

MANEJO DA ACIDEZ DO SOLO POR MATERIAL VEGETAL EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO CONSERVACIONISTAS

**MARIO MIYAZAWA, Químico, Dr, Pesquisador colaborador, IDR-IAPAR, PR
CEZAR FRANCISCO ARAUJO-JUNIOR, Eng. Agrônomo, Dr. em Ciência do Solo, Pesquisador do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, IAPAR-EMATER (IDR-Paraná)**

1 INTRODUÇÃO

As técnicas mais utilizadas no Brasil, até meado de século XX, para cultivos de plantas anuais eram queima de capoeiras após roçadas ou também restos culturais, aeração com tração animal, agricultura itinerante. Após década de 50 do século XX, iniciou-se preparo de solos com tratores, foi início de mecanização agrícola no Brasil. Causando decomposição da matéria orgânica do solo na região de clima tropical, e subtropical, aumento da erosão, queda na produtividade, inclusive diminuição da resposta aos fertilizantes químicos.

Nas décadas de 50 e 60 foram introduzidas novas tecnologias agrícolas no Brasil, tais como: mecanização agrícola, fertilizantes minerais e calagem entre outras técnicas. Nos primeiros 10 a 20 anos estas técnicas foram um sucesso devido ao aumento da produtividade bem como de área de produção agrícola. No entanto, os primeiros sinais de declínios das produtividades foram observados em culturas anuais como feijão, algodão e milho, mas também em cafezais e pastagens. As principais causas deste fenômeno foram a redução de teores das matérias orgânicas, a compactação de solos, o aumento da dispersão de argilas, o aumento da erosão hídrica e a diminuição da resposta a fertilizantes minerais.

A solução deste problema deu-se somente com a rotação de cultura e cultivo de adubos verdes que promoveram o aumento da matéria orgânica, e conseqüentemente a recuperação da produtividade agrícola. Mas, o maior avanço na agricultura brasileira ocorreu com a introdução do “sistema de PLANTIO DIRETO”, onde as sementes são efetuadas sobre restos das culturas antecedentes, sem incorporação no solo com implementos agrícolas como aração, gradação e rotativa (Casão Jr. 2006).

Assim, o Plantio Direto foi definido como sendo um sistema de semeadura, no qual, as sementes ou mudas são colocadas diretamente no solo não revolvido, usando-se máquinas especiais (DERPSCH, 1984). Este autor ressaltou ainda que os sulcos ou

covas a serem abertos devem ter profundidade e largura suficientes para garantir uma boa cobertura e contato das sementes e mudas com o solo e, não mais de 25–30 % da superfície solo seja revolvida.

O Sistema Plantio Direto é a principal técnica para o manejo conservacionista dos recursos naturais, incluindo o solo e água nas regiões tropicais e subtropicais do Brasil por proporcionar benefícios agronômicos, econômicos e ambientais. Quando o Sistema Plantio Direto é bem executado, com a sequência de culturas diversificadas estabelecidas corretamente, com revolvimento mínimo do solo apenas na linha de semeadura, corretivos e fertilizantes depositados na camada superficial, sem haver incorporação mecânica para posterior incorporação biológica e aporte de resíduos culturais tanto na superfície quanto na subsuperfície por meio do sistema radicular da culturas, este sistema de manejo do solo é eficiente para minimizar os efeitos da erosão hídrica acelerada, da compactação do solo e potencializa a fertilidade do solo por contribuir para os atributos físicos, químicos e biológicos.

O início do Sistema Plantio Direto na América Latina e no Brasil surgiu de experiências realizadas nos anos de 1971 e 1972 pela Missão Agrícola Alemã por meio da German Technology Agency (GTZ) junto ao Instituto de Pesquisa e Experimentação Agropecuária Meridional (IPEAME) vinculado ao Ministério da Agricultura no município de Londrina, Mesorregião Norte do Estado do Paraná com a cultura do trigo, sob a direção do Engenheiro Agrônomo Francisco Terazawa do extinto (DERPSCH, 1984; MUZILLI, 1985; BORGES, 1993; SPERATTI; TURMEL; CALEGARI; ARAUJO-JUNIOR; VIOLIC; WALL; GOVAERTS, 2015).

No verão do ano de 1971, as pesquisas com sistema de manejo do solo para a cultura da soja estenderam-se para a Estação Experimental do IPEAME em Ponta Grossa, Mesorregião Centro-Oriental do Estado do Paraná. Nesta região, os primeiros resultados com a cultura da soja foram promissores (BORGES, 1993) e a partir do ano de 1973, com a cultura do trigo na mesma localidade (DERPSCH, 1984).

No Brasil, o uso da técnica do Plantio Direto passou de 1.000 hectares nos anos de 1973/1974 para 400.000 hectares em apenas 10 anos (DERPSCH, 1984). A partir de dados dos Censos Agropecuários dos anos 2006 e 2017, FUENTES-LANILLO (2021) verificaram que a área sob sistema plantio direto no Brasil aumentou 84,9 %, passando de 17,87 milhões de hectares declarados no ano de 2006 para 33,05 milhões de hectares no ano de 2017. Os autores ressaltaram ainda que a expansão da área sob sistema

plantio direto ocorreu em todas as regiões do país, sendo o maior crescimento de 110 % registrado na região Centro-Oeste.

Apesar do aumento expressivo da área sob plantio direto em todas as regiões do Brasil (FUENTES-LANILLO et al., 2021), em um levantamento recente realizado no estado do Paraná referente as safras 2016/2017; 2018/2019; 2019/2020 e 2020/2021, apenas 9 % das áreas com culturas anuais utilizam espécies alternadas na safra de verão (POSSAMAI et al., 2022) tal prática compromete o desempenho do sistema de produção já que rompe um dos fatores chaves para o sucesso do sistema plantio direto.

O sistema de plantio direto difundiu-se em quase todos Estados brasileiros, pela redução de custo de plantio, a possibilidade de plantio concomitante com a colheita do cultivo anterior, e a permanência dos resíduos pós-colheita na superfície do solo que reduzem a evaporação da água, a erosão hídrica, redução das plantas daninhas entre outros efeitos benéficos deste método. Porém, deve-se ressaltar que o PLANTIO DIRETO tornou-se viável somente com a evolução da tecnologia das máquinas agrícolas como semeadeiras e pulverizadores, bem como de herbicidas, fungicidas e outros (CASÃO Jr et al, 2006).

Entretanto, os produtores tinham várias dúvidas que permaneceram por longo tempo foram em relação à calagem em plantio direto no diz respeito a quanto, onde e quando aplicar o calcário para correção da acidez do solo. Além disso, considerando que o PLANTIO DIRETO não remove o solo com implementos agrícolas, como incorporar o calcário até a camada subsuperficial? Como fica o pH da superfície do solo pela aplicação superficial do calcário? Qual seria a frequência de reaplicação de calcário após instalação de plantio direto?

Neste contexto, este capítulo faz uma revisão de trabalhos que estudaram os possíveis mecanismos envolvidos nas reações da acidez e no transporte de Ca e Mg até camada subsuperficial dos solos ácidos, por resíduos vegetais que podem auxiliar na compreensão dos fenômenos associados ao processo de calagem.

PROVÁVEIS MECANISMOS DA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO POR TECIDOS VEGETAIS

A acidez dos solos prejudica desenvolvimento radicular de plantas comerciais, tais como: milho, trigo, feijão, algodão e outros, podendo causar grave danos nas produções agrícolas. Assim, a acidez dos solos em si até pH 4,0 não costuma causar problemas

para maioria das plantas cultivadas, no entanto, a solubilização do Al^{3+} em solos ácidos é responsável pela toxicidade no desenvolvimento radicular de plantas (NOLLA e ANGHINONI, 2004). A Figura 1 ilustra este fenômeno onde se observa a distribuição das espécies de Al na solução aquosa. Entre todas as espécies de Al solúveis, somente Al^{3+} causa toxicidade ao desenvolvimento radicular, e na região de pH 5,0 o seu teor é em torno de 0,4 μM .

A adição de calcário por meio da calagem é a principal técnica para controle da acidez de solos ácidos nos ambientes tropicais e subtropicais. A dissolução do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) na forma de calcário calcítico em solos ácidos, forma o cálcio (Ca^{2+}) e dois ânions (OH^- e HCO_3^-), sendo que o bicarbonato (HCO_3^-) é transitório devido a sua decomposição em dióxido de carbono (CO_2) e água (ZIGLIO; MIYAZAWA; PAVAN, 1999; MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2002). Quando se adiciona o calcário no solo ácido, ocorre a neutralização da acidez de Al^{3+} conforme reação:



$Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$, formando o precipitado devido ao aumento de pH, que é uma espécie insolúvel em água.

O fenômeno de neutralização da acidez do solo pode ser dividido em:

- a) neutralização da acidez por tecidos vegetais;
- b) reações químicas da neutralização da acidez do solo;
- c) neutralização acidez do solo subsuperficial.

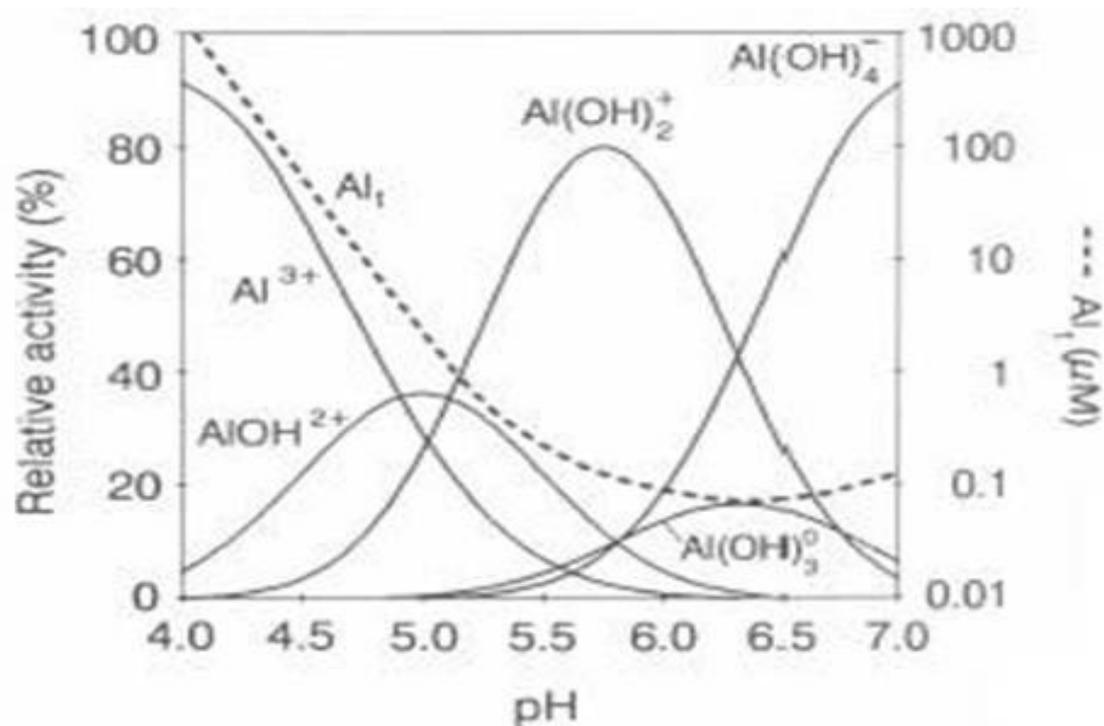


Figura 1- Diagrama de distribuição das espécies de Al em função do pH na solução aquosa (Fonte: Kinraide, 1991).

[Experimentos de laboratório, casa-de-vegetação e a campo foram realizados para estudar o potencial de neutralização da acidez do solo por meio da adição de resíduos vegetais.](#)

1) Experimentos preliminares

Experimentos no campo: Experimentos realizados por pesquisadores do IAPAR com cultivo de adubos verdes resultaram em aumento de produtividade dos produtos agrícolas como soja, feijão e milho, bem como na redução da acidez do subsuperficial, pH e H^+ Al e aumento de Ca (DERPSCH; CALEGARI, 1992).

Pavan et al., 1999, avaliaram densidade populacional de cafeeiro no acúmulo da matéria orgânica, foram: 893, 1429 e 7143 plantas/ha, no Estação Experimental do IAPAR, em Londrina. Após 15 anos de cultivo, foi observado um aumento de carbono orgânico na densidade de 7143 planta/ha e menor para 893 planta/ha, os valores foram: 14,5 g/kg e 11,1 g/kg, respectivamente. Os valores de pH foram: 5,5 e 3,7, respectivamente e o valor de Al tocável foram: 30,0 mmol kg⁻¹ e 0,1 mmol kg⁻¹, respectivamente (Tabela 1). Os autores atribuíram o aumento do carbono orgânico no

tratamento de maior população, 7143 plantas ha⁻¹, na neutralização da acidez e Al trocável pelo aumento da matéria orgânica, causada pela redução da incidência da radiação solar por sombreamento.

Densidade, planta/ha	893	1420	7143
C, g kg ⁻¹	11,1	11,2	14,5
pH, (H ₂ O)	3,7	4,0	5,5
Al, mmol kg ⁻¹	30,0	23,0	0,1

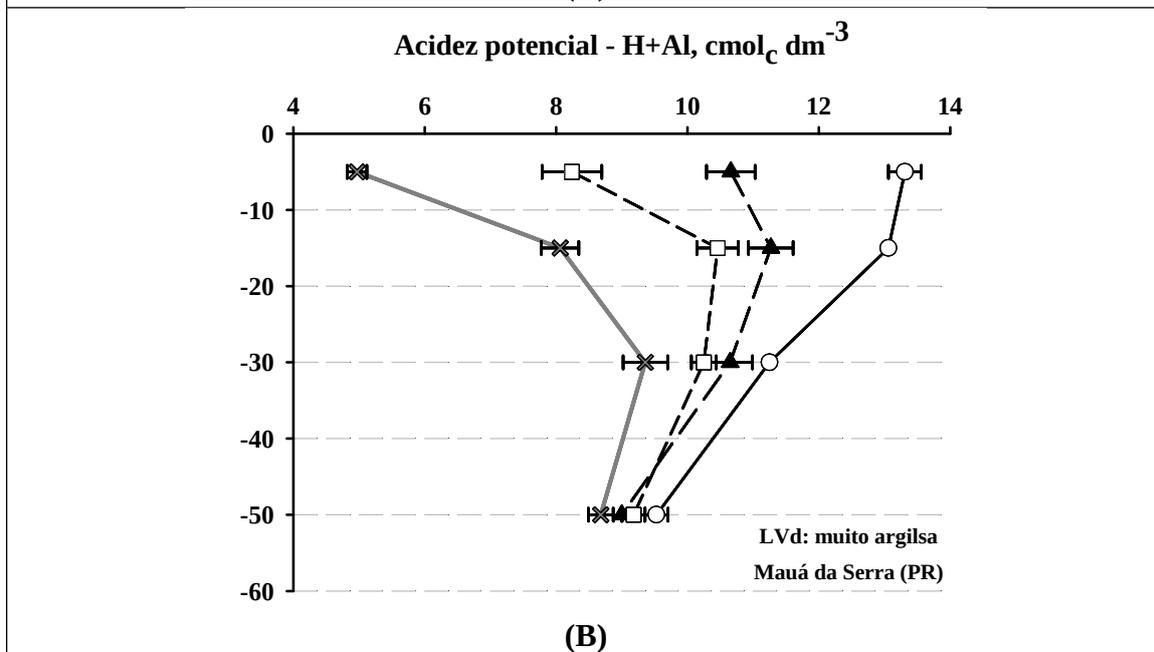
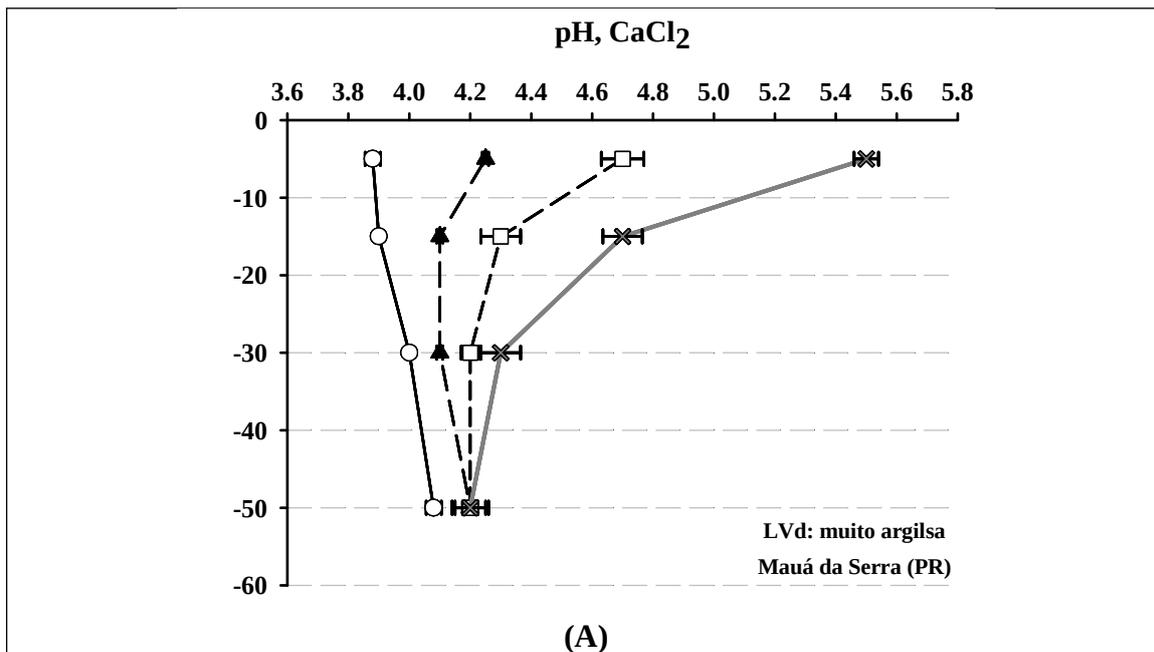
Tabela 1- Densidade populacional de pé de cafeeiro, planta/ha, na acidez do solo.

O calcário aplicado na superfície do solo submetido a sistemas de produção conservacionistas sem a incorporação mecânica e sem a adição de resíduos vegetais apresenta baixa mobilidade no perfil do solo e eficiência pequena na redução da acidez subsuperficial.

Em um experimento a campo para avaliar as doses de calcário no manejo da acidez de um LATOSSOLO VERMELHO Tb Distrófico, textura muito argilosa do município de Mauá da Serra (PR), os resultados das análises químicas do solo demonstraram que os atributos químicos de acidez foram corrigidos principalmente na camada de 0–20 cm de profundidade 36 meses após a aplicação do corretivo.

O calcário dolomítico aplicado nas doses de 2,6; 5,2 e 10,4 Mg ha⁻¹, que corresponde a 25 %, 50 % e 100 % de equivalente a acidez potencial (H + Al) do solo, quando comparado ao controle sem aplicação do calcário. Os resultados permitiram observar que mesmo na dose 10,4 Mg ha⁻¹, os atributos químicos pH em CaCl₂ e acidez potencial foram corrigidos na camada de 0–20 cm de profundidade (MIYAZAWA et al., 2003).

Os dados apresentados na Figura 2, permitem observar que a aplicação de calcário na superfície de um LATOSSOLO VERMELHO Tb Distrófico, textura muito argilosa do município de Mauá da Serra (PR) nas doses equivalente a 2,6; 5,2 e 10,4 Mg ha⁻¹ que correspondem a 25 %, 50 % e 100 % da acidez potencial (H+Al) proporcionaram alterações da acidez das colunas de solo nas camadas superficiais (0–10 cm e 10–20 cm), bem como na camada subsuperficial (20–40 cm) quando comparadas às colunas sem aplicação do calcário (Controle).



- Controle (sem calcário)
- ▲— Dose 2,6 Mg/ha (25 % H + Al)
- Dose 5,2 Mg/ha (50 % H + Al)
- ×— Dose 10,4 Mg/ha (100 % H + Al)

FIGURA 2. pH do solo em CaCl₂ (A) e acidez potencial – H + Al (B) determinadas em amostras de um LATOSSOLO VERMELHO Tb Distrófico, textura muito argilosa extraídas das colunas em diferentes profundidades, 36 meses após a aplicação superficial do calcário em diferentes doses para neutralizar a acidez potencial. As barras na horizontal representam o erro padrão da média.

Fonte: “Adaptado de Miyazawa et al., 2003”

Experimento em casa de vegetação:

Em outro experimento de incubação do solo ácido com tecidos vegetais analisou-se a amostra do solo ácido Latossolo roxo coletado na mata da Estação Experimental do IAPAR (Londrina-PR), da camada de 20 a 40 cm. As amostras de tecidos vegetais analisadas foram nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), palha de soja (*Glycine max*) e palha de trigo (*Triticum aestivum*), secadas em estufa a 65°C, trituradas e passadas na malha de 1,0 mm. Os resultados das propriedades químicas dos resíduos vegetais estão apresentados na Tabela 2 (FRANCHINI et al. 1999).

TABELA 2. Conteúdo de macronutrientes em tecido vegetal de nabo forrageiro, palha de soja e palha de trigo adicionados ao LATOSSOLO VERMELHO Tb Distroférrico, textura muito argilosa (80 dag kg⁻¹ de argila).

Macronutriente	Nabo Forrageiro	Palha de soja	Palha de trigo
	g/kg		
Nitrogênio	29,4	12,0	4,2
Fósforo	3,2	1,2	0,2
Potássio	32,8	10,6	2,0
Cálcio	19,3	5,3	1,1
Magnésio	3,9	5,9	0,4

Em seguida, transferiu-se 1,0 kg deste solo para vaso plástico de 2 kg, onde adicionou-se 2,0 e 4,0 %, m/m, de resíduo vegetal que foram incubados com umidade de capacidade de campo, e posteriormente analisados aos 15, 30, 60 e 90 dias. (Tabela 3).

Tabela 3: Análise química dos solos após 90 dias de incubação, valores médios de 4 períodos.

Material	dose g/kg	pH CaCl ₂	H+Al --- mmol kg ⁻¹ ----	Σ base
Controle	---	4,6	53,2	5,6
Nabo forrageiro (nabo)	20	6,2	26,7	40,0
	40	6,7	25,6	59,9
Palha de soja (soja)	20	5,4	36,2	26,0
	40	5,8	27,6	43,1
Palha de trigo (trigo)	20	5,1	49,1	11,2
	40	5,2	47,1	14,2

Os resultados demonstraram que o pH de todos os solos incubados com doses e espécies de resíduos vegetais apresentaram um aumento nos valores de pH. No entanto, quando o material apresentava baixos teores de Ca, Mg e K como o do trigo, os incrementos no pH foram mínimos; por outro lado, a amostra do nabo forrageiro com altas concentrações de cátions, na dose de 40 g/kg, apresentou maior aumento de pH quando comparado ao grupo controle (pH 6,7 e 4,6, respectivamente). Assim como, a diminuição do H+Al do solo seguiu a mesma tendência do pH no grupo de maior dose de nabo forrageiro, passando de 53,2 mmol kg⁻¹ para 25,6 mmol kg⁻¹ (controle e tratado, respectivamente).

Portanto, a neutralização da acidez e a diminuição de H+Al não se explica pelo aumento do teor de carbono total do solo. Assim, para se entender melhor a neutralização da acidez no perfil dos solos ácidos, analisaram-se as reações químicas do material vegetal e do extrato de plantas.

2) Neutralização de H⁺ e OH⁻ da solução por tecidos vegetais

Para a neutralização da alcalinidade (acidificação) dos solos pode-se utilizar várias técnicas, como por exemplo, aplicação de NH₄⁺, ureia, esterco de animais e material vegetal compostados na região semiárida e alcalinas da Ásia, (Tailândia, Índia) (ADCOCK, et al. 2007). Entretanto, experimentos desenvolvidos no IAPAR demonstraram que os resíduos vegetais neutralizam (alcalinização) acidez dos solos, destacando se em adubos verdes (MIYAZAWA et al. 1993). Estes efeitos contraditórios dos resíduos vegetais na correção de pH dos solos alcalinos e outro dos solos ácidos, requer pesquisas para compreender melhor as reações químicas nas duas condições opostas dos solos.

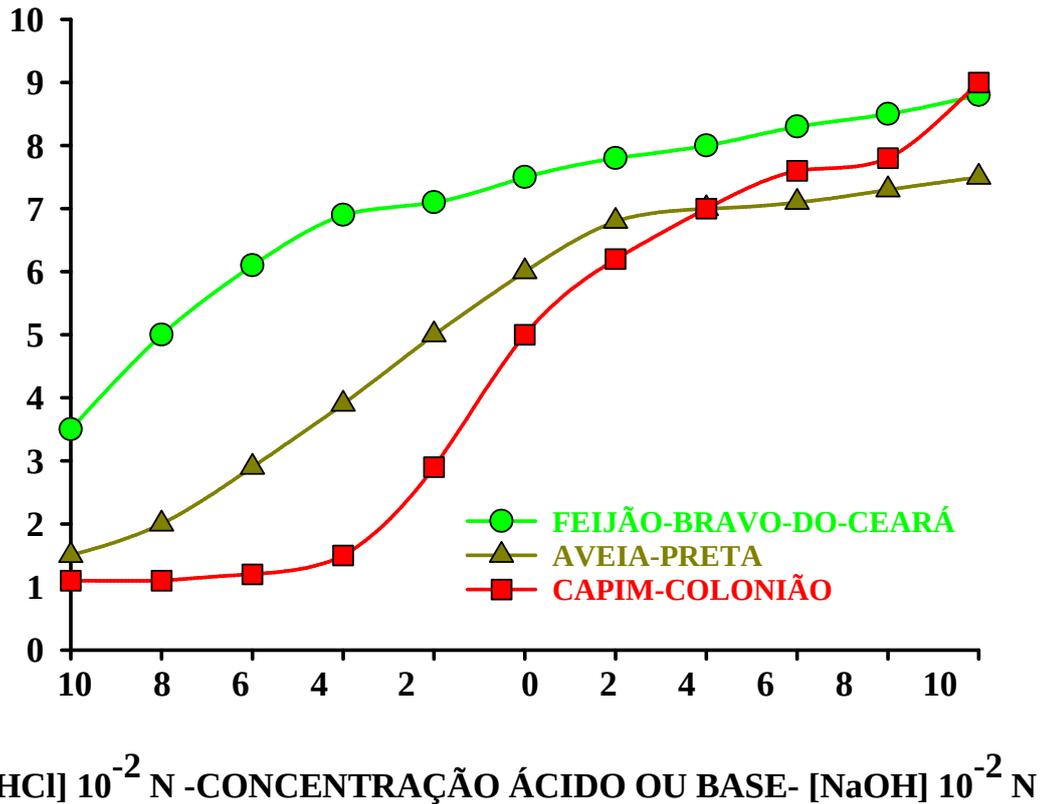
As amostras de feijão bravo do Ceará (Ceará) (*Canavalia brasiliense*), colza (*Brassica napus*), avia preta (aveia) (*Avena strigosa*), azevém (*Lolium multiflorum*) e capim colônia senescente (colônia) (*Panicum maximum*) foram secadas a 65 °C, trituradas e passadas peneira de 1,0 mm. Foi transferido 1,0 g da amostra em 10,0 mL da solução de H⁺ e OH⁻ e agitou-se por 15 minutos a 1500 rpm três vezes por dia, durante dois dias e determinou-se pH da suspensão. As soluções utilizadas foram: 0,0; 20, 40, 60, 80 e 100 mMol de HCl e NaOH (MIYAZAWA et al, 1993).

O pH das soluções de HCl 20 mMol e 100 mMol são 1,7 e 1,0, respectivamente, e das soluções de NaOH 20 mMol e 100 mMol são 12,3 e 13,0, respectivamente. A neutralização ocorre tanto com o aumento do pH das soluções de HCl pela adição de tecidos vegetais quanto pela diminuição de pH pela adição de soluções de NaOH, pois os pH de ambas as situações tendem para 7,0.

Os valores de pH das suspensões de resíduos vegetais em água pura variaram de 4,5 (azevém) a 7,3 (feijão bravo do Ceará), estas duas plantas apresentaram poder tampão nas diferentes regiões, uma na ácida e outra na alcalina. Os valores de pH pela adição de 1,0 g da amostra Ceará nas soluções de 100 e 60 mM de H⁺ foram pH 3,5 e pH 6,2, respectivamente e nas soluções de OH⁻ foram pH 8,3 e pH 8,5, respectivamente. E, a adição de 1,0 g da amostra azevém nas soluções de H⁺ foram pH 1,3 e pH 2,3, respectivamente e nas soluções de OH⁻ foram pH 4,9 e pH 5,0, respectivamente (Figura 3).

A comparação dos resíduos destas duas plantas, demonstraram que a amostra Ceará apresentou alta capacidade de neutralizar H⁺ (20 a 60 mMol L⁻¹) e baixa capacidade para OH⁻ e, por outro lado, a amostra azevém mostrou baixa capacidade na neutralização de

H^+ e alta capacidade na neutralização de OH^- (10 a 60 $mMol L^{-1}$). Portanto, a adição de resíduos vegetais de feijão bravo do Ceará em solos ácidos apresenta maior capacidade de neutralizar acidez, ao passo que, a adição de azevém é mais eficiente para reduzir pH dos solos alcalinos. Porém o resíduo de colonião apresenta baixa capacidade na neutralização de H^+ e OH^- .



2

Figura 3: Curva de neutralização dos extratos de plantas com as soluções de HCl e NaOH 20 a 100 mM.

3) Poder da neutralização do H⁺ por material vegetal

Baseado no princípio anteriormente descrito, determinou-se o poder de neutralização de solução de H⁺ do material vegetal.

Foram transferidos 2,5 g de amostra em frasco de 125 mL, adicionou-se 50,0 mL de HCl 0,10 M, que foi agitado por 15 minutos a 1500 rpm, três vezes por dia, durante dois dias, e em seguida, filtrado. Transferiu-se 40,0 mL do filtrado para Erlenmeyer e titulou-se com NaOH 0,05M de pH 3,5 até pH 7,0, com auxílio de pH-metro.

Nota: O pH do extrato com HCl 0,1 M foi ajustado até pH 3,5 com NaOH 0,05M. O volume gasto na titulação com NaOH 0,05M foi considerado a partir de pH 3,5 até pH 7,0. Na região de pH 3,5, onde a maioria dos grupos carboxílicos estão protonados (Young et al. 1981). Assim, poderia utilizar-se titulação indireta pela adição de 20 mL de NaOH 0,2 M aos 40 mL do extrato e titular-se o excesso de OH⁻ com HCl 0,1M, do pH alcalina até pH 3,5. Mas, a solução alcalina absorve o CO₂ da atmosfera e neutraliza OH⁻, ocorrendo superestimação do resultado, por isso optou-se utilizar titulação com NaOH.

Os resíduos vegetais que apresentaram maiores capacidades de neutralizações foram das amostras Ceará e ervilhaca (1000 mEq kg⁻¹ e 870 mEq kg⁻¹, respectivamente), e a menor foi de colônia (160 mEq kg⁻¹) (figura 4). Para efeito comparativo, a capacidade de neutralização do CaCO₃ é de 20.000 mEq kg⁻¹. Deve-se ressaltar que a capacidade da neutralização de H⁺ por tecidos vegetais ocorre em função das espécies (exemplo: adubos verdes são mais eficientes que resíduos de pós colheita de trigo ou de milho), da idade fisiológica (exemplo: tecidos de idade de floradas são mais eficientes pós colheita) e do tipo de tecido vegetal (exemplo: material lignificados são menos eficientes do que celulosas).

Este teste de H⁺ e/ou OH⁻ dos tecidos vegetais auxilia na seleção de plantas de cobertura (adubos verdes ou resíduos vegetais), bem como da definição da época de manejo com máxima produção de massa seca e máxima capacidade na correção de acidez e/ou alcalinidade dos solos. É um método simples, de baixo custo e sem risco à saúde dos analistas, podendo ser realizado tanto por produtores quanto nas cooperativas.

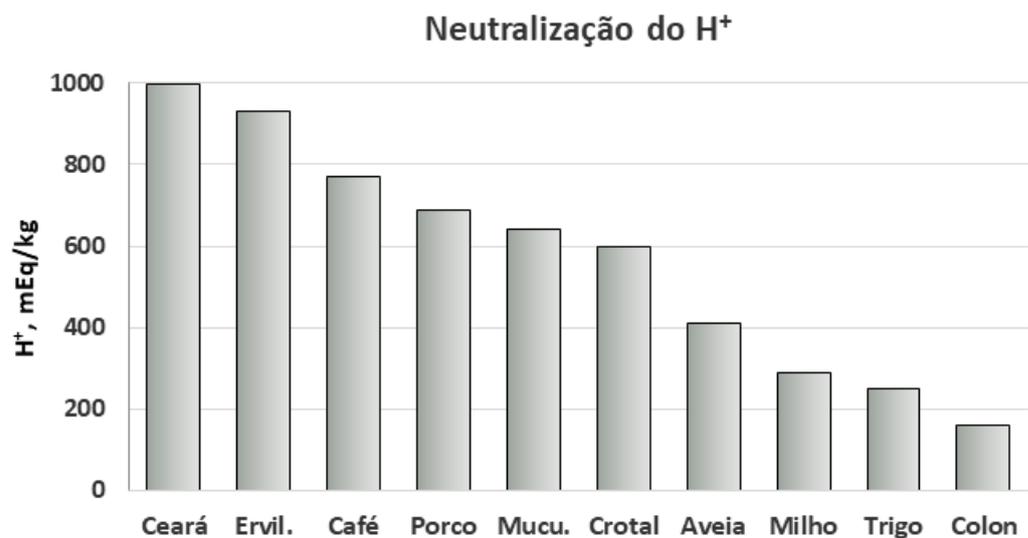


Figura 4- Resíduos vegetais na neutralização da acidez ativa, H⁺.

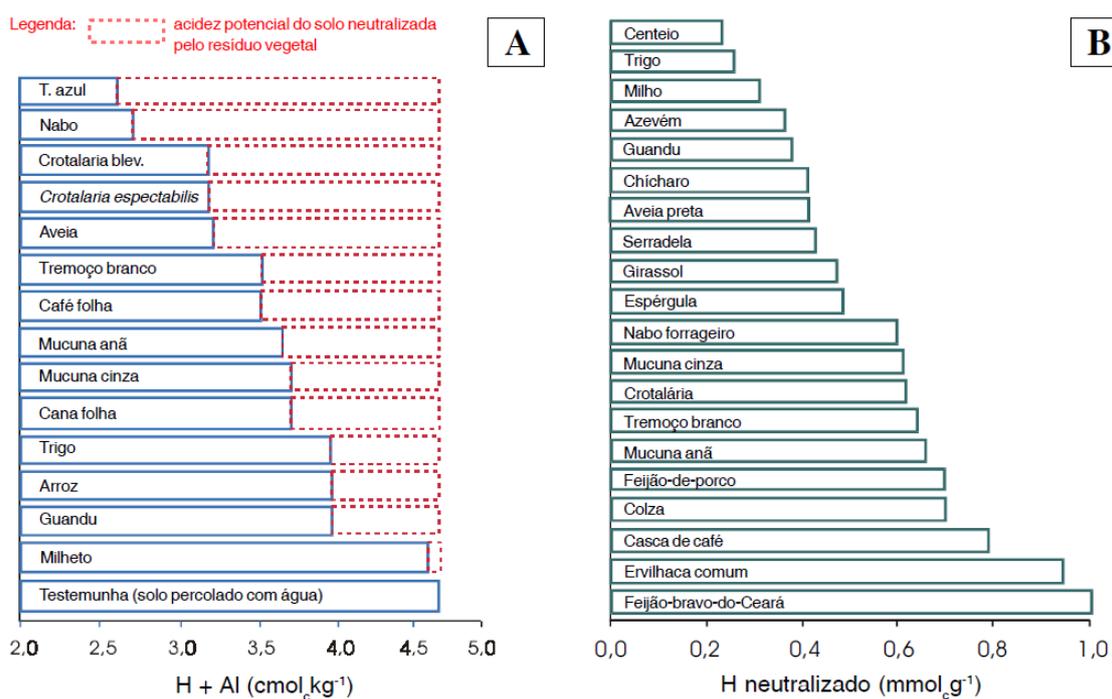


FIGURA 4. Neutralização da acidez potencial do solo (A) e da solução de HCl por resíduos vegetais (B).

Fonte: “Adaptado de Miyazawa et al., 1993; 2000; Cassiolato et al., 1999”

4) Dinâmica da neutralização da acidez do solo por material vegetal

Para esta análise, acompanhou-se a alteração do pH dos solos incubados durante 13 meses com diferentes tipos de material vegetal. Os teores de cátions dos materiais estão na Tabela 3.

Tabela 3- Teores iniciais de Ca, Mg e K nos diversos tecidos vegetais

Material Vegetal	Folha Café	Mucuna cinza	<i>Canavalia brasil.</i>	Pó de serra	Descar. soja	Palha milho
	----- g kg ⁻¹ -----					
Ca	10,15	9,70	31,93	2,33	3,43	5,70
Mg	3,58	2,48	3,23	0,43	2,20	3,53
K	29,00	28,50	23,50	1,25	16,00	11,50

Transferiu-se 5,0 kg de solo ácido (pH 4,3; H+Al 9,0 cmol kg⁻¹ e soma das bases 10,45 cmol kg⁻¹) Latossolo distroférico para um vaso plástico de 5 L, e adicionou-se 100 g de tecido vegetal em partículas < 1,0 mm (5,0% m/m). As amostras foram incubadas durante 13 meses com umidade de capacidade de campo, e foram coletadas 100 g de amostra aos 2, 10, 30, 60, 120, 210, 300 e 390 dias, que foram secadas na estufa a 60 °C e trituradas em partículas < 2,0 mm. A seguir, foi determinado o pH em CaCl₂ 0,01M. Os tecidos vegetais avaliados foram folha de café (café), mucuna cinza no florescimento (mucuna), *Canavalia brasilienses* no florescimento (Ceará), pó de serra (serra), descarte de grão de soja (soja) e palha de milho pós colheita (milho).

O tecido da amostra Ceará apresentou maior aumento de pH desde o início da incubação, aos 2 dias (pH 5,0), atingindo o pico máximo aos 30 dias (pH 6,6) e no final do experimento no dia 300, o pH foi de 4,8. A amostra da soja apresentou curva semelhante da neutralização da acidez. A adição de pó de serra não alterou pH do solo durante todo período de incubação. As demais amostras de café, mucuna e milho apresentaram valores intermediários na neutralização de acidez (figura 5).

Todos os outros materiais que promoveram neutralização de acidez do solo, apresentado ligeiro aumento até 10 dias de incubação com valores máximos aos 30 a 120 dias, retornaram aos valores de pH próximo do inicial após 300 dias de incubação.

Os resultados indicaram que, em geral, todo material vegetal tem maior ou menor poder neutralizante de acidez dos solos, porém com ação transiente, isto é, após a decomposição dos tecidos vegetais e compostos orgânicos por microrganismos, o pH dos solos retornam aos valores próximo dos originais. Este fenômeno pode ser observado também na extração de madeiras florestais de pinus e eucaliptos, onde após o corte das árvores, as serrapilheiras são decompostas e retornam ao pH original do solo (acidificação).

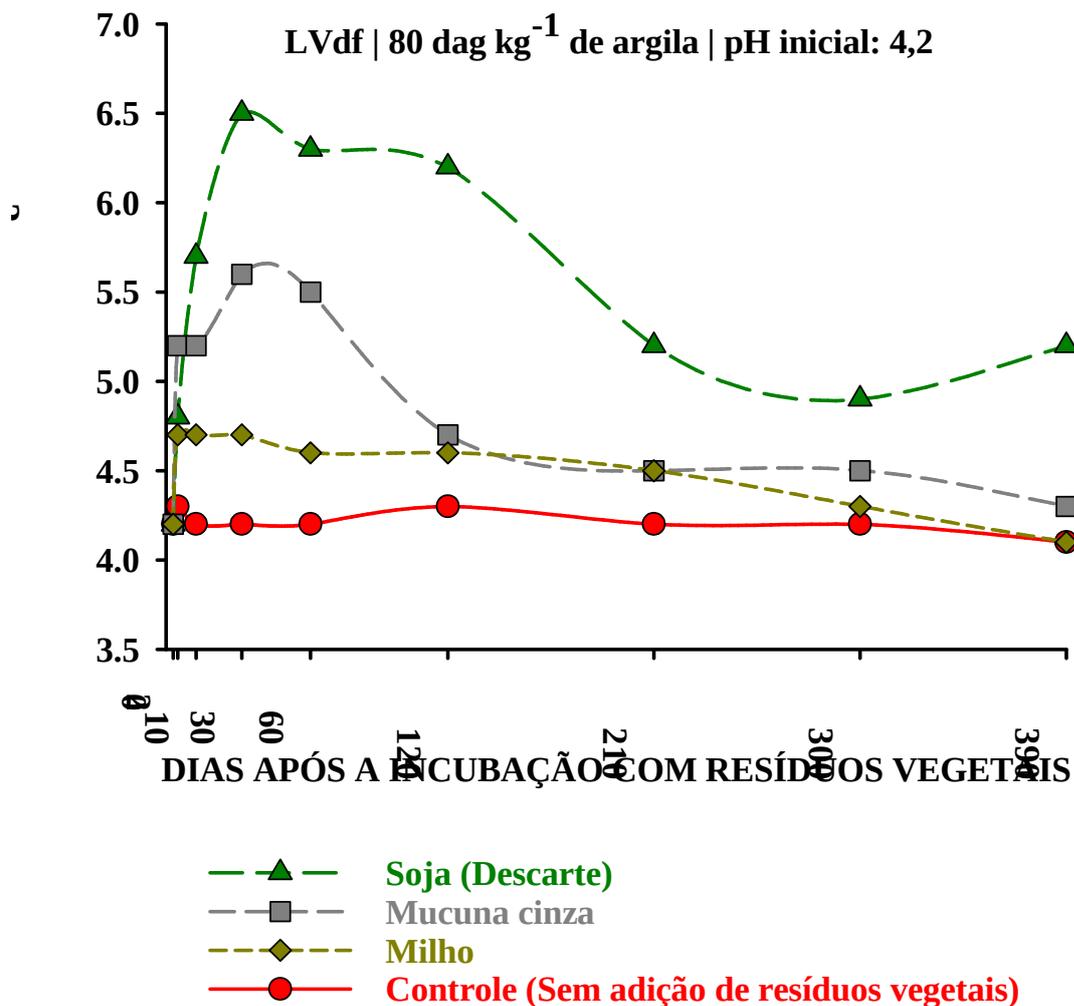


Figura 5: pH de um LATOSSOLO VERMELHO Tb Distroférico, textura muito argilosa após incubação com 5 % m/m resíduos vegetais durante 13 meses (390 dias).

A diferença entre a neutralização da acidez do solo por material vegetal e do calcário é a necessidade frequente de reposição de tecidos vegetais. Por outro lado, a neutralização da acidez do solo por calcário, CaCO_3 e/ou $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, é permanente. Ou seja, uma vez corrigida a acidez do solo com calcário, o pH do solo permanece inalterado por tempo indeterminado, desde que não haja lixiviação de cátions e/ou extrações de produtos agrícolas

5) Idade fisiológica de plantas na composição química

As idades fisiológicas das plantas alteram teores de nutrientes, no início do desenvolvimento absorvem os nutrientes dos solos (N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe) e da atmosfera (C, O, H e N) e sintetizam compostos orgânicos para seus desenvolvimentos nas reproduções. Na fase de desenvolvimento, as plantas acumulam os compostos sintetizados mas na fase da reprodução, transferem os para formação de frutos ou sementes. Por isso, na idade de floração, geralmente estão no estágio de máximo desenvolvimento e máximo de nutrientes. Os tecidos vegetais que apresentaram maior poder de neutralizar acidez do solo foram aqueles com maiores teores de cátions. Um dos parâmetros que definem a qualidade de forrageira para gado são teores de nutrientes N, P, Ca, Mg e K do material, por isso requer corte na época de maiores teores.

A qualidade de capim pensacola (*Paspalum notatum* Fluegge var. sauræ Parodi) foi avaliada em diferentes épocas de corte, aos 20, 35, 50, 65, 80 e 95 dias (HADDAD; DOMINGUES; CASTRO; TAMASSIA, 1999). Os autores verificaram teores de Ca = 3,06 g kg⁻¹, Mg = 2,44 g kg⁻¹ e K = 21,5 g kg⁻¹ foram maiores aos 35 dias, diminuindo os valores com avanço de idades, aos 95 dias, foram: 2,17; 1,81 e 17,2 g/kg, respectivamente.

Os teores de cátions solúveis em amostras de nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), aveia preta (*Avena strigosa*) e tremoço branco (*Lupinus albus* L.) foram avaliados aos 60, 90 e 120 dias de idade pós emergência (FRANCHINI et al., 2003). As amostras foram secadas a 65 °C, trituradas e passadas na malha de 1,0 mm e determinadas os teores de Ca, Mg e K.

Os resultados das análises químicas demonstraram que independente da idade das plantas, o nabo forrageiro proporcionou maiores conteúdos de cátions (cálcio, magnésio e potássio) solúveis do que a aveia-preta e tremoço-azul.

Os teores de Ca em amostras de nabo e aveia diminuíram de 444 mg kg⁻¹ em 60 dias, e para cerca de 330 mg kg⁻¹ em 120 dias; mas, as reduções nos teores de Mg foram baixas. Entre os cátions, o K apresentou maiores reduções com avanço da idade de todas as plantas, por exemplo, a aveia reduziu de 1411 mg kg⁻¹ em 60 dias, para 751 mg kg⁻¹ em 120 dias, e no tremoço foi de 991 mg para 270 mg kg⁻¹ nos mesmos períodos (Figura 6).

Os resultados obtidos demonstraram redução nos teores de cátions das plantas conforme o avanço de idade fisiológica das plantas (FRANCHINI; 2003). Esses autores

demonstraram ainda que, os extratos obtidos das plantas de nabo forrageiro, aveia-preta e tremoço azul aos 60 e 75 dias após a semeadura foram mais efetivos em aliviar a acidez do solo. Além disso, o extrato da aveia-preta demonstrou maior capacidade para mobilização do cálcio e o do nabo forrageiro para neutralizar o alumínio tóxico às plantas.

Os resultados corroboram com os dados de HADDAD, DOMINGUES, CASTRO E TAMASSIA (1999), mostrando reduções dos teores de cátions de plantas, conforme avanço de idade fisiológica. Portanto, a definição da idade fisiológica de manejo de planta é função do objetivo de cada produtor para obter máximo do benefício de plantas de coberturas, tais como: neutralização de acidez, cobertura morta, redução da erosão e outros.

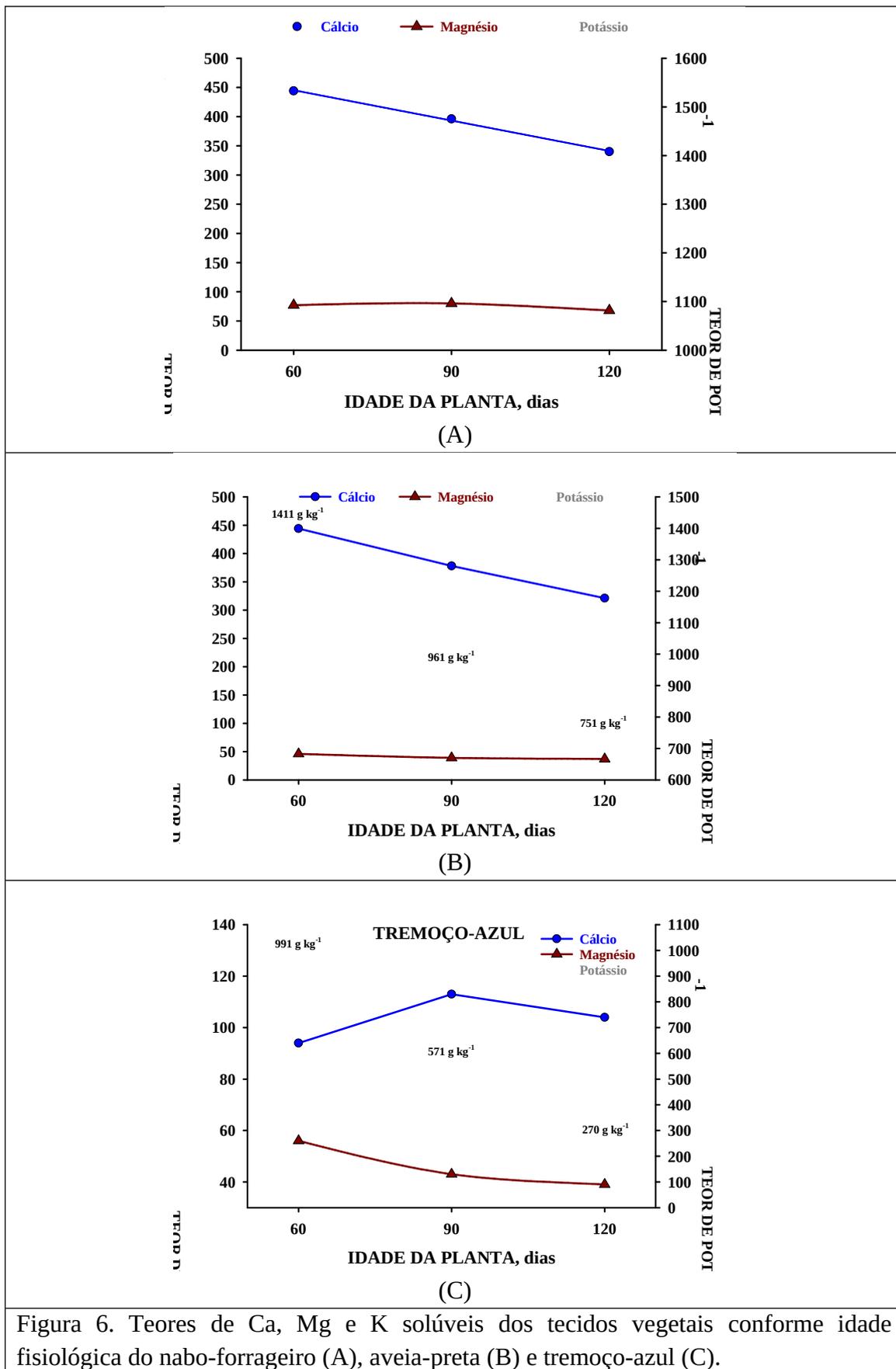
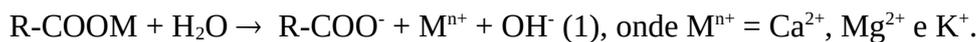


Figura 6. Teores de Ca, Mg e K solúveis dos tecidos vegetais conforme idade fisiológica do nabo-forrageiro (A), aveia-preta (B) e tremoço-azul (C).

6) Neutralização da acidez dos solos por ligantes orgânicas dos resíduos vegetais

As alterações da fertilidade química dos solos ácidos observadas até na camada subsuperficial em plantio direto e pelo cultivo de adubo verde são promovidos por ácidos orgânicos presentes nos resíduos vegetais.

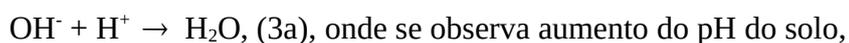
Alguns compostos orgânicos dos tecidos são solubilizados pela água da chuva e transferidos para o solo, e as principais substâncias orgânicas solubilizadas são açúcares, fenólicos, aminoácidos e ácidos orgânicos. Dentre estas substâncias, somente os ácidos orgânicos estão nas formas de sais de Ca, Mg e K. Os ácidos orgânicos são fracos, isto é, apenas uma fração está dissociada, portanto funcionam como tampões; o grau de dissociação de ácidos orgânicos é representado pK_a , conforme reação abaixo, onde os sais de ácidos orgânicos dos tecidos vegetais apresentam-se na forma de $R-COOM^{n+}$ (reação 1):



Uma vez que os ácidos orgânicos são fracos, tendem para forma protonada (reação 2):



E, o grupo OH^- formado na reação 2 reage com H^+ e Al^{3+} dos solos, neutralizando a acidez dos solos (reações 3a e 3b),



As reações da neutralização da acidez dos solos são estequiométricas, ou seja, um equivalente de $-RCOO^-$ neutraliza um H^+ , podendo ser utilizado a mesma equação para o cálculo da necessidade de calcário.

Os sais dos tecidos vegetais apresentam-se nas formas de mono, di e tricarbônicos. Alguns exemplos destes ácidos são:

Mono: acético, fórmico, láctico, valérico, málico, salicílico, vanílico;

Di: oxálico, maléico, málico, succínico, fumálico, tartárico, azelaico;

Tri: cítrico e aconítico.

As concentrações destes ácidos nos tecidos vegetais variam muito conforme a espécie, o tipo de tecido e a idade fisiológica. Por isso, uma mesma quantidade de tecido vegetal depositada na superfície do solo ácido tem diferentes alterações de pH, Al^{3+} , H^+ , Ca e Mg de acordo com a qualidade do material.

FRANCHINI et al. (2001) identificaram os ácidos orgânicos solúveis em amostras de nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), tremoço azul (*Lupinus angustifolius*) e aveia preta (*Avena strigosa*), e os principais ácidos encontrados foram cis-aconítico, cinâmico, cítrico, ferúlico, maleico, málico, succínico, α -tolúico, vanílico, entre outros.

Posteriormente, ao avaliar-se teores de ácidos em diferentes idades amostras de de nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e aveia preta (*Avena strigosa*), FRANCHINI et al. (2003) observaram que teores de ácidos cítrico, málico, cafeico, p-cumárico e ferúlico de nabo forrageira reduziram com o avanço de idade, e os ácidos t-aconítico e málico da aveia preta também diminuíram, porém em menor intensidade.

7) Neutralização da toxicidade de Al^{3+} dos solos por ligantes orgânicas dos tecidos vegetais

Os ácidos orgânicos de massa molecular baixa, tais como: cítrico, maleico, tartárico, oxálico entre outros que são encontrados naturalmente nos tecidos vegetais quando são solubilizados em água pela precipitação ou irrigação são liberados na solução do solo e desempenham papel fundamental para o manejo de solos ácidos em condições tropicais e subtropicais. Estes ácidos desempenham papel importante no solo como efeito tampão de pH, aumento da solubilidade de cátions, diminuição da perda de cátions pela lixiviação, diminuição da toxidez de metais pesados pela complexação e outros.

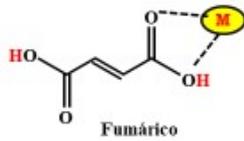
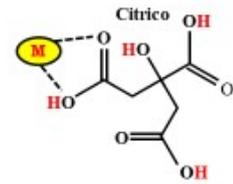
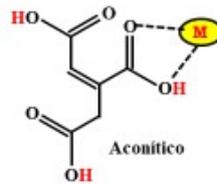
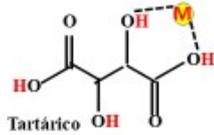
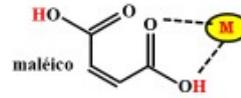
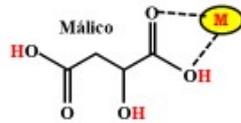
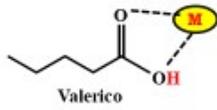
Os ácidos orgânicos possuem diversos grupos funcionais nas estruturas moleculares, além do $-\text{COOH}$, como por exemplo, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{COH}$, $-\text{CSH}$, $-\text{CNH}_2$. Na Figura 7 estão apresentadas as estruturas moleculares de alguns ácidos alifáticos e aromáticos, onde se observa que uma molécula de ácido orgânico pode ter mono, di e tricarbóxicos.

A estabilidade (pK_a) de um complexo M^{2+} ou M^{3+} aumenta com o aumento em números de ligações carbóxicas e dos polares $-\text{COH}$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{CN}$ e $-\text{CS}$, formando anéis de 5 ou 6 átomos (Hue et al., 1986). Os cátions formam compostos organometálicos através de grupos carbóxicos, $\text{R}-\text{COOH}$. A estabilidade do complexo orgânico formado determina o grau de neutralização da toxidez de alumínio por ácidos orgânicos (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000).

Na figura 6, estão apresentadas as estruturas moleculares de alguns ácidos orgânicos encontrados nos tecidos vegetais e estão identificados com círculos amarelos, onde os cátions podem fazer ligações. Por exemplo, o ácido málico possui dois grupos $-\text{COOH}$, e a substituição H^+ por Ca^{2+} formando malato de cálcio.

Ácidos alifáticos

M = Al, Ca, Mg



M = Al, Ca, Mg

Ácidos aromáticos

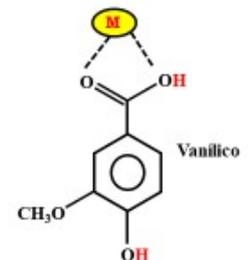
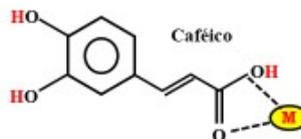
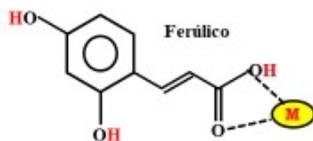
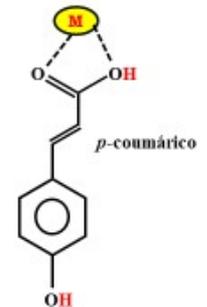
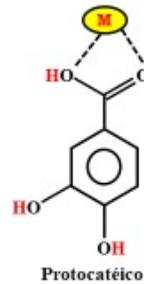
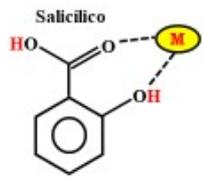


Figura 7- Estrutura molecular de ácidos alifáticos e aromáticos onde os cátions ligam com os orgânicos, onde $M = Al^{3+}$, Ca^{2+} e Mg^{2+} .

A acidez dos solos que inibe desenvolvimento radicular de plantas é a solubilização do Al^{3+} na solução do solo. Mas quando depositam os resíduos vegetais na superfície dos solos ácidos através de restos culturais, adubos verdes ou esterco de animais, os ácidos orgânicos presentes nestes materiais, ameniza toxicidade de Al^{3+} pela formação de sais orgânicos de Al. Por isso cultivos e/ou rotações com adubos verdes melhoram desenvolvimentos de plantas comerciais, além da ciclagem de nutrientes (DERPCH e CALEGARI, 1992).

A toxicidade de Al-L_n (L_n = ácidos orgânicos, mono, di e tri carboxílicos) sobre o desenvolvimento radicular de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) foi avaliada por (HUE et al., 1986) na seguinte condição experimental: $[\text{Al}^{3+}] = 1,85; 3,70; 9,25$ e $18,50 \mu\text{mol/L}$; $[\text{L}^n] = 5; 10; 25$ e $50 \mu\text{mol/L}$ de ácidos orgânicos, (onde L^n = ácido mono, di e tri carboxílico). O desenvolvimento relativo de raiz do algodoeiro foi avaliado com tratamento de $9,25 \mu\text{mol/L}$ de Al^{3+} e presença de $50 \mu\text{mol/L}$ de L^n . A relação do tratamento sem Al^{3+} e os valores de pKs de AlL^n foram: cítrico – 100% (pKs 12,3); oxálico – 101% (pKs 6,5); tartárico – 93% (pKs 6,2); málico – 85% (pKs 6,0); malônico – 78% (pKs 5,7); salicílico – 68% (pKs 4,7); succínico – 44% (pKs 4,6); ftálico – 42%; acético – 41%; fórmico – 41% e láctico – 41%. Os resultados demonstraram que, a redução da concentração de Al^{3+} livre da solução pela sua complexação com ácidos orgânicos amenizou a toxicidade de Al^{3+} para a planta. Para as mesmas concentrações de ácidos orgânicos, os que apresentam maior valores de pKs, maior foi capacidade da amenização do fito toxicidade de Al^{3+} .

O efeito dos ácidos orgânicos (cítrico, húmico, maleico, malônico, oxálico, salicílico, tartárico, EDTA e succínico) na diminuição da toxicidade de Al^{3+} sobre o desenvolvimento radicular de trigo var. “Anahuac” (*Triticum aestivum* L.) foi avaliada por MIYAZAWA et al. (1992) com base nos estudos de Hue et al. (1986).

As condições utilizadas foram: $15 \mu\text{mol/L}$ de Al^{3+} , pH 4,5 e concentrações de ácidos orgânicos foram: 7,5; 15,0; 30,0; 45,0; 60,0 e $90,0 \mu\text{mol/L}$. Os resultados demonstraram que na maioria dos ácidos, o comprimento radicular correlacionou-se positivamente com a constante de estabilidade pK dos AlL^n . Porém, ao utilizar-se EDTA houve prejuízo do desenvolvimento radicular, sugerindo que houve extração de Ca e Mg das plantas, bem como do ácido salicílico por efeito alelopático. A ordem decrescente da toxicidade de $15 \mu\text{mol/L}$ de Al^{3+} na presença de $60 \mu\text{mol/L}$ de ácidos

orgânicos observada foi: cítrico > oxálico > EDTA > tartárico > húmico > malônico > maleico > salicílico > succínico.

Os ácidos que não seguiram a regra de valores de pKs foram EDTA e salicílico. Se o mecanismo da redução da toxicidade de Al^{3+} fosse exclusivamente pela estabilidade do complexo ML, o EDTA deveria ser o primeiro composto a neutralizar toxicidade de Al^{3+} e apresentar maior crescimento de raiz, pois o EDTA é um ácido sintético com alta estabilidade de complexo. Entretanto, ao observar-se o menor crescimento radicular no tratamento com EDTA em relação aos do ácido cítrico e oxalato, pode-se atribuir este fato às seguintes hipóteses: a extração de cátions (Ca, Fe, Zn) das raízes de trigo pelo EDTA e/ou a absorção de EDTA pela planta, formando complexos de Ca, Zn e Fe no interior da célula, interferindo no metabolismo do crescimento radicular. O complexo Ca-salicilato absorvido pela planta de trigo, pode ter interferido também no metabolismo e prejudicou seu desenvolvimento normal (Nunes, et al. 2009). Na tabela 6 estão apresentados valores de pKs alguns sais orgânicos.

Deste modo, os resultados destes experimentos mostram que a neutralização da toxicidade de Al^{3+} são funções tanto das espécies quanto das concentrações dos ácidos orgânicos presentes nos tecidos vegetais, o que requer conhecimento das espécies e idade fisiológica de plantas de cobertura para se definir a época ideal de manejos, para maximizar efeito dos adubos verdes.

Tabela 4. O pK_a de alguns compostos Al-orgânico (HUE et al. 1986).

Ácido	pKs	Ácido	pKs	Ácido	pKs
fórmico	1,8	malônico	5,7	oxálico	6,5
succínico	4,6	málico	6,0	cítrico	12,3
salicílico	4,7	tratárico	6,2	EDTA	16,1

8) Mecanismo da neutralização da acidez do perfil de solos ácidos por resíduos vegetais

Um estudo preliminar feito no Laboratório de Solos do IAPAR por ZIGLIO et al. (1999) avaliaram a neutralização no perfil do solo ácido pela aplicação de $CaCO_3$ na

superfície do solo com resíduos vegetais. Neste, foi preenchido tubo de PVC de $\Phi = 15$ cm e $h = 50$ cm com LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, textura muito argilosa, ácido, $\text{pH CaCl}_2 = 4,3$ e Σ de bases $25,3 \text{ mmol}_c/\text{kg}$, adicionou-se equivalente a 3 Mg/ha CaCO_3 e 40 Mg/ha de material vegetal, homogeneizado até 1 cm de profundidade, mantendo a umidade capacidade de campo por um mês. Semanalmente adicionou-se quantidade equivalente a um poro de volume de solo, dividido em três partes e aplicados aos 2, 5 e 7 dias, durante sete semanas. Por fim, coletaram-se soluções percoladas e determinou-se pH , Ca, Mg e K. Os grupos de tratamentos foram controle, CaCO_3 , $\text{CaCO}_3 +$ aveia preta e $\text{CaCO}_3 +$ palha de trigo.

As concentrações de Ca, Mg e K demonstraram que nos grupos controle, CaCO_3 e $\text{CaCO}_3 +$ trigo das soluções percoladas foram desprezíveis, ou seja não houve lixiviação de CaCO_3 pela água, confirmando a baixa mobilidade de calcário aplicado na superfície do solo ácido, apesar da maior cinética da solubilização do CaCO_3 técnico em relação ao calcário agrícola.

Entretanto, o tratamento de $\text{CaCO}_3 +$ aveia preta resultou nos teores máximos de Ca e Mg atingidos pela percolação de primeiro volume de poro de água, a saber $4,0 \text{ mmol L}^{-1}$ de Ca e $3,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de Mg, e os terceiros poros de volume de água apresentaram valores desprezíveis. Por outro, até primeiro poro de volume, o teor de K foi $< 0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ e a concentração máxima foi atingida no terceiro poro de volume ($2,3 \text{ mmol L}^{-1}$).

A ordem de grandeza das lixiviações de cátions nos solos minerais, ou seja, aqueles com baixo teor de matéria orgânica, foi K, Mg, Ca e Al (figura 8). Porém, a ordem de lixiviação deste experimento com $\text{CaCO}_3 +$ aveia preta foi de Al, Ca, Mg e K, contrariando a ordem de lixiviação normalmente observada, o que requer aprofundamento do estudo para se compreender as reações químicas envolvidas nos solos ácidos com adubos verdes.

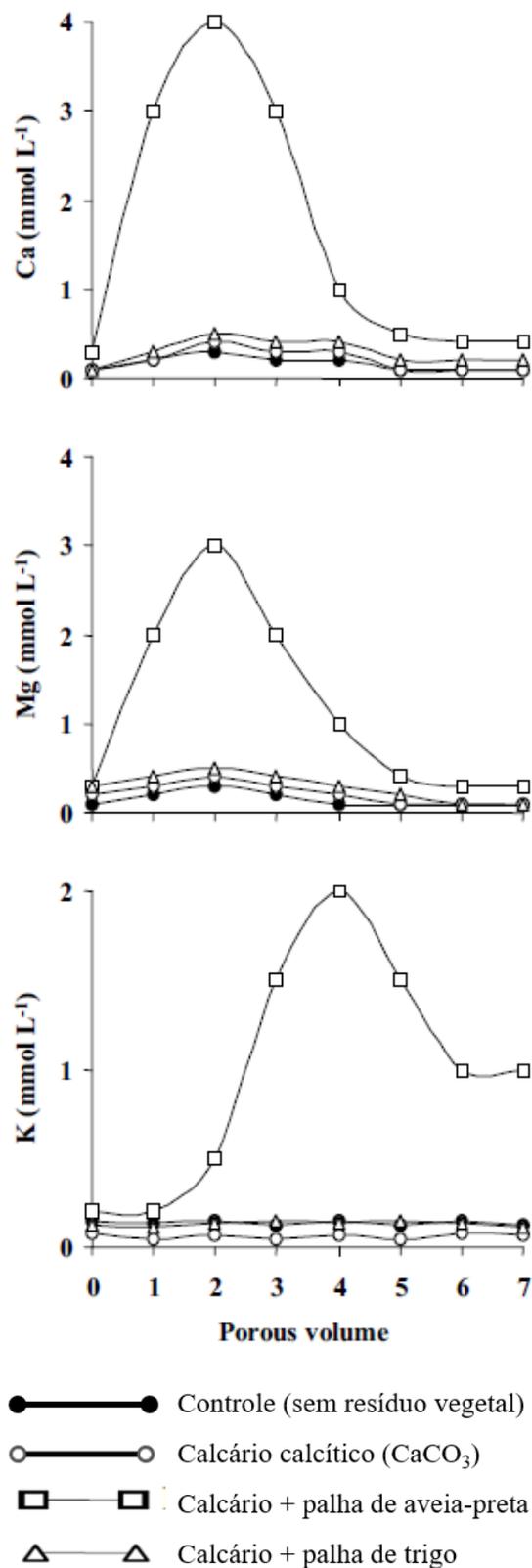


Figura 8- Concentrações de Ca, Mg e K nas soluções percoladas pela aplicação de CaCO_3 com resíduos de aveia preta e palha de trigo.

Franchini et al. (2003) avaliaram as soluções extraídas de nabo forrageira (*Raphanus sativus*) e aveia preta (*Avena strigosa*) coletadas aos 60, 75, 90 e 120 dias, secadas a 65 °C, passadas peneira de 1,0 mm. Foram comparadas as composições químicas dos extratos vegetais antes e após percolação do solo ácido, considerando os valores de cátions dos extratos de tecidos vegetais como 100%. Os resultados demonstraram que quase 50% do Ca e Mg do extrato de nabo forrageiro foram retidos nas cargas negativas dos solos, Hn^- , e apenas cerca de 10% do K foi percolado, ou seja, 90% do K ficou retido na carga negativa dos solos; também notou-se alta quantidade de Al na solução percolada (5,8 mmol L⁻¹). Já o extrato de aveia preta demonstrou que 15% e 25% do Ca e Mg foram retidos no solo, respectivamente, além de > 95% do K.

Sabe-se que a mobilidade do calcário no solo é baixa em plantio convencional, por isso a correção de acidez da camada subsuperficial requeira a sua incorporação. Além disso, a baixa solubilidade de CaCO₃ (13 mg L⁻¹) somado ao fato do cristal de minério de calcário ser muito estável, resulta na sua baixa cinética da solubilização. Deste modo, o avanço da técnica de semeadeira direta sobre palhada gerou várias dúvidas quanto à aplicação do calcário: como, quanto, quando e a pH da superfície.

Portanto, baseados nos resultados da neutralização da acidez da camada subsuperficial do solo pela calagem superficial, pode-se concluir que:

- a) no solo com baixo teor de matéria orgânico, o efeito é quase nulo;
- b) a aplicação sobre palha de trigo e milho, tem baixo efeito;
- c) a aplicação associada com adubo verde de nabo forrageiro, aveia branca e mucuna cinza são eficientes;
- d) o aumento da massa do adubo verde, aumenta a eficiência na neutralização da camada subsuperficial do solo.

9) Mecanismo de transporte de cátions no perfil dos solos ácidos

Os resultados dos experimentos desenvolvidos no campo, nas casas de vegetações e nos laboratórios do IAPAR sobre mobilidade de calcário sem e com resíduos vegetais, no perfil dos solos ácidos demonstraram que:

1) no solo de baixo teor de matéria orgânica, a neutralização limita-se ao local onde foi adicionado o calcário;

2) a aplicações de tecidos vegetais sem calcário resultaram em poucas alterações químicas (pH, H⁺Al, Ca) das camadas profundas;

3) a combinação de calcário + tecidos vegetais (nabo forrageiro, aveia preta, *Canavalia brasiliense*) neutralizaram até camada profundas dos solos (até 50 cm);

4) ao classificar os resíduos vegetais de acordo com o seu “poder de neutralização” de ácido clorídrico, pode-se dividir em: alto (nabo forrageiro, *Canavalia brasiliense*, mucuna cinza), médio (guandú, azevém, folha de café) e baixo (resíduos de pós-colheita de trigo, milho e cana de açúcar). A neutralização da acidez subsuperficial do solo observada comportou-se da mesma forma que o poder de neutralização dos resíduos vegetais;

5) a análise das soluções percoladas com e/ou sem resíduos vegetais dos solos incubados com calcário na superfície demonstraram que:

a) as concentrações de Ca, Mg, K e Al foram indetectáveis nas soluções percoladas somente com água;

b) os teores de Ca, Mg, K e Al dos extratos vegetais não se correlacionam com os teores de lixiviados, principalmente quanto ao K, alto teor no extrato e baixo no lixiviado, e quanto para o Al que foi ausente no extrato, mas alto teor no lixiviado;

c) a lixiviação de cátions no solo sem resíduos vegetais segue seguinte ordem de grandeza: K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ e Al³⁺, e nas presenças de resíduos vegetais foi de Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺.

c) as neutralizações no perfil dos solos ácidos até 50 cm foram promovidas por ácidos orgânicos presentes nos resíduos vegetais.

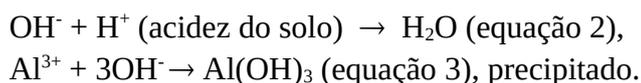
Deste modo, os resultados obtidos nos experimentos anteriormente mencionados permitem os apontamentos a seguir:

9.1) Mecanismo proposto da neutralização da acidez do subsuperficial por material vegetal

Na Figura 9 encontra-se a representação do mecanismo proposto na neutralização da acidez da camada subsuperficial dos solos em plantio direto com cultivo de adubos verdes e/ou acúmulo de resíduos vegetais.

Antes de tudo, o calcário deve ser aplicado antes do plantio de plantas de coberturas ou adubos verdes a fim de, quando manejadas estas plantas, o calcário esteja reagido (figura 8). Para isso, o calcário deve estar contato com solos ácidos, conforme ilustrado na reação abaixo (equações não balanceadas):





Inicialmente, o carbonato reage com água formando OH^- (equação 1), que por sua vez reage com H^+ do solo e neutraliza acidez (aumento de pH) (equação 2), e por fim reage com Al^{3+} formando $\text{Al}(\text{OH})_3$ precipitado que neutraliza a toxicidade do Al^{3+} para as plantas (equação 3).

Para que haja a neutralização da acidez do subsuperficial do solo, além das condições físicas como porosidade e permeabilidade, é necessária a presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} para que ocorra o transporte para a camada subsuperficial.

Na Figura 8 estão apresentados o esquema geral das reações químicas dos sais orgânicos dos tecidos vegetais no perfil dos solos ácidos pela água de chuva.

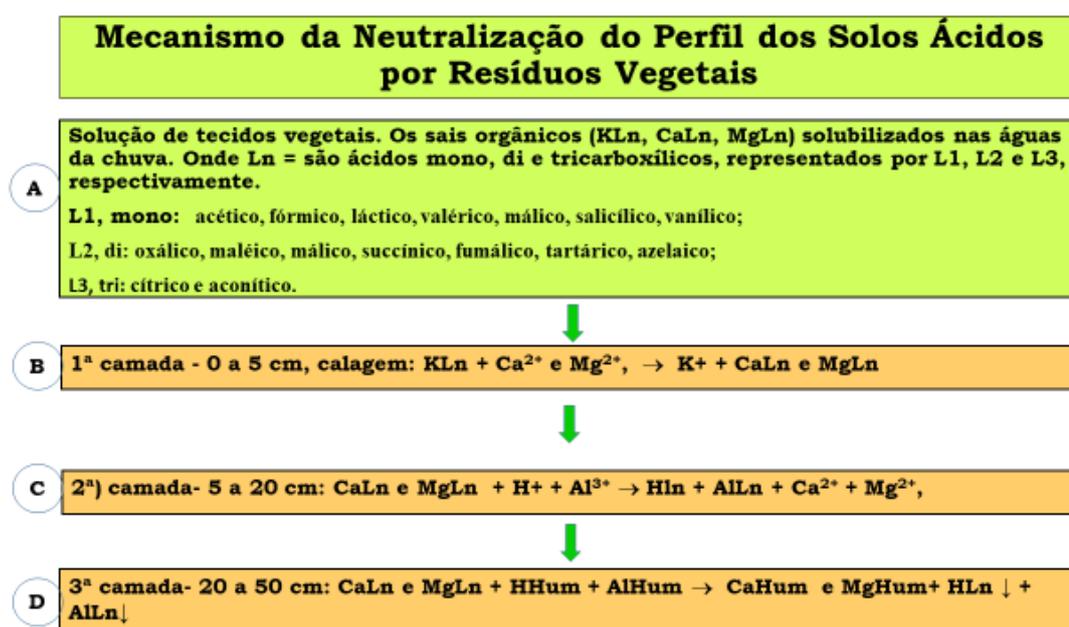
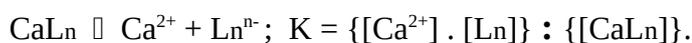


Figura 9. Esquema geral da neutralização da camada sub superficial do solo ácido por resíduos vegetais manejados na superfície do solo.

A) Composições químicas solúveis dos tecidos vegetais (quadro A)

Nos tecidos vegetais, os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ estão acompanhados de ânions inorgânicos SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} , Cl^- e NO_3^- , e sais orgânicos solúveis. Os sais orgânicos são formados de ácidos orgânicos, apresentam-se na estrutura molecular com mono, di e tri carbóxicos. Entre estes ácidos, di e tricarbóxicos, formam compostos com Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} que apresentam alta estabilidade, definido pela constante de estabilidade pK conforme a equação:



A constante de estabilidade pK dos principais compostos estão apresentados na tabela 6.

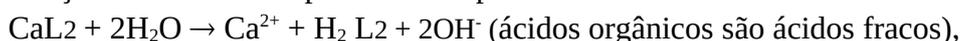
Os principais ácidos orgânicos encontrados nos tecidos vegetais de acordo com os números de grupos carboxílicos na molécula do ácido, são:

- * Monocarboxílico: fórmico, láctico, valérico, málico, salicílico, vanílico, etc;
- * Dicarboxílicos: oxálico, maléico, málico, succínico, fumálico, tartárico, azelaico, etc;
- * Tricarboxílicos: cítrico e aconítico.

B) Complexos organominerais solubilizados dos tecidos vegetais

Os ácidos orgânicos dos resíduos vegetais são solubilizados pela água da chuva e percoladas na superfície do solo. Os pH dos solos não alteram pelas adições de sais inorgânicos de Ca, Mg e K (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-}), mas somente pelos sais de ácidos orgânicos de CaLn, MgLn e KLn. As frações solúveis dos metais dos tecidos vegetais são compostos de K (entre 85 a 98%, média de 90% do total), Mg (entre 40 a 90%, média de 70%) e o Ca (10 a 80 %, média de 50%) (Miyazawa et al. 2022). Quando a água da chuva com sais orgânicos, percola no solo ácido, ela neutraliza a acidez, reduz o Al trocável e aumenta o teor de Ca até a camada subsuperficial. Deve-se ressaltar que os compostos de KLn são iônicos, portanto o K^+ ocupa somente as cargas negativas livres onde ocupados por Ca^{2+} ou Mg^{2+} dos solos, por isso o teor de K^+ na solução percolada é baixo.

Quando a solução de resíduos vegetais adicionada na superfície do solo ácido corrigido com calcário (quadro B), o composto KLn reage com Ca e Mg liberados do calcário, formam CaLn e MgLn. Estes sais na camada subsuperficial do solo reagem com Al^{3+} trocável (Al-KCl) e H^+ , formando AlLn e HLn, e serão percolados, resultando um aumento de pH e a diminuição do valor de Al trocável. Estas reações de neutralização de H^+ e de Al^{3+} podem ser expressas como:



Nota: As regras de **estabilidade dos complexos organometáricos** de Al, Ca, Mg e K são:

- * qualquer sais orgânicos de um ligante, M^{n+}Ln , onde, $\text{M}^{n+} = \text{Al} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$;
- * sais de um metal, M^n com ácidos orgânicos de mono, di e tri carboxílicos: $\text{ML}_3 > \text{ML}_2 > \text{ML}_1$ (número subscrito = número de grupo carboxílico da molécula). O aumento de números de carboxílicos na molécula, aumenta estabilidade dos compostos. Por exemplo: $\text{CaCit} > \text{CaOx} > \text{CaLac}$ (Cit = cítrico; Ox = oxálico; La = láctico).

C) Fertilidade química dos solos ácidos (quadro C)

As maiorias das cargas negativas de solos ácidos são formadas por ácidos húmicos (representado por Hu) ocupados por H^+ e Al^{3+} . Os teores destes elementos (H^+ e Al^{3+}) estão apresentados nas análises de fertilidade dos solos como pH, Al^{3+} , Al_{KCl} e $\text{H}+\text{Al}$.

Quando percoladas soluções de tecidos vegetais sobre solos ácidos, estas promovem várias reações de neutralizações como apresentadas a seguir:

a) os Al dos complexos AlHu1 (complexos húmicos) são substituídos por Ca do CaL2 (do extrato vegetal) conforme a reação:

$AlHu1 + CaL2 \rightarrow AlL2 + CaHu1$, quando a estabilidade de $AlL2 > AlHu1$ e as cargas negativas do $Hu1^-$ são ocupados por Ca^{2+} .

b) os Al dos complexos AlHu2 são substituídos por Ca do CaL3 (do extrato vegetal) conforme a reação:

$AlHu2 + CaL3 \rightarrow AlL3 + CaHu2$, porque a estabilidade de $AlL3 > AlHu2$ e as cargas negativas do $Hu2^-$ serão ocupados por Ca^{2+} , tanto o $AlL2$ (reação a) ou $AlL3$ (reação b) formados são lixiviados.

Nas reações acima descritas, o Ca^{2+} não é capaz de deslocar Al^{3+} do $Hu1$ ou $Hu2$ mas sim, os ligantes L_2 ou L_3 que formam AlL_2 ou AlL_3 e apresentam estabilidades maiores do que os respectivos complexos de Ca (CaL_2 ou CaL_3).

Portanto, a adição de soluções de tecidos vegetais ricos em sais de ácidos orgânicos de $CaLn$, $MgLn$ e KLn , podem alterar as propriedades químicas que resultam em aumento de pH dos solos ácidos, neutralização da toxicidade do Al^{3+} pela complexação e pela lixiviação, aumento de Ca e Mg na camada subsuperficial e acúmulo de K na camada superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADCOCK, D.; McNEILL, A.M; McDONALD, G.K.; ARMSTRONG, R.D. Subsoil constraints to crop production on neutral and alkaline soils south-eastern Australia: a review of current knowdge and management strategies. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2007, 47, 1245-1261.
- BORGES, G.O. Resumo histórico do plantio direto no Brasil. In: CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO - EMBRAPA (Passo Fundo). *Plantio Direto no Brasil*. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. Cap. 1. p. 13–18.
- CASSIOLATO, M.E.; MIYAZAWA, M.; MEDA, A. R.; PAVAN, M.A. A laboratory method to estimate the efficiency of plant extract to neutralize soil acidity. *Brazilian Archives of Biology and Technology: an international journal*, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 183–187, 14 jun. 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-89132002000200009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/txppdzhM5Y9wbf4nrBxQJcN/?lang=en>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- DERPSCH, R.; CALEGARI, A. *Plantas para adubação verde de inverno*. 2. ed. Paraná: Iapar, 1992.
- DERPSCH, Rolf. Histórico, requisitos, importância e outras considerações sobre plantio direto no Brasil. In: TORRADO, Pablo Vidal; ALOISI, Raphael R. *Plantio Direto no Brasil*. Campinas: Fundação Cargill, 1984. Cap. 1. p. 1–12.
- FRANCHINI, J. C.; GONZALEZ-VILA, F. J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. *Plant and Soil*, [S.L.], v. 231, n. 1, p. 55–63, 2001. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1010338917775>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010338917775>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- FRANCHINI, J. C.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic Composition of Green Manure During Growth and Its Effect on Cation Mobilization in an Acid Oxisol. *Communications In Soil Science*

- and Plant Analysis, [S.L.], v. 34, n. 13–14, p. 2045–2058, 14 ago. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1081/css-120023237>.
- FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; MELO, T. R. de; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 208, p. 104877, 2021
- HADDAD, C. M.; DOMINGUES, J. L.; CASTRO, F. G. F.; TAMASSIA, L. F. M. Características de produção e valor nutritivo do capim Pensacola (*Paspalum notatum* Fluegge var. *saurae* Parodi) em função da idade de corte. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 753–761, jul. 1999. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90161999000300034>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/HLYYjh6mrfyVNH3N8PvpRVNp/?lang=pt>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- HUE, N. V.; CRADDOCK, G. R.; ADAMS, F. Effect of Organic Acids on Aluminum Toxicity in Subsoils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 50, n. 1, p. 28–34, 14 jan. 1986. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000010006x>.
- LIMA, R. T. de; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; MIYAZAWA, M. Chemical and physical attributes of five Oxisols as predictors of shoot dry mass of white oats. *Revista Ceres*, Viçosa, (Mg), v. 68, n. 5, p. 441–452, 14 out. 2021. Bimestral. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x202168050009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/bVhpN79n5fN3FKgtLKhRcxm/>. Acesso em: 31 out. 2021.
- MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G. O.; PAVAN, M. A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 16, p. 209–215, 1992.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 17, p. 411–416, 1993.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. *Brazilian Archives of Biology and*

Technology: an international journal, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 251–256, set. 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-89132002000300001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/jzcPGnCYX9cMCCQdn9cJFqs/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 23 mar. 2015.

MUZILLI, O.; TORRADO, P.V.; MACHADO, J. O Plantio Direto no Brasil. In: FANCELLI, A.L.; TORRADO, P.V.; MACHADO, J. Atualização em Plantio Direto. Campinas: Fundação Cargill, 1985. Cap. 1. p. 1–16.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 6:1, 97 – 111, 2004.

NUNES, F. C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. Organic acid effect on calcium uptake by the wheat roots. *Brazilian Archives of Biology and Technology: an international journal*, Curitiba, v. 52, n. 1, p. 11–15, Jan./Feb. 2009.

POSSAMAI, E. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; AMADORI, C.; BARTZ, M. L. Carolina; RALISCH, R.; VICENSI, M.; MARX, E. F. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: a (re)view. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, (Mg), v. 46, p. e0210104, 2022. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa (MG). <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbc20210104>.

SPERATTI, A.; TURMEL, M.S.; CALEGARI, A; ARAUJO-JUNIOR, C.F.; VIOLIC, A.; WALL, P. C.; GOVAERTS, Bram. Conservation Agriculture in Latin America. In: FAROOQ, M; SIDDIQUE, K.H.M. **Conservation Agriculture**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 391–415. Disponível em: DOI 10.1007/978-3-319-11620-4. Acesso em: 12 jan. 2016.

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**: an international journal, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 1-6, 14 nov. 1999. Mensal. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-89131999000200016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/3nkJJKjmRXZ9GdrJQhpmYCf/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 25 mar. 2010.

