + (\%MgO * 2,48) \quad (5)$$

$$ER (\%) = (A * 0,2) + (B * 0,6) + (C * 1,0) \quad (6)$$

Sendo que:

A = percentual de partículas de 0,84 a 2 mm;

B = percentual de partículas de 0,3 a 0,84 mm;

C = percentual de partículas menores que 0,3 mm.

$$PRNT (\%) = \frac{(PN * RE)}{100} \quad (7)$$

De acordo com a legislação brasileira (MAPA, 2006a, 2006b) os corretivos de acidez de solos devem ser de natureza física sólida, apresentando-se em pó, apresentando partículas que passem 100% na peneira de 2mm, 70% na peneira de 0,84mm e 50 % na peneira de 0,3mm. Além disso, os corretivos devem apresentar um PN maior que 67, soma das porcentagens de óxidos de cálcio e magnésio maior que 38, PRNT maior que 45 e teores de Cd e Pb menores que 20 e 1000 mg kg⁻¹ respectivamente.

Além da utilização do calcário, encontra-se na literatura vários exemplos de aplicação de subprodutos industriais com a finalidade de corrigir a acidez dos solos: escória básica, cal de fábrica de açúcar, cinza de madeira, produtos de combustão de carvão, como cinza volante e cinza inferior, humatos de cálcio e fulvatos de carvão marrom oxidado e subprodutos do papel e indústria de celulose (GOULDING, 2016; PAN, 2019). Dentre eles, destacam-se as escórias siderúrgicas, uma vez que possuem composições semelhantes aos carbonatos e podem ser uma fonte econômica na substituição do calcário (DAS, 2020b). A aplicação das escórias é recomendada com base nos mesmos métodos usados para requisitos do calcário (CASTRO, 2016).

2.3 Metalurgia, siderurgia e seus subprodutos

A metalurgia é a ciência que estuda os processos de extração, fabricação, fundição e tratamento dos metais e suas ligas. Durante todos estes processos, há uma grande geração de resíduos e subprodutos e, por isso, extensos depósitos desses resíduos estão presentes em locais de fundição antigos e modernos (SHEN; FORSSBERG, 2003; PIATAK, 2015), os quais devem ser devidamente tratados e dispostos de forma ambientalmente correta, como previsto na Lei N° 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil (BRASIL, 2010).

A siderurgia é um dos ramos da metalurgia, a qual se dedica à fabricação e ao tratamento do aço, que é uma variante do ferro com baixa concentração de carbono. A fabricação do aço é realizada em alto-forno, ao qual adiciona-se o minério de ferro, que pode ser magnetita, hematita, goetita, siderita e pirita (entre estes, os três primeiros são de grande

importância devido à sua ocorrência em grandes quantidades economicamente exploráveis), o carvão mineral ou vegetal e calcário (YELLISHETTY, 2010).

De acordo com Instituto Aço Brasil (IABr) (2021), o Brasil ocupa a 9ª posição mundial em produção de aço, sendo que no ano de 2020, a produção de aço bruto foi de 31,4 milhões de toneladas. Ainda de acordo com o IABr (2018), para cada tonelada de aço produzida são gerados cerca de 607 kg de resíduos, dos quais 27% tratam-se de escória. Com isso, estima-se que em 2020, a produção de escória siderúrgica no Brasil foi cerca de 5,15 milhões de toneladas, que se não gerenciadas de forma correta pode trazer problemas ao meio ambiente.

Os subprodutos geralmente formados durante os processos metalúrgicos e siderúrgicos (devido à adição de materiais como o calcário, dolomita e areia de sílica) são as escórias, poeiras e lamas (BRANCA, 2020). As escórias são os produtos gerados em maior quantidade e geralmente são compostas por sílica, óxido de cálcio, óxido de magnésio, óxidos de alumínio e ferro (FISHER; BARRON, 2019; BRANCA, 2020). A escória pode ser deixada para esfriar em condições atmosféricas (resfriada ao ar) ou em taxas aceleradas com ar ou água para transmitir certas qualidades, como alta porosidade ou textura vítrea (PIATAK, 2019).

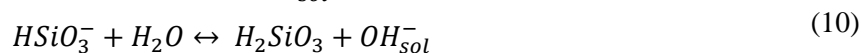
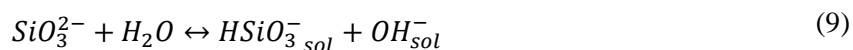
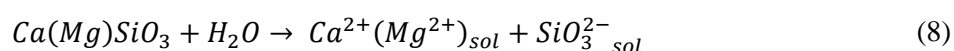
Mesmo após passar pelo alto forno, o aço pode apresentar excesso de oxigênio, e, por isso, com a intenção de desoxidar ou melhorar suas características, como por exemplo, de maleabilidade e de dureza, podem ser adicionadas ao aço ligas de ferrocromo, manganês, silício, alumínio, vanádio, boro e titânio (FISHER; BARRON, 2019).

2.4 Escórias metalúrgicas e siderúrgicas

A fim de garantir a sustentabilidade das indústrias metalúrgicas e siderúrgicas, muitos estudos foram realizados com o intuito de reciclar os subprodutos gerados nestas atividades (STANOJKOVIC-SEBIC, 2017; DAS, 2020b). Dentre estes estudos estão: aplicações na construção civil, como material para sequestro de carbono, como material de estabilização mecânica de solos, em aplicações marinhas na restauração de recifes de corais, como fertilizantes e corretivos de acidez, e também como sorvente para remover nutrientes e oligoelementos de soluções e águas residuárias (PIATAK, 2019; FISHER; BARRON, 2019; DAS, 2020b; WANG, 2021).

Um dos grandes desafios da atualidade é o crescente aumento da população mundial, vinculado ao aumento na demanda por alimentos e na produção de resíduos. Por isso, as indústrias agrícolas possuem o desafio de unir o aumento da produtividade agrícola aliado à utilização sustentável dos recursos naturais (ZHAO, 2020), o que está em sintonia com os conceitos de economia circular. Sendo assim, as escórias siderúrgicas surgem como uma fonte sustentável na correção de acidez dos solos, visto que são resíduos gerados em alta escala nas indústrias e, além de terem a capacidade de corrigir a acidez do solo, devido a presença de óxidos de Ca, Mg e Si, também são fontes de macro e micronutrientes às plantas, contribuindo para a produtividade das lavouras (PIATAK, 2015; DAS, 2020b). Além disso, os depósitos de estoque de escórias nas indústrias ocupam grandes extensões de terras e podem ser prejudiciais ao meio ambiente (ZHAO, 2020).

As reações genéricas das escórias (as quais são ricas em silicatos) no solo são semelhantes à do calcário e podem ser observadas abaixo (8, 9 e 10) (ALCARDE; RODELLA, 2003).



Nas últimas décadas, estudos sobre o uso de escórias siderúrgicas como corretivo de acidez dos solos têm se intensificado e se consolidado (BRANCA et al., 2020). Deus et al. (2020) demonstraram que a aplicação de diferentes tipos de escória no solo em sistema de plantio direto foi eficiente na neutralização de acidez do solo e no fornecimento de nutrientes às plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Nunes et al. (2019) em um estudo avaliando o efeito de escória siderúrgica e de fungos micorrízicos associados à adubação fosfatada em plantas de milho.

Ning et al. (2016) demonstrou em um estudo aplicando escória siderúrgica como corretivo de acidez do solo e no crescimento de arroz, que além de melhorar as características químicas do solo, a aplicação da escória aumentou a concentração de Si na palha do arroz e reduziu o acúmulo de Cd em seus grãos. Sobre imobilização de metais pesados em solos, como As, Cr, Cu, Pb, Cd e Zn, Branca e Colla (2012) relatam que a disponibilidade de metais pesados pode ser atenuada com a utilização de escórias, uma aplicação ambiental que também está relacionada a sustentabilidade dos solos agrícolas.

3 JUSTIFICATIVA

Com vista no que foi relatado e, no sentido de contribuir com o conceito de economia circular e sustentabilidade, estudos avaliando a eficiência agronômica de escórias metalúrgicas como corretivo de acidez dos solos e como fonte de nutrientes às plantas são necessários, levando-se em consideração a quantidade significativa de escórias geradas nas indústrias. Além disso, as empresas geradoras de escória devem se adequar à legislação ambiental, realizando um plano de gerenciamento da mesma, no sentido de encontrar um tratamento ou destino ambientalmente correto para o subproduto, sendo que sua aplicação em solos como corretivo de acidez pode ser uma possível alternativa.

4 HIPÓTESES

A aplicação de escória metalúrgica como corretivo de acidez em solos de diferentes texturas é eficiente na neutralização da acidez de solos, além de fornecer Ca e Mg às plantas, propiciando um ambiente favorável ao desenvolvimento das culturas agrícolas de forma similar ao uso de um calcário comercial. O uso de escória na agricultura brasileira pode ser um destino ambientalmente correto para esse subproduto, obtendo-se dessa forma um duplo efeito benéfico, pois, além de contribuir no setor agrícola, poderá auxiliar na redução de grandes volumes de material que são gerados anualmente.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo Geral

Estudar o potencial de utilização de uma escória metalúrgica, em comparação com um calcário comercial, como corretivo de acidez em solos para o cultivo de arroz e soja, em condições de casa de vegetação.

5.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar os efeitos da escória no pH e nas concentrações de nutrientes e Al nos solos;

- b) Avaliar os efeitos da escória, comparativamente ao calcário comercial, na nutrição e desenvolvimento das culturas estudadas (arroz e soja).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Obtenção e caracterização da escória

Amostras da escória de metalurgia foram enviadas para o Departamento de Ciência do Solo, Escola de Ciências Agrárias (ESAL) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) para a realização da caracterização e do experimento em casa de vegetação. Considerando que a escória apresentava granulometria grosseira, acima do permitido para corretivos de acidez do solo (MAPA, 2006b), essa foi previamente moída antes de seu uso no presente estudo.

Foram realizadas as análises para as caracterizações físicas e químicas da escória (USEPA 3050B, 1996; USEPA 3060A, 1996; BRASIL, 2017) a fim de verificar se a escória se enquadra nos limites exigidos pela legislação vigente de corretivos de acidez dos solos no Brasil (MAPA, 2006a, 2006b). Os resultados obtidos para cada parâmetro estão descritos na Tabela 1.

Para a caracterização física, a análise foi realizada utilizando-se de um conjunto de três peneiras encaixadas umas sobre as outras, com a de maior abertura em cima (2mm), seguida da de abertura média (0,84mm), seguida da de menor abertura por baixo (0,3mm) e com o recipiente de fundo por último. Adicionou-se uma amostra homogênea de 100g da escória no conjunto de peneiras que foi agitado durante 10 minutos. Ao final, foram pesadas as quantidades do produto retido em cada peneira e realizado o cálculo percentual para a obtenção da reatividade da escória. Para a análise de umidade, pesou-se uma determinada quantidade de escória que foi seca em estufa a uma temperatura média de 105° C até a obtenção do peso constante. A umidade foi calculada pelos dados das massas antes e após a secagem em estufa (BRASIL, 2017).

Para a caracterização química, foi realizada as análises do poder de neutralização (PN) pelo método de titulação ácido-base, dos teores de óxidos de Ca e Mg pelo método complexométrico do EDTA (BRASIL, 2017). Com os dados do PN e da RE, calculou-se o PRNT da escória. E, para as análises de Cd e Pb, seguiu-se os métodos da USEPA 3050B e 3060A (USEPA 3050B, 1996; USEPA 3060A, 1996).

A escória apresentou PN igual a 70,83%, PRNT igual a 58,6%, soma da porcentagem de óxidos de Ca e Mg igual a 38,92%, obteve teores de Cd e Pb abaixo de 0,20 mg kg⁻¹, passou 100% na peneira de 2mm, 99,54% na peneira de 0,84mm e 57,29% na peneira de 0,3mm, estando dentro de todos os limites químicos e físicos exigidos pelas legislações de corretivos de acidez do solo do Brasil (MAPA, 2006a, 2006b) (TABELA 1). Por ser um produto comercial, o calcário utilizado neste trabalho já possui todas as características físico-químicas dentro do limite exigido na legislação (TABELA 1).

Tabela 1 – Parâmetros físicos e químicos da escória e do calcário

Especificação	Escória	Calcário
Umidade (%)	1,03	<1,00
Soma das Bases (CaO + MgO) (%)	38,92	55,51
Óxido de Cálcio (%)	29,14	32,93
Óxido de Magnésio (%)	9,78	22,58
PRNT (% CaCO ₃ eq)	58,6	77,4
PN (% CaCO ₃ eq)	70,83	109,84
Cádmio total (mg kg ⁻¹)	<0,20	-
Chumbo total (mg kg ⁻¹)	<0,20	-
Passante na peneira de 2 mm (%)	100	98,43
Passante na peneira de 0,84 mm (%)	99,54	78,87
Passante na peneira de 0,3 mm (%)	57,29	48,09

6.2 Experimento em casa de vegetação

O experimento foi implantado em condições de casa de vegetação localizada no Departamento de Ciência do Solo, Escola de Ciências Agrárias (ESAL) da Universidade Federal de Lavras em Lavras – MG.

Foram coletados dois solos, na camada de 0 a 20 cm, com diferentes características físico-químicas no município de Paracatu – MG (TABELA 2). Os solos foram secos e passados em peneiras de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) na qual foram realizadas as análises de caracterizações físicas e químicas (TEIXEIRA, 2017) (TABELA 2). Em seguida, foram colocados 4,8 dm³ dos solos em potes plásticos de 5L.

Com base nos resultados das análises dos solos e nas características físico-químicas da escória e do calcário, com ênfase no PRNT de cada um, calculou-se a necessidade de calagem (NC) para elevar a saturação por bases nos dois solos para 50 e 100% conforme o método da saturação por bases (RAIJ, 1997) (11).

$$NC \left(\frac{t}{ha} \right) = \frac{[T * (V2 - V1)]}{100} \quad (11)$$

Onde,

T = valor de CTC potencial ou CTC a pH 7,0 da análise do solo;

V1 = porcentagem de saturação por bases do solo;

V2 = porcentagem de saturação por bases desejada.

Esta fórmula é utilizada quando o PRNT do corretivo é igual a 100, em caso contrário, a NC deverá ser calculada substituindo o denominador da equação pelo PRNT do corretivo a ser utilizado. A saturação por bases de 50% é ainda considerada em alguns boletins de recomendação para culturas anuais, além de ser razoável para pastagens, por exemplo, e o valor de 100% foi proposto a fim de se avaliar os parâmetros em condições de aplicações de altas doses, como em áreas de abertura. Os valores das NCs calculados para cada corretivo, em cada dose e em cada solo estão descritos na Tabela 3.

Após a aplicação dos dois produtos, todos os tratamentos, incluindo a testemunha (T) sem a aplicação da escória ou do calcário, foram incubados por 30 dias, sendo a umidade mantida próxima a 60% da capacidade de campo. Após o período de incubação, foram cultivados dois tipos de culturas, sendo uma da família Poaceae (arroz) e outra da família Fabaceae (soja), a fim de avaliar, em condições de casa de vegetação, a eficiência agrônômica da escória na correção da acidez e no fornecimento de nutrientes às plantas. Foi realizado a adubação de plantio com 200 mg dm⁻³ de P, e a adubação de cobertura, sendo que para N e K foi aplicado as doses de 300 e 150 mg dm⁻³ respectivamente, fracionadas em três vezes, e para S, B, Cu, Mo e Zn as doses foram de 50; 0,5; 1,5; 0,1; e 5 mg dm⁻³ respectivamente (MALAVOLTA, 1981).

Considerando que cada cultura foi tratada como um experimento e que, dentro de cada experimento, os solos foram avaliados separadamente, o delineamento experimental em cada situação foi o de blocos inteiramente casualizados, constando de 2 produtos x 2 doses + 1 testemunha para cada solo, totalizando 40 vasos por cultura (4 repetições de cada tratamento) (FIGURA 2).

Para o arroz, foram semeadas 10 sementes e após emergência foram deixadas 3 plantas por vaso (FIGURA 3a). A cultivar utilizada foi a BRSMG Caçula da Epamig, considerada

super precoce. Para a soja, foram semeadas 5 sementes e após a emergência foram deixadas 2 plantas por vaso (FIGURA 3b). As sementes de soja utilizadas foram da cultivar Monsoy M5917IPRO® com grau de maturidade relativa de 5.9 e de crescimento indeterminado.

Tabela 2 – Atributos físicos e químicos dos solos

Atributos	Solo de textura média	Solo de textura argilosa
pH H ₂ O	4,67 ± 0,33	5,13 ± 0,20
pH CaCl ₂	3,90 ± 0,30	4,30 ± 0,20
MOS (dagdm ⁻³)	1,70 ± 0,40	3,57 ± 0,23
P (mg dm ⁻³)	2,40 ± 0,20	1,63 ± 0,27
K (mg dm ⁻³)	27,31 ± 3,72	48,47 ± 3,70
Ca (cmolcdm ⁻³)	0,42 ± 0,08	0,10 ± 0,10
Mg (cmolcdm ⁻³)	0,29 ± 0,04	0,10 ± 0,10
Al (cmolcdm ⁻³)	0,54 ± 0,00	0,20 ± 0,20
H+Al (cmolcdm ⁻³)	3,46 ± 0,20	6,23 ± 0,70
CTC _{pH7,0} (cmolcdm ⁻³)	4,30 ± 0,20	6,36 ± 0,30
V (%)	19,00 ± 2,00	2,00 ± 0,00
Areia (%)	84,70 ± 1,20	4,93 ± 1,0
Silte (%)	2,97 ± 0,90	34,73 ± 0,5
Argila (%)	12,33 ± 1,30	60,00 ± 2,0

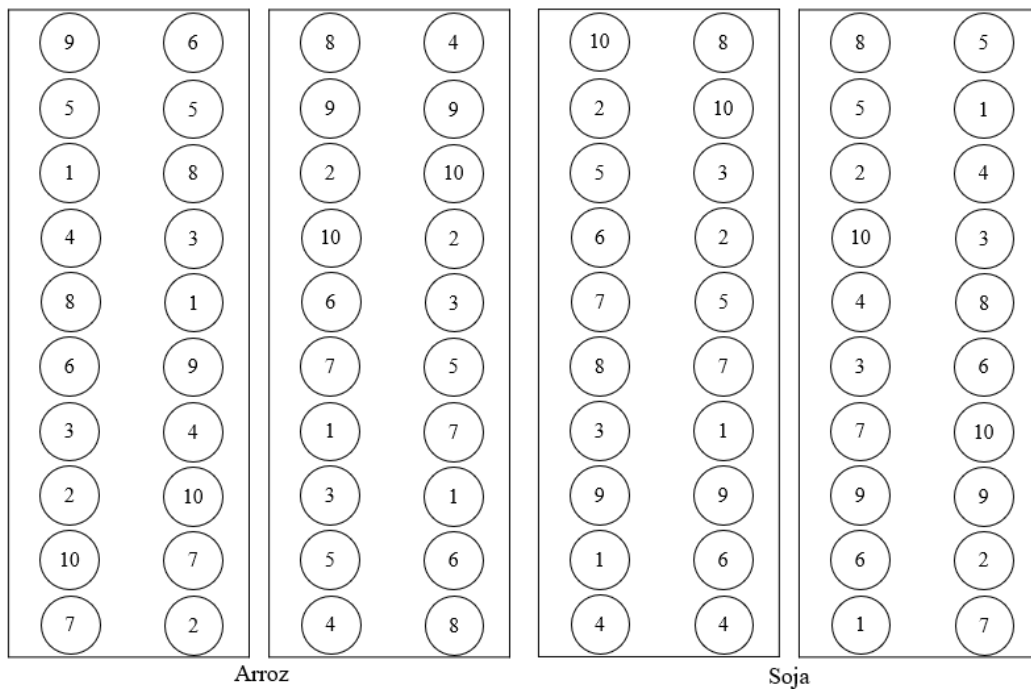
MOS: Matéria Orgânica do Solo; CTC_{pH7,0}: Capacidade de Troca Catiônica no pH = 7; V: saturação de bases do solo.

Tabela 3 – Quantidades da escória e do calcário em t ha⁻¹, para a aplicação em duas doses, em cada solo estudado

	Necessidade de calagem (t ha ⁻¹)*			
	Escória		Calcário	
	Saturação por bases desejada (V%)			
	50	100	50	100
Solo de textura média	2,27	5,94	1,72	4,50
Solo argiloso	5,21	10,64	3,94	8,05

*Necessidade de calagem calculada em função da CTC de cada solo, da saturação por bases de cada solo, das saturações por bases desejada (50 e 100) e do PRNT de cada produto.

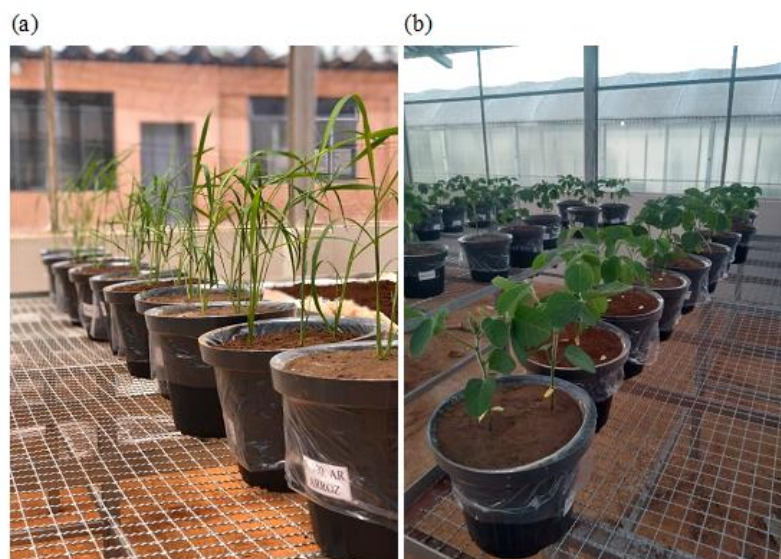
Figura 2 – Esquema dos blocos dos experimentos de arroz e soja



Descrições:

Nº	Tratamento	Nº	Tratamento
1	Testemunha, solo de textura média	6	C V% = 100, solo argiloso
2	Testemunha, solo argiloso	7	E V% = 50, solo de textura média
3	C V% = 50, solo de textura média	8	E V% = 100, solo de textura média
4	C V% = 100, solo de textura média	9	E V% = 50, solo argiloso
5	C V% = 50, solo argiloso	10	E V% = 100, solo argiloso

Figura 3 – Culturas do arroz e da soja em vasos na casa de vegetação



FONTE: Do autor (2020)

6.3 Amostragem, preparação das amostras e análises químicas

6.3.1 Amostragem e preparação das amostras

Em época adequada seguindo as recomendações, foram coletadas amostras para diagnose foliar de cada cultura para a análise dos teores dos nutrientes (RIBEIRO, 1999; FAQUIN, 2002). Para o arroz, foi coletada a folha Y (posição ocupada em relação à folha mais nova desenrolada acima) 30 dias após a maturação. E para a soja, foi coletada a primeira folha amadurecida a partir da ponta do ramo com pecíolo durante o florescimento. As amostras foram devidamente identificadas, secas e armazenadas em sacos de papel para a realização das análises.

Após a maturação fisiológica do arroz e da soja, foi realizada a colheita e separação dos grãos, parte aérea e raiz das plantas. Todos os materiais vegetais foram secos em estufa com temperatura média de 60° C até a obtenção da massa constante para depois serem pesados em balança de precisão. Em seguida, o material foi moído em moinhos de faca ou de martelo e, em seguida, armazenado para posteriores análises de nutrientes. Além disso, também foram coletadas amostras dos solos após o cultivo das plantas para a realização das análises de fertilidade do solo (CARMO, 2000; BRASIL, 2017).

6.3.2 Análises dos materiais vegetais e dos solos

Primeiramente, foi realizada a digestão das amostras secas e moídas, seguindo a metodologia para cada elemento (CARMO, 2000). Para os nutrientes P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn foi realizada a digestão por via úmida utilizando-se de solução nítrico perclórica, para o N utilizou-se o método KJELDAHL. Em seguida, os extratos foram encaminhados para a determinação analítica. Para o N, a determinação foi realizada por meio da titulação; para o P por espectrometria com amarelo de vanadato, o K foi determinado por espectrometria de chama; S por turbidimetria; e o Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por espectrometria de absorção atômica (CARMO, 2000).

As análises de fertilidade do solo foram realizadas de acordo com Teixeira (2017) e a determinação foi realizada da mesma forma que nos tecidos vegetais. Determinou-se: o pH dos solos em água e CaCl₂; os teores de Ca, Mg, P, K, S, B, Zn, Fe, Mn, Cu, Al, Acidez Potencial, MOS e C_{OrgTotal}. Em seguida, estimou-se a CTC potencial (T) (equação 12), o

percentual de saturação por bases (V%) (equação 13) e a porcentagem de saturação por Al^{3+} (m%) (equação 14) (LOPES, 1998):

$$T = CTC = SB + (H^+ + Al^{3+}) = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + (Na^+) + H^+ + Al^{3+} \quad (12)$$

$$V\% = \frac{100 * SB}{T} \quad (13)$$

$$m\% = \frac{100 * Al^{3+}}{(SB + Al^{3+})} = \frac{100 * Al^{3+}}{t} \quad (14)$$

Onde:

T = CTC potencial

SB = soma de bases trocáveis = $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + (Na^+)$

V% = percentual de saturação por bases

m% = porcentagem de saturação por Al^{3+}

t = CTC efetiva = $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + (Na^+) + Al^{3+}$

6.4 Análises estatísticas

Testes de normalidade foram aplicados aos dados para verificar se houve uma distribuição normal. Então, foram realizadas as análises estatísticas por um teste de variância (ANOVA) com um nível de probabilidade de significância de 0,05 para avaliar se houve diferenças entre os tratamentos (FERREIRA, 2011). Quando houve diferenças entre os tratamentos, estes foram comparados por meio de teste de médias, a 5% de probabilidade.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Caracterização da escória

A escória apresentou todos os parâmetros físicos e químicos dentro dos limites exigidos para corretivos de acidez de solos determinado pela legislação brasileira (MAPA, 2006a, 2006b) (TABELA 1). Ressalta-se, no caso da granulometria, que a escória testada é originalmente gerada em frações grosseiras e que a amostra usada neste estudo sofreu britagem e moagem prévia visando reduzir sua granulometria de forma a se adequar aos mínimos exigidos para corretivos de acidez (MAPA, 2006a, 2006b).

7.2 Experimento em casa de vegetação

7.2.1 Efeitos no crescimento e no estado nutricional das plantas

7.2.1.1 Matéria seca das plantas

Os valores encontrados para as massas secas da parte aérea e dos grãos do arroz e da soja estão apresentados na Tabela 4. No geral, tanto para o arroz quanto para a soja, os tratamentos que receberam a escória se comportaram de forma semelhante àqueles que receberam o calcário, quando se compara os tratamentos que receberam a mesma dose. Para o arroz, as massas secas da parte aérea não apresentaram resultados estatisticamente diferentes entre os tratamentos e as testemunhas para ambos os solos. Em relação à massa seca de grãos, não houve diferença estatística entre os tratamentos e a testemunha para o solo de textura média. Enquanto que para o solo argiloso a testemunha apresentou o menor valor se diferenciando dos demais tratamentos, seguido do tratamento E100. Para a soja, observou-se que as massas secas de parte aérea das testemunhas foram estatisticamente diferentes dos demais tratamentos, mas não se observou diferença estatística entre os tratamentos que receberam a escória ou o calcário em ambos os solos. Em relação à massa seca de grãos, as testemunhas também se diferiram dos demais tratamentos em ambos os solos, com exceção do tratamento E100 no solo de textura média. Tais resultados indicam que a aplicação da escória como corretivo de acidez do solo possui eficiência semelhante ao do calcário no crescimento de plantas de arroz e soja. Resultados semelhantes foram encontrados por Pan et

al. (2019) que relataram que a aplicação de escória sozinha ou combinada com adubos orgânicos aumentou o rendimento de sementes de canola e batata-doce. Shi et al. (2017) também demonstraram que a aplicação de escória alcalina obteve efeitos positivos no crescimento de trigo em experimentos de vaso.

Tabela 4 – Massa seca de parte aérea e de grãos de arroz e soja cultivados nos dois solos, com a aplicação de duas doses da escória e do calcário, como corretivos de acidez do solo

Tratamento*	Massa seca de parte aérea (g)	Massa seca de grãos (g)	Solo de textura média	
			Arroz	Soja
T	50,02 a	42,17 a	33,68 b	20,97 b
C 50	44,43 a	42,03 a	37,78 ab	22,97 ab
E 50	41,72 a	45,76 a	38,97 ab	23,80 ab
C 100	48,43 a	38,97 a	40,08 ab	26,31 a
E 100	39,73 a	40,83 a	42,67 a	21,73 b
CV (%)	11,64	16,01	7,76	8,83
Solo argiloso				
T	42,11 a	36,78 c	26,05 b	15,08 b
C 50	44,97 a	48,03 a	39,05 a	25,11 a
E 50	44,59 a	44,61 ab	40,83 a	26,00 a
C 100	44,49 a	44,84 ab	43,22 a	27,24 a
E 100	43,33 a	39,78 bc	42,64 a	26,62 a
CV (%)	5,92	8,18	10,61	9,38

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

7.2.1.2 Teores de nutrientes na parte aérea e raiz das plantas de arroz e soja

Não foi observado deficiência nutricional nas plantas de arroz e soja cultivada em ambos os solos. Além disso, os teores de nutrientes encontrados nas folhas das plantas de arroz e soja, coletadas em época adequada para a diagnose foliar, no geral, não apresentaram diferenças entre os tratamentos (TABELAS 5 e 6), demonstrando que a escória possui eficiência semelhante ao calcário no fornecimento de Ca e Mg para as plantas de arroz e soja cultivadas em solos de diferentes classes texturais.

Tabela 5 – Teores de nutrientes nas folhas das plantas de arroz cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo

Tratamento*	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu	
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
Folha diagnóstico do arroz										
Solo de textura média										
T	3,04 a	13,97 a	4,00 b	1,76 b	4,72 a	27,82 a	355,66 a	182,79 a	7,78 a	
C 50	3,30 a	13,16 ab	4,70 b	2,92 ab	4,79 a	23,38 ab	149,66 a	176,60 ab	7,94 a	
E 50	2,98 a	13,37 ab	5,66 ab	2,80 ab	4,47 ab	21,79 b	122,81 a	178,34 ab	7,37 a	
C 100	3,15 a	12,70 ab	5,05 b	3,08 ab	4,06 ab	21,48 bc	146,05 a	104,06 bc	7,53 a	
E 100	2,84 a	11,64 b	7,81 a	3,71 a	3,50 b	16,35 c	98,90 a	72,38 c	8,08 a	
CV (%)	11,09	6,35	20,62	22,87	12,62	11,07	75,05	25,01	10,93	
Solo argiloso										
T	2,23 a	15,87 a	4,81 a	0,87 d	4,00 a	19,16 a	205,15 a	275,49 a	13,58 a	
C 50	2,34 a	11,55 a	6,11 a	4,32 b	3,90 a	18,07 a	143,92 b	121,70 b	10,28 ab	
E 50	2,24 a	12,61 a	6,18 a	2,82 bc	3,29 a	17,20 a	123,14 bc	115,38 b	9,62 b	
C 100	2,31 a	10,15 a	6,99 a	6,14 a	3,76 a	17,02 a	134,12 bc	118,17 b	10,47 ab	
E 100	1,92 a	9,76 a	4,92 a	2,46 cd	3,45 a	38,79 a	90,32 c	78,97 b	5,54 c	
CV (%)	33,02	32,29	20,84	24,69	35,69	114,39	17,44	30,18	17,72	

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

Tabela 6 – Teores de nutrientes nas folhas das plantas de soja cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo

Tratamento*	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			
Folha diagnóstico da soja										
Solo de textura média										
T	53,85 a	3,66 b	18,47 a	5,57 b	3,15 b	4,83 a	112,17 a	91,19 a	120,09 a	4,00 a
C 50	55,14 a	4,15 ab	18,91 a	5,89 b	3,73 ab	4,50 a	99,48 a	103,06 a	85,43 b	7,00 a
E 50	54,17 a	4,41 ab	19,88 a	7,66 a	3,79 a	4,07 ab	106,77 a	95,25 a	79,73 b	4,25 a
C 100	51,75 a	4,08 ab	19,68 a	6,79 ab	4,19 a	3,62 bc	77,04 b	98,35 a	57,80 c	3,25 a
E 100	54,33 a	4,76 a	19,62 a	7,38 a	3,88 a	3,25 c	58,09 b	179,72 a	48,47 c	3,50 a
CV (%)	6,07	8,14	6,56	9,68	7,77	9,23	9,92	68,46	12,51	49,27
Solo argiloso										
T	41,23 a	2,25 a	20,51 a	5,53 b	1,38 c	2,36 a	71,96 a	91,24 a	305,51 a	4,43 a
C 50	55,14 a	1,92 a	17,18 a	5,90 b	3,68 b	2,27 a	29,99 b	83,27 a	49,48 b	3,75 a
E 50	55,79 a	2,34 a	20,13 a	8,21 a	3,81 b	2,73 a	40,39 b	99,45 a	64,24 b	2,75 a
C 100	52,39 a	2,23 a	20,05 a	7,99 a	5,02 a	2,61 a	33,13 b	137,93 a	52,61 b	2,50 a
E 100	55,46 a	2,13 a	19,97 a	8,91 a	3,86 b	2,37 a	27,07 b	434,96 a	53,59 b	2,75 a
CV (%)	24,1	13,62	11,97	10,14	10,19	13,14	24,32	182,53	10	52,6

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

Os teores de nutrientes encontrados na parte aérea e raiz das plantas de arroz ao final do cultivo estão apresentados na Tabela 7 e da soja na Tabela 8. No geral, os teores dos nutrientes na parte aérea e raiz do arroz e da soja não se diferenciaram entre os tratamentos, com exceção do Ca e do Mg. Além disso, as plantas não apresentaram deficiência aparente de nenhum nutriente, indicando que o comportamento das plantas que receberam a escória como corretivo de acidez dos solos foi semelhante ao das plantas que receberam o calcário.

Os teores de Ca na parte aérea do arroz cultivado no solo argiloso se diferenciaram entre os tratamentos, no qual os tratamentos com a escória apresentaram valores maiores que os tratamentos com o calcário quando se comparam os tratamentos com a mesma dose. Por outro lado, para o Mg, os tratamentos com calcário apresentaram maiores teores em relação aos tratamentos com a escória. Nas raízes, tanto para o Ca quanto para o Mg, os teores foram maiores nos tratamentos que receberam a escória em comparação ao calcário, tanto para o solo de textura média quanto para o argiloso.

Para a parte aérea da soja, os teores de Ca encontrados nos tratamentos que receberam a escória foram maiores que àqueles que receberam o calcário, tanto no solo de textura média quanto no argiloso. Já, os teores de Mg apresentaram comportamento contrário, sendo os maiores teores encontrados nos tratamentos que receberam o calcário. E, para a raiz da soja, apenas os teores de Ca apresentaram diferenças entre os tratamentos, sendo que os que receberam a escória se sobressaíram em relação aos que receberam o calcário.

Nas Tabelas 9 e 10 estão apresentados os teores de nutrientes encontrados nos grãos de arroz e de soja. No geral, não se observaram diferenças estatísticas nos teores de nenhum nutriente em nenhuma das culturas.

Tabela 7 – Teores de nutrientes na parte aérea e raízes das plantas de arroz cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo (Continua)

Tratamento*	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			
Parte aérea arroz										
Solo de textura média										
T	8,25 a	1,49 ab	8,81 a	3,84 a	2,08 b	1,90 a	136,30 a	136,39 a	259,83 a	2,00 a
C 50	7,60 a	1,79 ab	10,33 a	3,83 a	3,69 a	2,14 a	138,07 a	113,08 a	146,82 b	3,00 a
E 50	7,60 a	1,57 ab	9,75 a	5,30 a	3,62 a	2,11 a	79,25 ab	102,66 a	130,75 bc	3,75 a
C 100	8,25 a	2,08 a	9,42 a	4,01 a	3,95 a	1,66 a	71,49 ab	125,17 a	74,88 cd	2,50 a
E 100	8,73 a	1,18 b	11,47 a	5,65 a	4,28 a	1,70 a	39,22 b	113,67 a	46,25 d	2,00 a
CV (%)	11,72	21,02	13,67	20,53	15,23	20,64	32,99	20,2	20,65	62,96
Solo argiloso										
T	7,92 a	0,53 a	9,08 a	3,31 c	0,19 d	1,22 b	59,46 a	131,18 a	257,27 a	4,00 a
C 50	9,38	0,36 a	8,06 a	4,08 bc	4,38 bc	1,52 ab	33,32 b	118,10 a	91,79 b	2,25 a
E 50	9,87 a	0,38 a	8,75 a	5,15 b	3,52 c	1,46 ab	24,71 b	146,42 a	110,30 b	2,25 a
C 100	9,54 a	0,48 a	9,66 a	4,54 bc	6,77 a	1,99 a	22,81 b	129,16 a	84,45 b	3,00 a
E 100	12,29 a	0,53 a	10,42 a	6,65 a	5,92 ab	1,76 ab	16,76 b	182,79 a	101,81 b	4,00 a
CV (%)	22,17	27,4	13,23	12,05	21,6	19,63	34,17	26,2	27,92	30,6
Raiz arroz										
Solo de textura média										
T	10,19 a	0,75 a	1,80 a	1,74 b	0,95 c	1,07 b	79,35 a	3168,85 a	37,69 a	7,75 a
C 50	10,19 a	0,87 a	2,31 a	2,54 b	1,55 b	1,32 ab	67,20 ab	3824,54 a	35,16 ab	9,25 a
E 50	11,81 a	0,85 a	2,16 a	2,69 b	1,49 bc	1,20 b	60,19 ab	3210,41 a	31,0775 abc	9,25 a
C 100	13,42 a	1,02 a	2,60 a	2,91 b	2,01 ab	1,32 ab	43,86 ab	2756,23 a	24,54 c	8,25 a
E 100	12,78 a	1,14 a	3,15 a	4,59 a	2,35 a	1,59 a	29,34 b	3233,29 a	26,62 bc	8,00 a
CV (%)	13,09	25,14	29,63	21,48	14,97	11,68	32,59	39,36	14,6	28,66

Tabela 7 – Teores de nutrientes na parte aérea e raízes das plantas de arroz cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo (Conclusão)

Solo argiloso										
T	10,19 a	0,56 b	0,95 b	0,80 c	0,32 d	0,85 c	33,46 a	5070,39 a	50,43 a	7,50 a
C 50	9,70 a	0,63 b	1,52 ab	1,75 bc	1,40 c	0,96 bc	23,14 a	6944,30 a	25,64 a	7,75 a
E 50	11,81 a	0,73 ab	1,80 a	2,55 b	1,46 bc	1,22 b	26,86 a	7160,19 a	27,83 a	8,00 a
C 100	11,81 a	0,61 b	1,21 ab	2,39 b	1,75 ab	1,12 bc	22,22 a	5550,31 a	22,49 a	8,75 a
E 100	11,48 a	0,87 a	1,94 a	3,74 a	1,95a	1,62 a	24,84 a	5467,77 a	27,41 a	8,75 a
CV (%)	17,38	16,66	25,6	22,55	9,74	12,55	24,8	36,15	84	18,27

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 8 – Teores de nutrientes na parte aérea e raízes das plantas de soja cultivadas em dois com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo (Continua)

Tratamento*	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			
	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu
Parte aérea soja										
Solo de textura média										
T	6,63 b	2,07 ab	8,12 a	12,11 b	4,15 d	2,56 a	159,50 a	58,11 a	169,00 a	1,25 a
C 50	6,95 b	2,15 ab	6,73 ab	13,29 b	6,07 bc	2,73 a	112,63 b	71,10 a	114,53 b	1,00 a
E 50	10,19 a	1,89 ab	5,25 b	15,37 ab	5,55 c	1,84 ab	113,19 b	62,21 a	108,26 b	1,25 a
C 100	9,86 a	1,66 b	4,98 b	14,11 b	7,38 a	1,34 b	83,35 b	106,51 a	75,05 b	1,25 a
E 100	6,63 b	2,71 a	6,42 ab	18,76 a	6,69 ab	1,87 ab	79,35 b	66,80 a	77,23 b	1,75 a
CV (%)	16,04	19,93	15,49	11,45	7,16	25,77	19,07	59,74	16,68	34,4

Tabela 8 – Teores de nutrientes na parte aérea e raízes das plantas de soja cultivadas em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo (Conclusão)

Solo argiloso										
T	8,41 ab	0,79 a	12,36 a	10,33 c	0,42 c	1,21 a	85,49 a	150,46 a	223,16 a	2,25 a
C 50	7,92 ab	0,26 b	4,61 b	12,75 bc	7,18 a	0,92 ab	30,62 b	66,97 a	53,73 b	1,00 b
E 50	8,09 ab	0,26 b	4,61 b	15,46 ab	5,27 b	0,59 b	32,49 b	78,07 a	57,13 b	1,00 b
C 100	10,19 a	0,24 b	4,06 b	13,17 bc	7,84 a	0,52 b	14,50 b	95,44 a	42,95 b	1,00 b
E 100	5,18 b	0,27 b	4,89 b	18,14 a	6,86 ab	0,60 b	11,83 b	91,81 a	54,42 b	1,00 b
CV (%)	24,53	39,61	21,32	10,56	15,42	31,24	27,41	43,79	9,48	17,89
Raiz soja										
Solo de textura média										
T	11,16 a	1,12 a	2,33 a	3,61 b	0,97 a	1,28 a	110,37 a	2717,82 a	77,85 a	8,50 b
C 50	10,35 a	1,10 a	1,37 a	4,20 b	1,49 a	1,01 ab	86,07 a	3448,92 a	60,76 ab	9,75 b
E 50	10,51 a	0,86 a	0,71 a	4,04 b	1,11 a	0,75 b	81,12 a	3207,26 a	47,73 b	8,75 b
C 100	11,81 a	0,98 a	0,99 a	4,53 b	1,65 a	0,89 ab	66,50 a	3234,49 a	35,71 b	9,25 b
E 100	11,64 a	1,15 a	0,53 a	7,37 a	1,49 a	1,22 ab	135,61 a	5530,78 a	52,23 ab	16,25 a
CV (%)	23,83	34,4	69,54	15,2	30,48	23,18	36,2	33,68	21,41	24,59
Solo argiloso										
T	13,91 a	1,45 a	0,52 a	2,43 d	0,51 c	0,94 a	54,44 a	11197,12 a	79,79 a	12,75 a
C 50	9,87 a	1,04 a	0,68 a	4,04 c	1,29 ab	0,59 c	43,01 ab	12626,34 a	40,23 b	10,20 a
E 50	11,65 a	1,20 a	0,78 a	5,31 b	1,10 b	0,82 ab	34,28 b	11045,93 a	42,07 b	11,50 a
C 100	11,81 a	1,10 a	0,69 a	4,87 bc	1,49 a	0,67 bc	27,19 b	11702,40 a	36,46 b	9,50 a
E 100	11,16 a	1,02 a	0,70 a	7,20 a	1,46 a	0,85 a	26,14 b	9661,66 a	39,27 b	9,75 a
CV (%)	17,94	23,6	20,18	11,04	13,77	10,3	21,13	35,45	25,94	15,61

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 9 – Teores de nutrientes nos grãos de arroz cultivado em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo

Tratamento*	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			
	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu
Grãos de arroz										
Solo de textura média										
T	15,04 b	2,69 a	4,37 ab	0,43 a	1,23 a	1,28 a	38,03 a	21,68 b	51,18 a	3,75 a
C 50	15,69 ab	2,86 a	4,32 ab	0,40 a	1,32 a	1,29 a	39,84 a	20,94 b	38,24 b	3,50 a
E 50	17,14 ab	2,80 a	4,36 ab	0,41 a	1,32 a	1,20 a	33,73 a	23,4 ab	33,80 bc	3,25 a
C 100	19,24 a	2,85 a	4,66 a	0,42 a	1,41 a	1,21 a	34,58 a	21,11 b	23,28 cd	3,00 a
E 100	16,33 ab	2,54 a	3,91 b	0,41 a	1,17 a	1,02 b	26,89 b	30,23 a	17,92 d	3,00 a
CV (%)	11,32	9,08	6,51	15,61	8,91	6,7	8,76	14,4	14,79	12,37
Solo argiloso										
T	15,36 a	1,88 a	4,49 a	0,46 a	0,56 b	1,25 a	29,27 a	19,54 b	36,99 a	4,00 a
C 50	15,69 a	2,08 a	3,67 b	0,34 a	1,01 a	1,18 ab	25,71 ab	18,92 b	18,38 b	3,00 a
E 50	16,01 a	2,03 a	3,65 b	0,43 a	1,05 a	1,13 ab	24,06 ab	25,96 b	21,36 ab	3,25 a
C 100	17,79 a	2,23 a	4,01 b	0,38 a	1,24 a	1,20 ab	22,59 ab	22,36 b	22,44 ab	3,75 a
E 100	16,98 a	2,21 a	3,80 b	0,48 a	1,15 a	1,06 b	19,41 b	40,90 a	28,43 ab	3,50 a
CV (%)	10,21	11,13	5,19	15,39	11,45	6,36	14,41	23,28	28,28	15,65

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

Tabela 10 – Teores de nutrientes nos grãos de soja cultivada em dois solos com a aplicação de duas doses da escória e do calcário como corretivos de acidez do solo

Tratamento*	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			
Grãos de soja										
Solo de textura média										
T	44,79 b	7,28 a	20,24 a	2,78 a	2,48 a	3,49 a	79,00 a	78,59 a	89,94 a	8,00 a
C 50	47,86 ab	6,63 ab	19,43 a	2,86 a	2,58 a	3,30 ab	71,10 ab	74,34 a	59,37 b	7,50 a
E 50	50,45 ab	6,62 ab	19,29 a	2,92 a	2,55 a	3,15 ab	66,03 bc	79,56 a	53,74 b	8,50 a
C 100	57,08 a	5,64 b	18,52 a	2,83 a	2,47 a	3,06 ab	61,54 c	65,56 a	42,41 c	6,75 a
E 100	43,82 b	6,51 ab	19,00 a	2,45 a	2,41 a	2,82 b	58,60 c	78,08 a	34,24 c	8,75 a
CV (%)	9,69	9,36	6,83	10,06	7,6	8,72	5,73	10,34	8,85	14,43
Solo argiloso										
T	49,78 b	5,09 a	18,13 a	2,87 a	1,35 c	2,75 a	69,21 a	74,26 a	154,32 a	9,25 a
C 50	55,79 a	4,15 ab	17,37 a	2,78 a	2,36 a	3,06 a	49,96 b	72,16 a	35,04 b	6,50 b
E 50	52,23 ab	3,40 b	16,55 a	2,70 a	1,95 b	2,79 a	42,95 bc	71,08 a	32,93 b	5,50 b
C 100	56,11 a	3,48 b	16,52 a	2,70 a	2,16 ab	2,93 a	40,30 c	78,35 a	27,70 b	5,00 b
E 100	57,41 a	3,30 b	16,56 a	2,53 a	2,02 ab	2,77 a	35,28 c	79,80 a	29,69 b	4,75 b
CV (%)	5,03	13,06	5,77	8,41	8,73	8,82	7,47	15,84	15,06	14,12

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

7.2.2 Efeitos nos atributos dos solos

Observou-se que os parâmetros da fertilidade do solo relacionados com a acidez e a CTC receberam influência dos diferentes tratamentos (TABELAS 11 e 12), o que, no geral, não foi observado para os demais parâmetros (P, K, S, B, Zn, Fe, Mn, Cu, MOS e C org total) (TABELAS 13 E 14).

Os efeitos da aplicação da escória no pH dos solos foram altamente significativos em relação à testemunha e não se diferiram dos resultados obtidos nos tratamentos que receberam o calcário, tanto no cultivo do arroz (TABELA 11) quanto no cultivo da soja (TABELA 12). Ademais, observa-se que o pH das testemunhas (em água) dos solos variavam entre 4,7 a 4,9 para o solo com textura média e entre 4,5 a 4,8 para o solo de textura argilosa, e após a aplicação da menor dose da escória, houve um aumento em cerca de 0,7 unidades do pH em ambos os solos, semelhante ao que ocorreu nos tratamentos com aplicação do calcário. Esse aumento no pH com a aplicação da escória se deve a liberação de OH^- no solo provenientes dos óxidos de Ca e Mg presentes em sua composição (TABELA 1). Resultados semelhantes são bem relatados na literatura em estudos utilizando escórias (WANG, 2013; SHI, 2016; NING, 2016; PAN, 2019; HARPER & MBAKWE, 2020). Deus et al. (2020), por exemplo, relataram que a aplicação de escórias em sistemas de plantio direto apresentou eficiência similar a um calcário na neutralização da acidez na camada superficial e subsuperficial do solo, e que o uso da escória, dependendo do seu tipo, apresentou uma vantagem adicional, uma vez que foram fontes de fósforo e silício para as plantas.

Observa-se que com o aumento da dose da escória houve aumento significativo no pH dos solos, mas que a menor dose aplicada, para elevar o V% para 50, foi suficiente para diminuir a saturação por Al^{3+} para zero tanto nos solos cultivados com arroz (TABELA 11) quanto nos solos cultivados com a soja (TABELA 12). Isso pode ser explicado devido as espécies de Al disponíveis no solo serem facilmente alteradas com as mudanças no pH e na composição da solução do solo. Além disso, o aumento do pH favorece a hidroxilação, polimerização e precipitação do Al na solução do solo (JIU YU, 2010).

A escória foi capaz de aumentar o teor de Ca de forma significativa, com a menor dose, em relação à testemunha, em ambos os solos, cultivados com o arroz e com a soja. Além disso, os solos que receberam a escória apresentaram teores de Ca significativamente maiores quando comparada as mesmas doses aplicadas de calcário. Para o Mg, o comportamento foi semelhante ao do Ca, a menor dose da escória foi capaz de aumentar significativamente os

teores de Mg em ambos os solos cultivados com arroz e soja quando comparada com a testemunha. No entanto, o aumento nos teores de Mg com o aumento das doses com a aplicação da escória foi similar ao comportamento do calcário, comportamento esperado visto que o teor de Mg no calcário é maior que o da escória (TABELA 1). O aumento nos teores de Ca e Mg no solo após a aplicação de escórias já é bem relatado na literatura, uma vez que estes elementos possuem altas concentrações em escórias siderúrgicas (PAN, 2019) e também na escória utilizada neste trabalho (TABELA 1). Shi et al. (2016) demonstraram que a adição de escória alcalina em solos ácidos, além de promover o aumento do pH, proporcionou aumento significativo nos teores de Ca e Mg nos solos. O aumento dos teores de Ca e Mg refletiram no aumento dos teores destes elementos nos tecidos vegetais das plantas de arroz e de soja e também em seus grãos (TABELAS 7, 8, 9 E 10).

Além disso, observou-se que as aplicações das maiores doses, tanto da escória quanto do calcário, afetaram a CTC de ambos os solos, demonstrando que a aplicação foi capaz de alterar a carga negativa efetiva nas superfícies do solo. Jiu Yu (2010) explica que essas alterações são feitas principalmente por três mecanismos: 1) aumento do pH do solo, aumentando assim a carga negativa variável do solo; 2) aumento da força iônica da solução do solo, aumentando assim a carga negativa superficial de minerais de carga variável nos solos; e 3) a adsorção específica de SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , F^- ou SiO_4^{4-} pelos solos.

Devido ao aumento do pH, a diminuição da saturação por Al^{3+} , e os aumentos nos teores de Ca e Mg nos solos com a aplicação da escória, conseqüentemente a saturação por bases em todos os solos aumentaram com o aumento das doses, como era o esperado. Com a aplicação da escória, na dose 50, o V% do solo de textura média chegou a 66,5 no cultivo do arroz e 59,3 no cultivo da soja, enquanto que na mesma dose para o solo argiloso os valores foram de 50,8 no cultivo do arroz e 42,8 no cultivo da soja.

Tabela 11 – Efeitos da aplicação de duas doses da escória e do calcário, como corretivos de acidez do solo, nos atributos químicos dos dois solos após o plantio do arroz

Tratamento*	pH		Ca	Mg	Al	Acidez Potencial	CTC	V	m
	Água	CaCl ₂							
Arroz									
Solo de textura média									
T	4,9d	4,5d	1,30d	0,20d	0,13a	2,31a	3,9a	40,8d	7,5a
C 50	5,5c	5,1c	1,64c	0,50b	0,05b	1,45b	3,68a	60,8c	0,0b
E 50	5,6c	5,3c	2,01b	0,49b	0,05b	1,32ab	3,90a	66,5bc	0,0b
C 100	6,2b	5,7b	1,82bc	0,91a	0,05b	0,93c	3,75a	75,8b	0,0b
E 100	6,6a	6,2a	2,73a	0,87a	0,05b	0,42d	4,15a	89,8a	0,0b
CV (%)	2,92	2,86	8,16	15,70	6,54	17,27	8,34	6,38	29,81
Solo argiloso									
T	4,8d	4,2d	0,35d	0,05c	0,31a	6,13a	6,73a	8,8e	33,5a
C 50	5,5c	5,0c	1,65c	0,86c	0,05b	4,06b	6,73a	39,5d	0,0b
E 50	5,8bc	5,2c	2,72b	0,73c	0,05b	3,51b	7,10a	50,8c	0,0b
C 100	6,0b	5,6b	2,48b	1,72a	0,05b	2,45c	6,83a	63,8b	0,0b
E 100	6,4a	6,0a	3,99a	1,19b	0,05b	1,63d	7,03a	76,5a	0,0b
CV (%)	2,97	2,14	13,28	10,45	14,69	9,15	4,61	8,77	15,89

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

Tabela 12 – Efeitos da aplicação de duas doses da escória e do calcário, como corretivos de acidez do solo, nos atributos químicos dos dois solos após o plantio da soja

Tratamento*	pH		Ca	Mg	Al	Acidez Potencial	CTC	V	m
	Água	CaCl ₂							
Soja									
Solo de textura média									
T	4,7d	4,2d	0,95c	0,17c	0,16a	2,52a	3,73ab	33,0d	11,50a
C 50	5,3c	5,8c	1,36bc	0,54b	0,05b	1,75b	3,75ab	53,5c	0,0b
E 50	5,4c	5,0c	1,61b	0,43b	0,05b	1,53bc	3,63ab	59,3bc	0,0b
C 100	5,9b	5,5b	1,34bc	0,72a	0,05b	1,01cd	3,18b	68,5b	0,0b
E 100	6,4a	6,0a	2,42a	0,81a	0,05b	0,58d	3,90a	85,5a	0,0b
CV (%)	3,36	3,10	12,67	14,86	19,64	20,81	8,79	10,98	46,29
Solo argiloso									
T	4,5c	4,1d	0,24d	0,05d	0,38a	5,76a	6,25b	8,5e	42,5a
C 50	5,4b	4,8c	1,12c	0,75c	0,05b	4,28b	6,33b	32,3d	0,0b
E 50	5,2b	4,8c	2,08b	0,66c	0,05b	3,90b	6,76ab	42,8c	0,0b
C 100	5,9a	5,4b	1,90b	1,64a	0,05b	2,68c	6,35b	57,3b	0,0b
E 100	6,1a	5,7a	3,76a	1,37b	0,05b	2,00d	7,25a	72,3a	0,0b
CV (%)	2,01	2,36	5,92	8,41	12,79	6,06	5,29	3,83	23,33

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

Tabela 13 – Teores de P, K, S, B, Zn, Fe, Mn, Cu, MOS e C org total nos solos após o plantio do arroz

Tratamento*	MOS	C org total	P	K	S	B	Zn	Fe	Mn	Cu
	dag kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹			mg kg ⁻¹				
Arroz										
Solo de textura média										
T	0,96 a	0,55 a	73,64 a	31,49 a	25,30 a	0,05 d	6,89 a	59,60 a	28,38 b	0,75 a
C 50	1,22 a	0,70 a	63,67 a	28,75 a	21,79 a	0,26 c	6,64 a	49,13 b	27,32 b	0,69 a
E 50	1,43 a	0,80 a	70,60 a	29,52 a	16,04 a	0,60 b	7,00 a	60,44 a	30,83 b	0,85 a
C 100	1,45 a	0,83 a	62,33 a	37,49 a	26,96 a	0,24 c	7,72 a	46,22 b	31,41 b	0,74 a
E 100	0,94 a	0,53 a	64,32 a	40,99 a	23,77 a	1,29 a	8,03 a	58,35 a	41,68 a	0,84 a
CV (%)	69,77	72,09	22,34	23,94	25,18	17,36	15,65	5,97	10,83	14,41
Solo argiloso										
T	3,19 a	1,85 a	11,38 a	63,62 a	19,91 a	0,16 c	1,65 a	52,60 a	10,80 c	0,56 a
C 50	4,28 a	2,48 a	16,99 a	63,98 a	21,49 a	0,20 c	2,81 a	48,04 a	15,45 bc	0,66 a
E 50	3,10 a	1,80 a	24,62 a	67,81 a	21,69 a	1,17 b	2,51 a	53,30 a	15,75 bc	0,77 a
C 100	3,23 a	1,88 a	20,43 a	67,16 a	26,39 a	0,21 c	2,74 a	53,76 a	17,77 ab	0,71 a
E 100	3,58 a	2,08 a	19,88 a	75,62 a	22,61 a	2,46 a	2,42 a	62,05 a	22,65 a	0,73 a
CV (%)	17,21	16,67	41,25	27,09	16,86	26,11	38,14	22,02	17,83	20,93

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

Tabela 14 – Teores de P, K, S, B, Zn, Fe, Mn, Cu, MOS e C org total nos solos após o plantio da soja

Tratamento*	MOS	C org total	P	K	S	B	Zn	Fe	Mn	Cu
	dag kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹			mg kg ⁻¹				
Soja										
Solo de textura média										
T	1,18 a	0,48 a	60,99 a	35,73 a	18,94 a	0,18 a	8,58 a	52,22 a	31,63 a	0,93 a
C 50	1,77 a	1,03 a	41,90 a	31,76 a	17,48 a	0,18 a	7,59 a	45,26 a	28,79 a	0,67 a
E 50	0,89 a	0,70 a	49,85 a	33,60 a	17,50 a	0,39 a	7,91 a	55,53 a	34,43 a	0,67 a
C 100	1,44 a	0,83 a	56,80 a	31,15 a	20,91 a	0,19 a	7,42 a	40,25 a	30,06 a	0,57 a
E 100	1,18 a	0,70 a	41,61 a	35,31 a	4,39	1,14 a	6,87 a	48,06 a	35,81	0,55 a
CV (%)	58,88	59,65	22,25	16,52	22,05	39,11	17,31	16,44	17,7	25,68
Solo argiloso										
T	3,01 ab	0,75 b	17,29 a	68,65 a	19,12 ab	0,19 c	3,75 a	109,66 a	17,56 a	1,07 a
C 50	3,17 ab	1,83 ab	14,64 ab	69,92 a	17,01 ab	0,15 c	4,37 a	46,20 b	16,79 a	0,80 b
E 50	2,92 b	1,70 b	14,80 ab	54,73 a	11,88 b	1,23 b	3,26 a	47,55 b	16,84 a	0,57 c
C 100	3,31 ab	1,90 ab	12,60 b	45,57 a	24,48 a	0,17 c	3,06 a	45,16 b	16,00 a	0,48 c
E 100	3,81 a	2,20 a	13,26 ab	49,24 a	7,73 b	2,40 a	3,03 a	42,54 b	20,46 a	0,41 c
CV (%)	11,39	10,82	14,73	23,49	34	12,56	28,19	23,74	16,59	15,8

*T: Testemunha. C 50: calcário para aumentar o V% para 50. E 50: escória para aumentar o V% para 50. C 100: calcário para aumentar o V% para 100. E 100: escória para aumentar o V% para 100. Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p <0,05).

8 CONCLUSÃO

A escória moída apresentou características químicas e físicas dentro dos limites exigidos pela legislação vigente para corretivos de acidez do solo. A escória apresentou eficiência semelhante ao calcário comercial em aumentar o pH, diminuir a saturação por Al e aumentar as concentrações de Ca e Mg de ambos os solos e, conseqüentemente, fornecer estes nutrientes às plantas de arroz e soja. Assim sendo, conclui-se que a escória metalúrgica avaliada neste trabalho apresentou eficiência agronômica para a correção da acidez de solos brasileiros e para o fornecimento de Ca e Mg para plantas.

REFERÊNCIAS

- 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. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.291-334.
- ALEWELL, C. et al. Acid inputs into the soils from acid rain. **Handbook of soil acidity**. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, USA, p. 83-115, 2003.
- BRANCA, T. A.; COLLA, V. Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an overview. **Material Recycling-Trends and Perspectives**. p. 335-356, 2012.
- BRANCA, T. A. et al. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. **Metals**, v. 10, n. 3, p. 345, 2020.
- BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 10 fev. 2020
- BRASIL. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária – Brasília: MAPA, 2017. 240p.
- CARMO, C. A. F. de S. et al. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. **Embrapa Solos-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2000.
- CASTRO, G. S. A. et al. Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 2, p. 362-379, 2016.
- DAS, P. K.; DAS, B. P.; DASH, P. Chromite mining pollution, environmental impact, toxicity and phytoremediation: a review. **Environmental Chemistry Letters**, p. 1-13, 2020a.
- DAS, S. et al. Recycling of ferrous slag in agriculture: Potentials and challenges. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, p. 1-35, 2020b.
- DEUS, A.C.F. et al. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104422, 2020.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF THE UNITED STATES – USEPA. **Test Methods for Evaluation of Solid Waste**, third ed., US Government Printing Office, Washington, DC, USA, 1995.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF THE UNITED STATES – USEPA. **Test Methods for Evaluating Solid Waste, Method 3060A, Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium**, US Government Printing Office, Washington, DC, USA, 1996.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF THE UNITED STATES – USEPA. **“Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils,”** Revision 2. Washington, DC, USA, 1996.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. Allan. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2nd ed. rev. e ampl. New York, NY: Marcel Dekker, c1997. xi, 624 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in agronomy**, v. 99, p. 345-399, 2008.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 2014. p. 221-275.

FAQUIN, V. Diagnose do estado nutricional das plantas. **Lavras: UFLA/FAEPE**, v. 1, p. 77, 2002.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FISHER, L. V.; BARRON, A. R. The recycling and reuse of steelmaking slags—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 244-255, 2019.

FOY, C. D. Effects of aluminum on plant growth. **The plant root and its environment**, 1974.

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil use and management**, v. 32, n. 3, p. 390-399, 2016.

GURMESSA, B. Soil acidity challenges and the significance of liming and organic amendments in tropical agricultural lands with reference to Ethiopia. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-23, 2020.

HARPER, J. R.; MBAKWE, I. The effectiveness of coal fly ash in the amelioration of acid soils of the South African highveld: a comparison with conventional liming materials. **South African Journal of Plant and Soil**, p. 1-7, 2020.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 25 out. 2019.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. **A Siderurgia em Números 2021**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/06/Mini_anuario_2021_AcoBrasil.pdf/>. Acesso em: 09 jun. 2021.

JIU-YU, L. I. et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation. **Pedosphere**, v. 20, n. 5, p. 645-654, 2010.

LEÓN-ROMERO, M. A. et al. Effect of steel slag to improve soil quality of Tsunami-impacted land while reducing the risk of heavy metal bioaccumulation. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 229, n. 1, p. 12, 2018.

LIU, P. et al. Mechanism and kinetics of aluminum dissolution during copper sorption by acidity paddy soil in South China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 34, p. 100-106, 2015.

LOPES, A. S. Manual internacional de fertilidade do solo. **Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, 1998.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, 2016. p. 1-72.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3. Ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO –MAPA. **Instrução Normativa SDA nº 27**, 05 de junho de 2006a.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Instrução Normativa SDA nº 35**, 04 de julho de 2006b.

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo: Parte I – Conceitos Básicos**. Viçosa, MG: Ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, p. 251-332.

NING, D. et al. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil. **Plos One**, v. 11, n. 12, p. e0168163, 2016.

NUNES, A. B. de C. et al. Steel slag and phosphate nutrition of corn inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019.

PAGANI, A.; MALLARINO, A. P. Comparison of methods to determine crop lime requirement under field conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 5, p. 1855-1866, 2012.

PAN, X. Y. et al. Four-year effects of soil acidity amelioration on the yields of canola seeds and sweet potato and N fertilizer efficiency in an ultisol. **Field Crops Research**, v. 237, p. 1-11, 2019.

PIATAK, N. M.; PARSONS, M. B.; SEAL II, R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. **Applied Geochemistry**, v. 57, p. 236-266, 2015.

RAIJ, B.van. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997.

RASHEED, A. et al. A review on aluminum toxicity and quantitative trait loci mapping in rice (*Oryza sativa* L). **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 18, p. 3951-3961, 2020.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. C.; ALVAREZ, V. H. Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: **5º Aproximação**. Viçosa, 1999. 341 p.

SHEN, H.; FORSSBERG, E. An overview of recovery of metals from slags. **Waste management**, v. 23, n. 10, p. 933-949, 2003.

SHI, R. Y. et al. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 41-45, 2016.

SILVA, S. et al. Aluminium long-term stress differently affects photosynthesis in rye genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 54, p. 105-112, 2012.

STANOJKOVIC-SEBIC, A. et al. Levels of macro and trace elements in vegetable crops as influenced by metallurgical slag addition to marginal soil. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 26, n. 1 A, p. 1017-1025, 2017.

SUMNER, M.E., NOBLE, A.D. Soil acidification: the world story. In: Rengel, Z. (Ed.), **Handbook of Soil Acidity**. Marcel Dekker, New York, pp. 1-28, 2003.

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. **Rio de Janeiro, Embrapa**. 573 p. 2017.

WANG, L. et al. Combined use of alkaline slag and rapeseed cake to ameliorate soil acidity in an acid tea garden soil. **Pedosphere**, v. 23, n. 2, p. 177-184, 2013.

WANG, X. et al. Environmental risks for application of iron and steel slags in soils in China: A review. **Pedosphere**, v. 31, n. 1, p. 28-42, 2021.

YELLISHETTY, M.; RANJITH, P. G.; THARUMARAJAH, A. Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable? **Resources, conservation and recycling**, v. 54, n. 12, p. 1084-1094, 2010.

ZHAO, W. R. et al. The mechanisms underlying the reduction in aluminum toxicity and improvements in the yield of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) after organic and inorganic amendment of an acidic ultisol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 288, p. 106716, 2020.