

Resumo:

A civilização moderna, nos últimos anos, tem aumentado a exigência de produtos derivados do ferro e do aço, impulsionando o crescimento do setor siderúrgico nacional e, conseqüentemente, a geração de resíduo industrial denominado escória de siderurgia. Neste contexto, a reciclagem de resíduos pode contribuir para solucionar problemas das indústrias que priorizam a excelência da produção com qualidade. Por outro lado, tem-se um setor de produção primária no Brasil, a agricultura, com grande área cultivada em solos ácidos e com baixa fertilidade, sendo estes fatores reconhecidamente determinantes para produção vegetal, sob condições tropicais. Assim, tem-se um cenário de dois setores primários de produção, embora distintos, que apresentam potencial de interação, pois, de um lado, existe a disponibilidade de um produto com propriedades semelhantes aos corretivos e fertilizantes tradicionais e, do outro, um setor de produção altamente dependente desses produtos. E com a interação destes dois setores, tem-se ainda a preservação do meio ambiente, imprimindo, assim, certa sustentabilidade nos sistemas de produção da civilização pós-moderna, que será o desafio deste novo século. Diante da possibilidade atual de reciclagem destes resíduos industriais na agricultura, existem três fatores importantes a se considerar. O primeiro seria a própria utilização do resíduo industrial abundante, disponível e promissor; o segundo num ambiente agrícola propício, solo ácido e de baixa fertilidade; e a terceira, em uma cultura responsiva e sócio-economicamente importante, a cana-de-açúcar, tendo em vista a vasta área cultivada. Na literatura nacional, são poucos os trabalhos que tratam do uso da escória de siderurgia e que avaliaram a resposta das culturas a sua aplicação. Assim, o presente trabalho objetivou-se reunir informações da literatura com respeito à caracterização e produção de escória de siderurgia no Brasil, bem como a viabilidade agronômica do uso da cana-de-açúcar, apontando benefícios na correção da acidez do solo e no fornecimento de nutrientes e de silício.

¹Esta revisão teve como base o livro "Uso agrícola de escória de Siderurgia no Brasil".

* Doutor em Agronomia – UNESP, Jaboticabal, Docente do Centro Universitário de Araraquara – UNIARA e do Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB; e-mail: fonobile@yahoo.com.br

Palavras-chave: Escória de Siderurgia, Cana-de-Açúcar, Solos, Reaproveitamento.

Introdução

A civilização moderna, nos últimos anos, tem aumentado a exigência de produtos derivados do ferro e do aço, impulsionando o crescimento do setor siderúrgico nacional e, conseqüentemente, a geração de resíduo industrial denominado escória de siderurgia.

Neste contexto, a reciclagem de resíduos pode contribuir para solucionar problemas das indústrias que primam a excelência da produção com qualidade. Por outro lado, tem-se um setor de produção primária no Brasil, a agricultura, com grande área cultivada em solos ácidos e com baixa fertilidade, sendo estes fatores reconhecidamente determinantes para produção vegetal, sob condições tropicais. Assim, tem-se um cenário de dois setores primários de produção, embora distintos, que apresentam potencial de interação, pois, de um lado, existe a disponibilidade de um produto com propriedades semelhantes aos corretivos e fertilizantes tradicionais e, do outro, um setor de produção altamente dependente desses produtos. E com a interação destes dois setores, tem-se ainda a preservação do meio ambiente, imprimindo, assim, certa sustentabilidade nos sistemas de produção da civilização pós-moderna, que será desafio deste novo século.

Diante da possibilidade atual de reciclagem desses resíduos industriais na agricultura, existem três fatores importantes a se considerar. O primeiro seria a própria utilização do resíduo industrial abundante, disponível e promissor; o segundo num ambiente agrícola propício, solo ácido e de baixa fertilidade; e a terceira, em uma cultura responsiva e sócio-economicamente importante, a cana-de-açúcar, tendo em vista a vasta área cultivada que atinge cerca de 5 milhões de hectares, com uma produção de colmos de 360,6 milhões de toneladas (FAO, 2002).

Na literatura nacional, são poucos os trabalhos que tratam do uso da escória de siderurgia e que avaliaram a resposta das culturas à sua aplicação. Dentre as culturas que apresentam maior potencial de consumo desse subproduto no Brasil, destaca-se a cana-de-açúcar, seja pela vasta área cultivada, concentrada na mesma região produtora das escórias, seja pela tradição e organização que o setor sucroalcooleiro apresenta na reciclagem dos resíduos e, ainda, pelo fato da resposta positiva da cana-de-açúcar à aplicação deste resíduo.

Assim objetivou-se reunir informações da literatura com respeito à caracterização e produção de escória de siderurgia no Brasil, bem como a viabilidade agrônômica do uso da cana-de-açúcar, apontando benefícios na correção da acidez do solo e no fornecimento de nutrientes e de silício. O artigo

em questão, Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo (PRADO; FERNANDES, 2001), está servindo de documento base para o preparo do seminário a ser apresentado na disciplina.

Produção de escória de siderurgia e seus processos

De maneira simplificada, a escória de siderurgia pode ser definida como sendo obtida através da sílica do minério de ferro, que reage com o cálcio do calcário em alto-forno, resultando em silicato de cálcio e impurezas (MALAVOLTA, 1981).

A atividade de siderurgia, ou seja, o conjunto integrado dos processos siderúrgicos tem como primeira etapa à obtenção do ferro bruto e impuro, "ferro-gusa", por meio da redução dos minérios de ferro e, como resíduo, a escória de siderurgia de alto-forno. É esse ferro bruto, com cerca de 90% de pureza, o produto siderúrgico básico, que atua como matéria-prima na fabricação de diversos tipos de aço e de ferros fundidos, materiais que formam os principais pilares de sustentação da moderna tecnologia industrial. O processo de fabricação é mostrado simplificado no esquema 1 (CAMPUS FILHO, 1981).

Assim, as matérias-primas na produção da indústria siderúrgica são o minério de ferro, carvão mineral ou vegetal e o calcário. O processo mais empregado atualmente para extração do ferro é o da redução de minério (óxidos), utilizando-se do carbono como agente redutor ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + 4\text{CO}$). Essa redução é realizada em um tipo especial de forno denominado de alto-forno, que consiste essencialmente em um reator tubular vertical.

Para a produção do ferro-gusa, são introduzidos no alto forno (minério de ferro, carvão mineral ou vegetal e calcário) e reagem à temperatura de aproximadamente 1900 C e, por diferença de densidade, ocorre a separação do ferro por um canal onde é feito o escoamento. Um alto forno típico tem capacidade de produzir, normalmente, 3000 t dia⁻¹ de ferro-gusa. Ressalta-se que, para cada tonelada de ferro-gusa produzido, obtém-se, 0,75 t de escória.

A partir da produção do ferro-gusa, que contém certas impurezas (3-4% de C, 7-8% de S, Si, P e Mn), produz-se o aço que tolera nível muito baixos de impurezas como S e P (< 0,05%). A produção do aço, a partir do ferro-gusa, consiste em se reduzir de forma controlada as impurezas do ferro-gusa, por reações de oxidação (passagem de oxigênio puro ou do ar em meio à massa de ferro-gusa em estado líquido a 1600 C), uma vez que a presença de impurezas compromete o produto final. Para isto, é usado um forno denominado de forno conversor "Bessemer", que pode ser "ácido" ou "básico", em função do tipo de escória e de refratários utilizados. Os conversores ácidos são destinados para ferro-gusa com baixos teores de P, caso em que pode se utilizar escória ácida e refratários ácidos

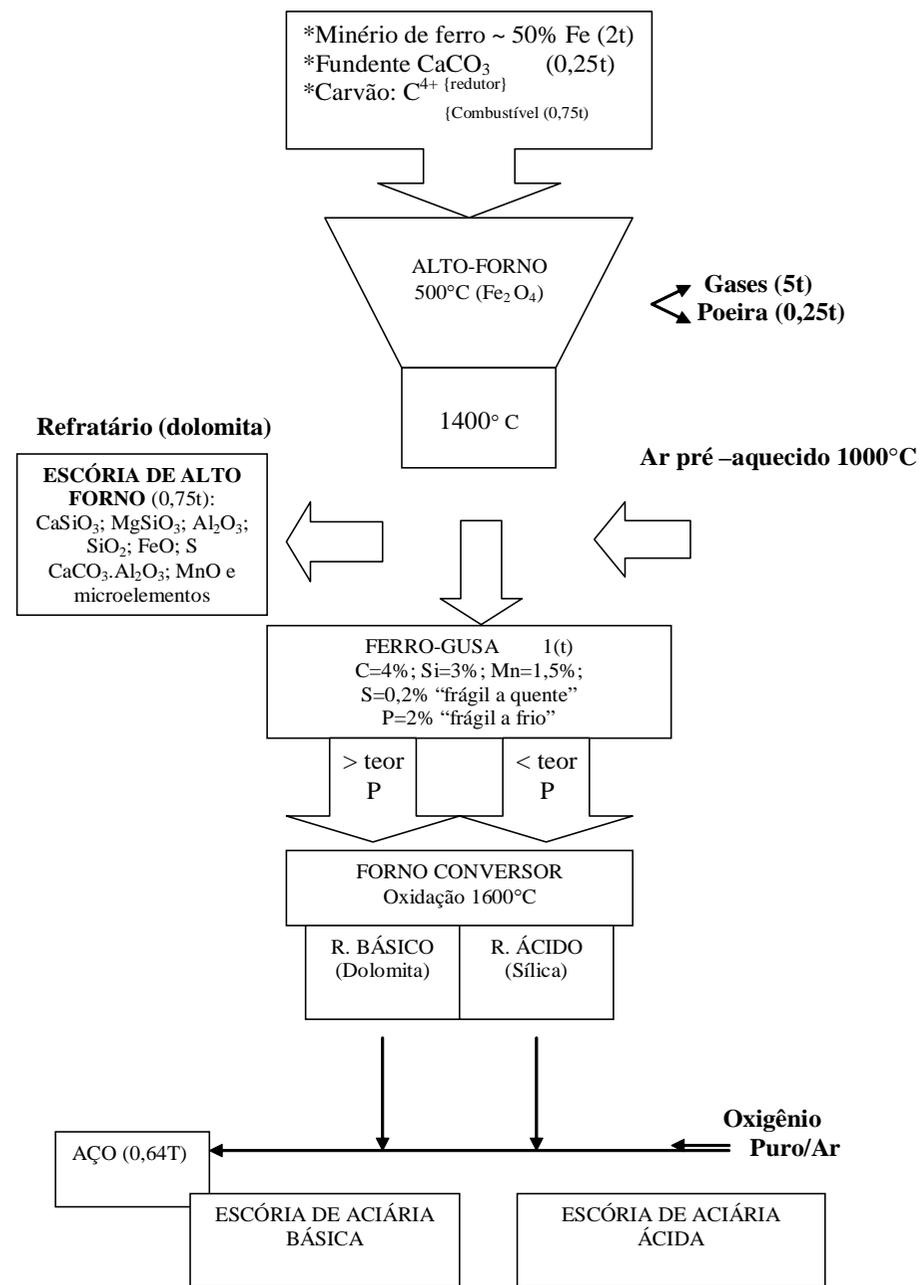
a base de sílica (SiO₂), enquanto, para ferro-gusa com altos teores de P, se utiliza o conversor básico, no qual se forma escória básica por meio da adição de cal (CaO) como fundente, com a finalidade de escorificar o P. Nesse caso, o refratário deverá ser também do tipo básico (à base de dolomita ou magnesita).

Segundo Cantini e Souza (1989), para cada tonelada de aço produzido, obtêm-se 0,64 t da escória de aciaria básica ou ácida.

Os processos de fabricação do aço, comportamento da escória é freqüentemente relacionado ao cálculo da basicidade. Entre outras funções, este parâmetro pode ser usado para definir se uma escória é básica, neutra ou ácida. Desta forma, existem duas formas de cálculo, a basicidade simples (BS) e a basicidade composta (BC), com a seguinte expressão:

$$BS = \% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2 ; BC = \% \text{CaO} + \% \text{MgO} / \% \text{SiO}_2 + \text{AlO}_3$$

Portanto, para o setor siderúrgico uma escória é básica, neutra ou ácida, quando a relação é superior a 1, igual a 1 e inferior a 1, respectivamente (VILELA; MORAES, 1998). Na rotina de produção de uma siderúrgica, quando se trabalha com índice de basicidade de escória igual a 2, significa que deverão ser adicionados 1400 kg de cal no forno, sendo que metade da cal será utilizada para retirar ou neutralizar a sílica do banho de aço para a escória e a outra metade para retirar ou fixar outras impurezas, como P, do banho de aço para a escória.



Esquema 1. Fluxograma básico de processos de produtos siderúrgicos de produção do ferro-gusa e do aço.

Uso da escória em siderurgia e problemas ambientais

A escória pode ser utilizada para diversos fins, em vários setores da economia, ou nas indústrias de cimento, no setor de transporte, como na pavimentação, podendo conter mistura de escória em até 20% do peso, e ainda compor até a capa superior do asfalto; na construção civil, relacionado como constituinte da massa de concreto, nas indústrias de cerâmica, na composição do vidro-cerâmica, até nas indústrias de tintas com pigmentos, além da agricultura. Deve-se informar que esses setores citados, com exceção da agricultura, possuem baixo potencial de consumo, seja devido a alguma restrição técnica de uso, seja pela falta de pesquisa na área, o que implicaria no crescimento a cada ano, dos pátios de deposição desses resíduos.

Assim, têm sido estudadas maneiras de usos desses resíduos, com técnicas que priorizam obedecer às normas da legislação de proteção ambiental brasileira. Dos diversos estudos de reciclagem desses resíduos, os mais promissores são: a) ajustes no processo da siderúrgica para evitar ou diminuir a geração do resíduo; b) os processos de reciclagem propriamente ditos. Quanto à primeira opção, trata-se de um projeto a longo prazo ainda não disponível. No segundo caso, a reciclagem em outros setores da indústria é pouco expressiva, enquanto, na agricultura, ocorre o contrário, uma vez que este setor possui razoável potencial de consumo em grande parte das escórias.

Alguns autores alertam sobre a presença de metais pesados na escória de siderurgia e o potencial de contaminação do ambiente (DEFELIPO et al. 1992). No entanto, existem autores que não observaram restrições ao uso agrícola da escória, conforme Piau (1991), que incubou por 90 dias três tipos de escória de siderurgia (auto-forno, aciaria e a pré-cal) em diversas granulometrias. Piau (1995) constatou, através de um ensaio com plantas de milho, que a presença do Al, Ti, Pb, Cr, Ni, V, Sr, Ba, Cd, na escória não causou toxidez as plantas.

Existem alguns fatores que poderiam sugerir o menor potencial de contaminação dos metais pesados da escória no ambiente. Tem-se notado que a solubilidade dos metais pesados presentes na escória de siderurgia reduz-se com o decorrer do tempo de aplicação (AMARAL SOBRINHO et al. 1997). Isso pode ser explicado pelo fenômeno da adsorção de metais pesados beneficiado pelo aumento do valor do pH. Segundo Jenne (1998), o efeito do aumento do pH na maior adsorção dos metais pesados no solo ocorre devido à conversão de sítios diprotonados carregados positivamente, para sítios monoprotonados, que, por sua, são convertidos em sítios carregados negativamente. Isto aumenta o número de sítios disponíveis para a adsorção, ao mesmo tempo que reduz a competição de H⁺ com adsorvato. Esse fato é mostrado por Azizian e Nelson (1998) que demonstram que a adsorção do Pb, por exemplo, aumenta significativamente com a elevação do pH, não sendo praticamente determinada a adsorção em pH abaixo de 4, atingindo cerca de 100% em pH acima de 6.

Tendo em vista o pH básico da escória e, pela aparente baixa habilidade da cana-de-açúcar em absorver metais pesados, o uso agrônômico desse resíduo pode conter um risco mínimo.

Em um levantamento amplo do uso agrícola de fertilizantes, corretivos e resíduos industriais e o potencial de poluição ambiental com metais pesados realizado por Malavolta (1994), conclui-se que o uso desses produtos, nas doses e modos recomendados, não eleva os teores desses elementos no solo e na planta a níveis indesejáveis em prazo curto, médio e longo. Ao contrário, esses produtos contribuem eficientemente para a produção de alimentos, fibras e energia renovável.

Entretanto, é importante salientar a necessidade de incrementar pesquisas do impacto ambiental utilizando resíduos industriais, gerando, assim, conhecimentos conclusivos no sentido de encorajar o uso agrônômico desses resíduos.

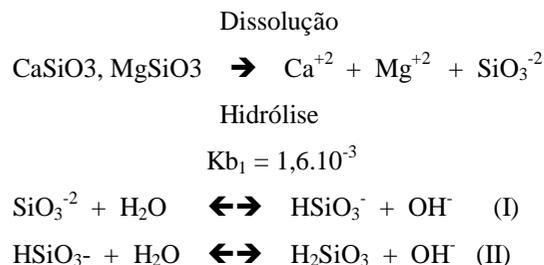
Efeito da escória de siderurgia nas propriedades químicas do solo

Com a aplicação da escória, ocorre normalmente a correção da acidez do solo, tendo em vista a ação do silicato de cálcio, devido à base química SiO₃-2. Nesta circunstância, ocorre algumas reações químicas no solo de maneira semelhante a do calcário, com aumento do pH e precipitação de Al e Mn tóxicos. Aumentando as cargas negativas do solo, pode-se minimizar as perdas de K por lixiviação e a do P por adsorção, e ainda tem-se fornecimento de micronutrientes que estão presentes na escória. Além disso, existem outros benefícios como o aumento do Si solúvel no solo, que além de contribuir para reduzir a adsorção de fósforo, é considerado um elemento benéfico para algumas gramíneas, especialmente para a cana-de-açúcar, que absorvem grandes quantidades de Si, equiparando ao N e K. apesar de não ser considerado nutriente de planta, o silício é um elemento funcional para cana-de-açúcar. Acrescenta-se, ainda, que a escória de siderurgia apresenta efeito residual superior ao calcário, por ter reação mais lenta, com mecanismo de solubilidade controlado pelo valor de pH e pelo teor de Ca na solução do solo. Nestas circunstâncias, eventuais erros de cálculos da quantidade de escória, ou da incorporação inadequada, que resultem em super doses, não causam tantos malefícios ao sistema solo-planta quando comparado ao uso do calcário.

Correção da acidez do solo

No Brasil, o material mais utilizado como corretivo é o calcário. Todavia, a utilização de alguns resíduos siderúrgicos para a mesma finalidade tem-se mostrado como alternativa viável para o aproveitamento de parte desses resíduos da siderurgia.

De acordo com Alcarde (1992), a escória de siderurgia apresenta ação neutralizante semelhante a do calcário, através da base SiO₃-2, conforme as seguintes equações:



Prado e Fernandes (2001b) mostraram a similaridade da escória de siderurgia em relação ao calcário, incorporados na camada de 0-20 cm em pré-plantio de cana-de-açúcar, na correção da acidez do solo e na elevação da saturação por bases, nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade, conforme a figura 1. O autor observou que, apesar de a escória ter corrigido a acidez do solo, a reação foi mais lenta que o calcário, indicando que a aplicação de escória, baseada na determinação do PN, não foi eficaz.

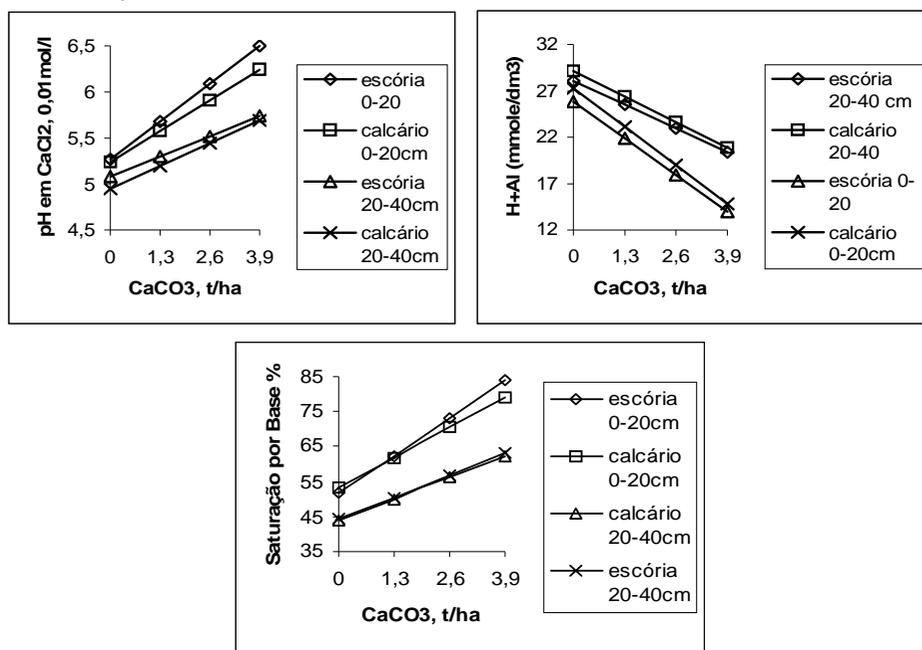


Figura 1. Efeito do calcário e da escória de siderurgia no valor pH, nos teores de Ca, Mg e (H+Al) de um Latossolo Vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. (Dados médios de 12 e 24 meses após incorporação e quatro repetições).

Essa reação mais lenta da escória de siderurgia imediatamente após sua incorporação no solo pode ser influenciada por diversos fatores como a presença de impurezas como o alumínio, o que reduz sua solubilidade. Isto pode ser explicado pela constituição química da escória, que apresenta parte de compostos de Ca e Mg ligados a alumino-silicatos (CRANE, 1930) ou pela formação de uma película de oxi-hidróxido de Fe e Al em torno das partículas de corretivo. Isto ocorre, provavelmente, no momento da hidrólise do corretivo, em função da alcalinidade em torno desta partícula (GOMES et al., 1996). Este fato fica mais evidenciado nos materiais de escória de siderurgia em função da presença do Fe e Al em maior quantidade, quando comparados ao calcário.

Esta característica química da escória de siderurgia, quanto à reação mais lenta no solo, pode ser altamente vantajosa para culturas semiperenes como cana-de-açúcar, cujo sistema radicular permanece por um longo tempo explorando praticamente a mesma região do solo. Desse modo, não haveria necessidade de nova incorporação de corretivos, o que também não seria aconselhável devido aos danos às raízes das plantas.

Disponibilidade de fósforo

Existem duas teorias que explicam o efeito benéfico da escória de siderurgia no aumento da disponibilidade de fósforo no solo. A primeira considera que o incremento de ânions silicatados no solo, a princípio, provoca competição entre Si e P pelos mesmos sítios de adsorção, de forma que o Si iria "saturar" o solo, reduzindo seu poder de adsorção de P. a segunda, embora menos provável, o Si também poderia deslocar o P, previamente adsorvido para a solução do solo.

Prado e Fernandes (2001a) pesquisaram o P disponível em um Latossolo Vermelho Amarelo, comparando o calcário calcítico e a escória de siderurgia, utilizados para elevar a saturação por bases a 50, 75 e 100%. Constataram que houve efeito linear da escória de siderurgia no P disponível do solo, em contraste com a ausência de efeito, quando se aplicou calcário. Isso sugere que o efeito positivo da escória de siderurgia se deve mais ao efeito do silicato de saturar os sítios de adsorção de P do que ao efeito do aumento do pH (figura 2). Este efeito correlacionou-se da mesma forma com a produção de colmos da cana-de-açúcar (figura 3).

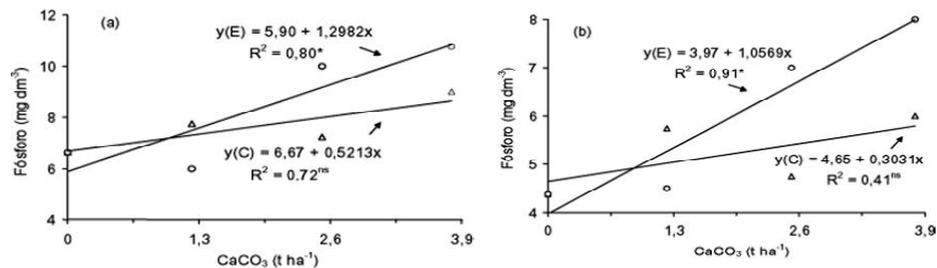


Figura 2. Efeito na concentração de P disponível (resina) em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo (camada de 0-20cm de profundidade) após 12 meses (a) e 24 meses (b) da aplicação do calcário (C) e escória de siderurgia (E) (dados médios de quatro repetições).

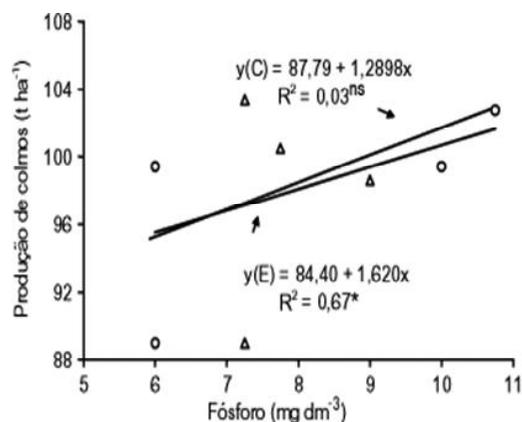


Figura 3. Efeito da concentração de P disponível do solo (resina) na camada de 0-20 cm de profundidade, na produção de colmos da cana-planta, em função da aplicação do calcário (C) e da escória de siderurgia (E) (dados médios de quatro repetições).

Efeito na disponibilidade de micronutrientes

Como fontes disponíveis de micronutrientes no Brasil, tem-se basicamente os óxidos silicatados, conhecidos como fritas, os sais e a escória de siderurgia. Louzada (1987) ressalta que a escória tem vantagens em relação às fritas por apresentar liberação mais rápida dos elementos, além de exercer efeito de correção da acidez do solo.

Prado et al. (2001c) aplicaram a escória de siderurgia em quatro doses: 0; 3,0; 6,1 e 9,3 t ha⁻¹, equivalentes a 0; 1,23; 2,52 e 3,80 t ha⁻¹ de CaCO₃, incorporada na camada de 0-20 cm, em pré-plantio de cana-de-açúcar. Determinaram-se as concentrações de Fe, Mn, Cu, Zn e B no solo. A aplicação de escória de siderurgia promoveu um efeito residual favorável na disponibilidade de Fe, Zn, Cu disponíveis no solo (figura 4).

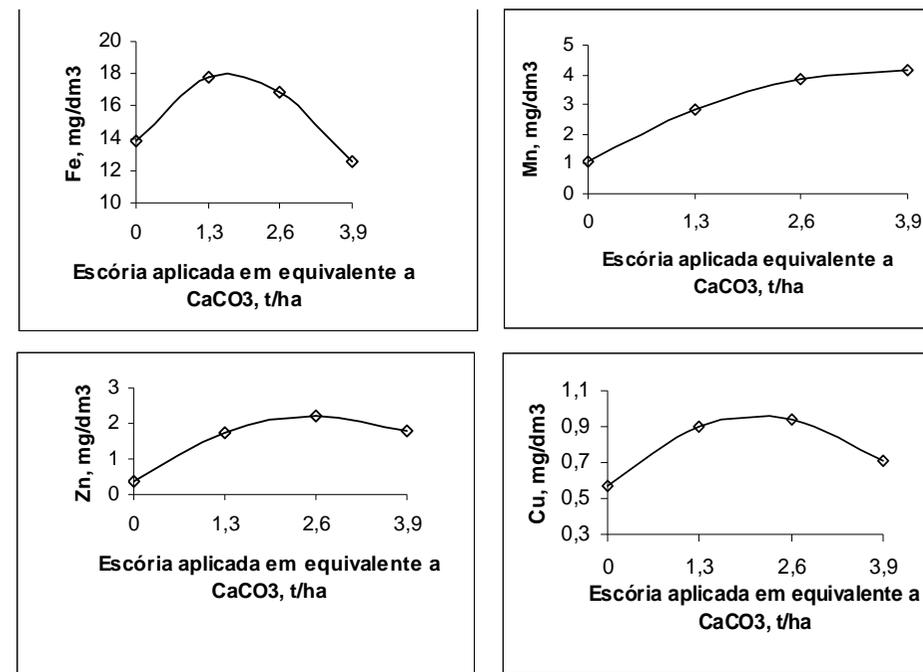


Figura 4. Efeito da aplicação de escória de siderurgia na disponibilidade de FE (a); Mn (b); Cu (c) e Zn (d) em um Latossolo Vermelho-Amarelo. (Médias dos 12 e 24 meses após aplicação e quatro repetições).

A aplicação da escória como fonte de micronutrientes é aconselhável que seja aplicada a lanço e incorporada ao solo de maneira semelhante aos óxidos silicatados "fritas", porém diferentemente das fontes mais solúveis como sais, que exigem aplicações localizadas devido a maiores perdas por adsorção, especialmente para os elementos metálicos. Nesta aplicação a escoria tem grande vantagem, pois não tem problemas de uniformidade de aplicação, diferentemente dos fertilizantes convencionais que, por necessitarem de baixas doses, encontram dificuldade de equipamentos para distribuição homogênea na área.

Salienta-se que, para controlar o uso eficiente de escória como fonte de micronutrientes, há necessidade de estudos para definir extratores adequados na quantificação dos micronutrientes fitodisponíveis presentes na escória, uma vez que o método de análise restringe-se apenas ao teor total do elemento e, muitas vezes, este teor pode não ser totalmente disponível para as plantas.

Aplicação da escória de siderurgia na cana-de-açúcar

Prado e Fernandes (2001b), em experimento de campo, num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com a cana-de-açúcar (SP80-1842), compararam a escória de siderurgia (aciária) e um calcário calcítico acrescido com micronutrientes, equilibrando-se com a da escória, ambos aplicados em doses equivalentes a CaCO_3 iguais a 1,3; 3,6 e 7,5 t ha⁻¹. Essas doses tinham por objetivo elevar a saturação por bases do solo a 50, 75 e 100%. Para a produção de colmos e para o perfilhamento, a resposta da cana-de-açúcar (média de 2 cortes) foi quadrática e linear, em função da aplicação do calcário e da escória de siderurgia, respectivamente (figura 5), também foi encontrada estreita relação entre a produção de colmos e a média de saturação por bases do solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm (figura 6). Portanto, a maior taxa de aplicação da escória de siderurgia contribuiu para a produção final de colmos da cana-de-açúcar.

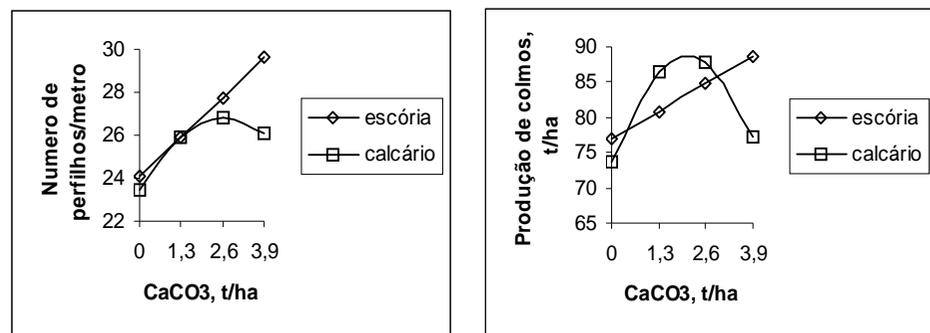


Figura 5. Efeito da aplicação do calcário e da escória de siderurgia no perfilhamento e na produção de colmos da cana-de-açúcar. (Dados médios da cana-planta e cana-soca e quatro repetições).

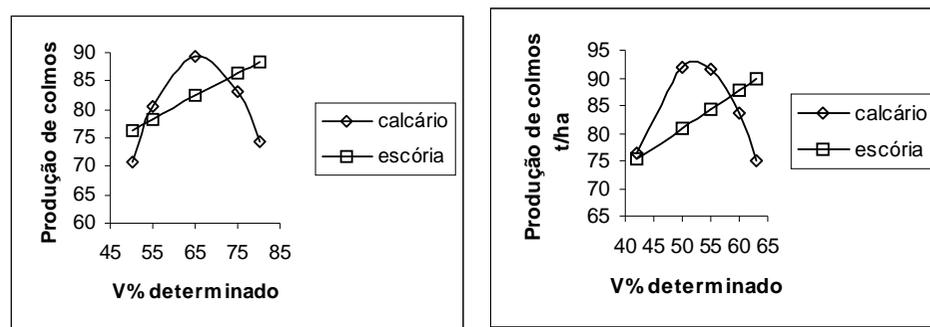


Figura 6. Relação entre a produção de colmos da cana-de-açúcar e a saturação por bases corrigida pela aplicação do calcário e da escória de siderurgia nas profundidades de 0-20 e 0-40 cm. (Dados médios de duas épocas de amostragem e quatro repetições).

Neste mesmo experimento, avaliou-se se os corretivos em estudo tiveram efeito na taxa de acúmulo dos macronutrientes pela parte aérea da cana-de-açúcar. Pelos resultados, a escória de siderurgia foi semelhante ao calcário na nutrição da planta (tabela 1) (Prado et al., 2002).

Tabela 1. Valores médios de macronutrientes acumulados na área, na parte aérea da cana-soca, aos 345 dias após a emergência do broto em função da aplicação do calcário da escória de siderurgia.

Corretivos (C)	N	P	K	Ca	Mg	S
-----kg ha ⁻¹ -----						
Calcário	147,4	5,0	106,1	43,1	21,8	5,5
Escória	143,6	5,1	103,7	44,5	22,0	5,3
F ⁽¹⁾	1,05 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,6 ^{ns}
Dose equivalente a CaCO_3 (D) t ha ⁻¹						
0	129,0	4,1	75,3	34,2	18,7	4,5
1,23	175,5	5,2	132,1	53,7	24,3	6,7
2,52	148,8	5,9	105,3	45,3	24,7	5,4
3,80	146,6	4,9	106,9	41,9	19,8	5,1
F	14,23**	12,71**	24,00**	42,10**	5,94**	23,20**
DMS ⁽²⁾	20,0	0,8	18,7	4,9	5,0	0,7
C x D						
F	0,60 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,14 ^{ns}	1,23 ^{ns}	0,26 ^{ns}	1,41 ^{ns}
Média	150,0	5,0	104,9	43,8	21,9	5,4
CV%	9,6	11,8	12,8	8,0	16,3	9,7

⁽¹⁾ ns; **: não significativo ($P > 0,05$) e significativo ($P < 0,01$) pelo teste F.

⁽²⁾ Comparação de médias pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Na Flórida, Elawad et al. (1982) estudaram, na cultura da cana-de-açúcar, diferentes silicatos, sendo duas escórias de siderurgia da Flórida e o cimento. Os materiais silicatados foram aplicados em pré-plantio, incorporados na cana-de-açúcar (CP63-588) em solo com pH 4,8 e 1980 mg kg⁻¹ de Ca e 236 mg kg⁻¹ de Mg. Os autores não observaram diferenças entre os silicatos. Os materiais silicatados, independente da fonte, incrementaram significativamente a altura, número de colmos e a produção de colmos de primeiro e segundo corte (figura 7).

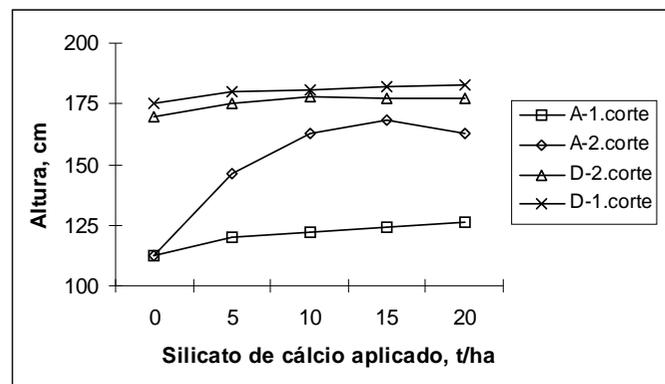
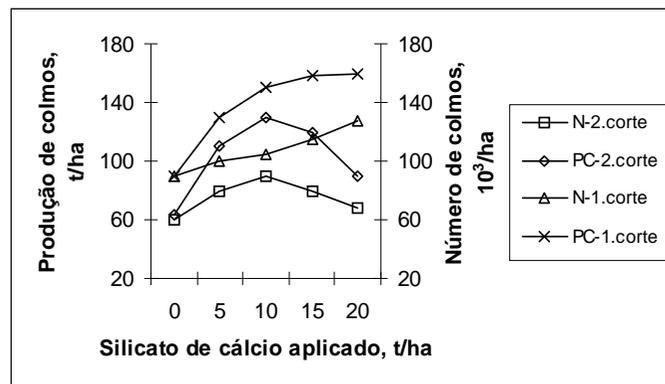


Figura 7. Efeito do silicato de cálcio (média de três cortes) na altura (A), produção de colmos (PC) e no número de colmos (N) da cana-de-açúcar de primeiro corte e segundo cortes.

Por estes resultados, pode-se inferir que o aumento da absorção de silício pela cana-de-açúcar, acompanhado do teor de clorofila, pode manter as folhas ativas por mais tempo, aliado ao fato de que o Si incrementa o índice de folhas eretas das plantas, implicando maior interceptação da radiação solar. Estes fatores podem, sem dúvida, refletir em maior taxa fotossintética, com prováveis ganhos em termos de produção de biomassa (ELAWAD et al., 1982).

Prado e Fernandes (2000) observaram que o uso da escória de siderurgia mantém as folhas da cana-de-açúcar ativas por mais tempo, uma vez que houve redução significativa na taxa de folhas senescentes da cultura, o que não ocorreu quando foi utilizado o calcário em doses equivalentes a CaCO_3 , independente do nível de aplicação e da classe de solo Latossolo Vermelho distrófico ou Neossolo Quartzarênico (tabela 2).

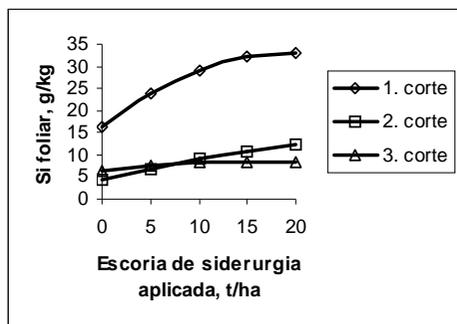
Tabela 2. Efeito dos corretivos e dos níveis de aplicação sobre a taxa de folhas senescentes da cultura da cana-de-açúcar, cultivada em Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho-Escuro.

Corretivo	Taxa de folhas senescentes (%)	
	Areia Quartzosa	Latossolo Vermelho-Escuro
Calcário	34,48 a	35,59 a
Escória	28,38 b	26,86 b
△ (5%)	3,39	7,80
Níveis de aplicação		
NA1	32,78 a	33,75 a
NA2	30,08 a	28,70 a
△ (5%)	3,39	7,80

NA1 e NA2 correspondem à dose para elevar a saturação por bases do solo a 50% e o dobro desta dose, respectivamente. Letras diferentes indicam diferença significativa a nível de 5%, pelo teste de Tukey.

Anderson et al. (1991) estudaram a aplicação de escória de siderurgia nas doses de 0; 2,5; 5,0; 10 e 20 t ha⁻¹, com granulometria de 100%, passando em peneira de 40 mesh, em dois locais da região de Everglades (Flórida-USA). Os solos apresentavam, no Local 1: pH 6,0 a 6,4 e no Local 2: pH 5,8 a 6,4. pelos resultados, a escória de siderurgia elevou a concentração de Si foliar aos 5 meses de emergência dos brotos e incrementou, significativamente, a produção da cana-de-açúcar e de açúcar (figura 8).

Local 1



Local 2

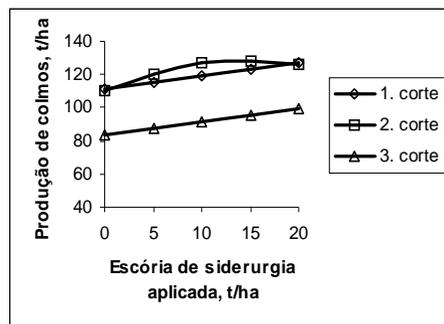
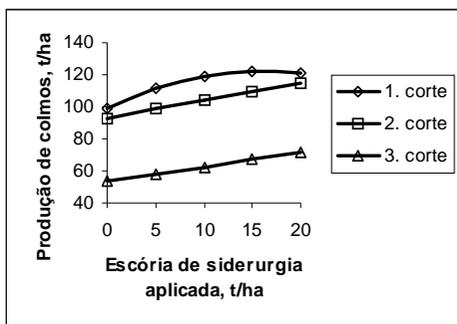
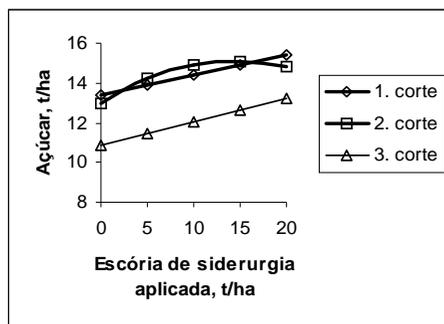
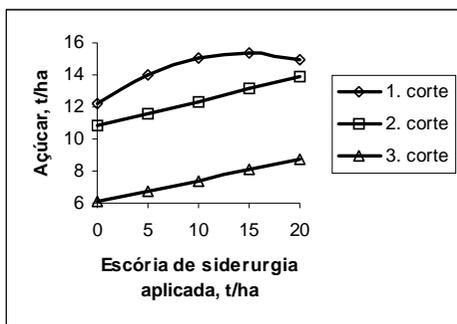
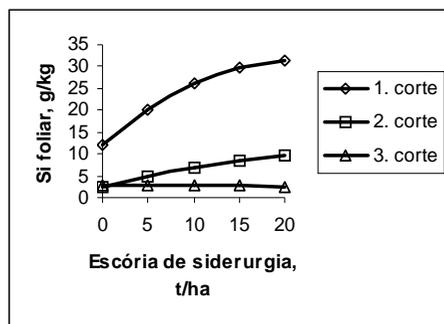


Figura 8. Efeito da aplicação da escória de siderurgia na concentração foliar de Si, na produção de colmos e de cana-de-açúcar (CP72-1210).

Acrescentam ainda, o efeito significativo da escória na minimização da queda da produção da cana-de-açúcar com os cortes. Isto ficou evidente quando se comparou o tratamento sem escória e com escória na dose de 20 t ha⁻¹, pelo aumento da ordem de 15 a 39% na produção de colmos e de 13 a 50% na produção de açúcar, sendo o maior índice observado nas soqueiras. Nota-se, ainda, que as maiores

produções estiveram associadas à concentração de Si igual ou superior a 10 g kg⁻¹, que é considerada o nível crítico para a cultura. Ainda com relação ao Si, observa-se uma maior exigência na cana-planta em relação às soqueiras, o que pode indicar menor eficiência da soqueira na absorção do Si ou mesmo pelo fato da redução da disponibilidade de Si no solo com o tempo (tabela 3).

Tabela 3. Incremento anual da produção da cana-de-açúcar com a aplicação da escória (20 t ha⁻¹) em relação à testemunha e à concentração de Si nos tratamentos de produção máxima de colmos, durante três cortes.

Local	Corte	Produção de colmo t ha ⁻¹	Incremento de colmo %	Produção de açúcar t ha ⁻¹	Incremento de açúcar %	Si foliar g kg ⁻¹
1	1	110	17,2	13,4	17,5	33
1	2	110	15,5	12,9	13,0	11
1	3	83	21,0	10,6	26,7	12
2	1	95	30,0	11,6	32,2	30
2	2	89	33,2	10,5	37,0	10
2	3	52	38,2	5,8	50,0	3

É importante destacar que, em solos com baixos teores de magnésio, a resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória silicatada pode ficar comprometida, visto que, normalmente, a escória de siderurgia apresenta baixo teor de magnésio e, ainda, a presença do efeito antagônico entre Si e o Mg (ANDERSON et al., 1991).

Recomendação de aplicação e considerações finais

Tendo em vista as condições de acidez presentes nos solos brasileiros, recomenda-se aplicar a escória de siderurgia baseada no método de saturação por bases, objetivando elevar para 80%, o que deverá apresentar um efeito residual suficiente para toda a cultura. Quando o teor de MgO da escória for inferior a 5%, é necessário complementar com 50 kg ha⁻¹ de MgO na adubação de plantio (PRADO et al., 2001).

Pelos efeitos benéficos da escória de siderurgia, tanto no solo, como na planta e, ainda, sem causar impacto ambiental, o uso agrícola da escória pode constituir tecnologia viável e de baixo custo. Portanto, tem-se elevado potencial para a reciclagem da escória de siderurgia de alto-forno e de aciária produzida no país, como fonte alternativa de corretivo e fertilizante.

Com o intuito de contribuir para o direcionamento de novas pesquisas na área, entende-se como prioritárias: a) pesquisas que pretendem estudar

metodologia específica para a determinação do poder neutralizante da escória de siderurgia e de reatividade de partículas de diferentes granulometrias; b) definir os benefícios do silício em variedades de cana-de-açúcar cultivadas em solos tropicais, em diferentes sistemas de produção e ainda, determinar o nível crítico de Si no solo e na planta. Outro aspecto importante é a necessidade de definição de extrator adequado para análise de Si nas diferentes escórias de siderurgia.

Referências bibliográficas:

ALCARDE, J.C. **Corretivo da acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA, 1992. 26p. (Boletim Técnico, 6).

AMARAL SOBRINHO, N. M. B., VELLOSO, A. C. X., COSTA, L. M., OLIVEIRA, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.9-16, 1997.

ANDERSON, D.L., SNYDER, G.H., MARTIN, G.G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on everglades histosols. **Agronomy Journal**, v.83, p.870-874, 1991.

AZIZIAN, M.F., NELSON, P. O. Lead sorption xemical by enhanced desorption, end equilibrium modeling in an iron-oxide-coated sanding synthetic ground water system. In: JENNE, E. A. **Adsorption of metals by geomedia: variables, mechanisms, end model applications**. Sandiego: Academic Press, 1998, Cap. 6, p. 165-180.

CAMPUS FILHO, M.P. Processos siderúrgicos. In: **Introdução à metalurgia extrativa e siderúrgica**. Campinas: Fundação de Desenvolvimento da Unicamp, 1981, p.122-153.

CANTINI, V.L.; SOUZA, L.F. Aplicações e mercado de rejeitos siderúrgicos da Companhia Siderúrgica Nacional. In: **SEMINÁRIO DE RECUPERAÇÃO DE REJEITOS DA INDÚSTRIA METALÚRGICA**, 1, 1989, Volta Redonda: CORENE; ABM, 1989, p.131-144.

CRANE, F.H. Acomparision of some effects of blast furnace slag and of limestone on acid soil. **Journal of the American Society of Agronomy**, v.22,

p.968-973, 1930.

DEFELIPO, D.V.; NOGUEIRA, A.V., LOURES, E.G.; ALVAREZ, V.V.H. Eficiência agrônômica de um resíduo de indústria siderúrgica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.127-131, 1992.

ELAWAD, S.H., GASCHO, G.J. STREET, J.J. Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, v.74, p.481-483, 1982.

FAO. **Production**. Roma. Disponível em: <http://apps.fao.org>. Acesso em 14 outubro 2003.

GOMES, M.A.F., RIBEIRO, A.C., COSTA, L.M., MOURA FILHO, W.M. Influência de ferro e alumínio amorfos do solo na reatividade de 4 corretivos de acidez. *Ceres*. v.43, p.444-453, 1996.

JENNE, E. A. Adsorption of metals by geomedia data analysis, models, controlling factors, end related issues. In: **Adsorption of metals by geomedia: variables mechanisms, end model application**. Sandiego: Academic Press, 1998, cap.1, p.1-73.

LOUZADA, P.T.C. **Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante do solo**. Viçosa, 1987. 52p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa.

MALAVOLTA, E. Corretivos cálcicos, magnesianos e calco-magnesianos. In: **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. São Paulo: Agrônômica Ceres, 1981, cap.5, p.232-235.

PIAU, W. C. **Variabilidade do uso das escórias com corretivo e fertilizante**. Piracicaba, 1991. 99p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

PIAU, W. C. **Efeito da escória de siderurgia e atributos químicos do solo e na cultura do milho (Zea mays L.)**. Piracicaba, 1995. 124p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura,

Universidade de São Paulo.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M., NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia na análise foliar, acúmulo e exportação de macronutrientes da cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, v.59, 2002.

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

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Resposta da cultura da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.201-209, 2001b.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M., NATALE, W. Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil. **Estudos na cultura da cana-de-açúcar**. p.33, 2001c.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Eficiência de escória de siderurgia em Areia Quartzosa na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.18, p.36-39, 2000.

VILELA, A. C. F.; MORAES, C. A. N. **Apostila do curso sobre escórias de aciaria elétrica**. Porto Alegre. Laboratório de Siderurgia, Universidade federal do Rio Grande do Sul, 1998, 46p.

Title:

AGRONOMIC USE OF BASIC SLAG

Abstract:

Modern civilization, in recent years, has increased the requirement of products derived from iron and steel, stimulating the growth of the national siderurgical sector and, consequently, the generation of industrial residue called basic slag. In this context, the recycling of residues can contribute to solve problems of the industries that give priority to the excellence of the production with quality. On the other hand, there is a sector of primary production in Brazil, the agriculture, with a great cultivated area in acid ground and with low fertility, being these factors admittedly determinative for vegetal production, under tropical

conditions. Thus, there is a scenery of two primary sectors of production, although distinct ones, that present interaction potential, for , on one hand, there is disponibility of a product with similar properties to the liming materials and traditional fertilizers and, on the other hand, a production sector that is highly dependent of these products. And the interaction between these two sectors helps in the preservation of the environment, bringing, thus, a certain sustainability in the production systems of the postmodern civilization that will be the challenge of this new century. Considering the current possibility of recycling these industrial residues in agriculture, three important factors have to be taken into account. The first would be the proper use of the abundant, available and promising industrial residue; the second, in a propitious agricultural environment, acid soil and low fertility; and third, in a responsive and important socio-economic culture, the sugar cane, considering its vast cultivated area. In national literature, few works have dealt with the use of the basic slag and have evaluated the reply of the cultures to its application. Thus, the present work had as its aim to gather information from literature concerning the characterization and production of basic slag in Brazil, as well as the agronomic viability of its use in sugar cane, pointing benefits in the liming of the soil and in the supply of nutrients and silicon.

Keywords: Basic Slag, Sugar Cane, Soil, Recycling.