



Semina: Ciências Agrárias

ISSN: 1676-546X

semina.agrarias@uel.br

Universidade Estadual de Londrina
Brasil

Siqueira Vendrame, Pedro Rodolfo; Rodrigues Brito, Osmar; Guimarães, Maria de
Fátima; Martins, Éder de Souza; Becquer, Thierry
Caracterização da solução de solos do Bioma Cerrado sob pastagens
Semina: Ciências Agrárias, vol. 28, núm. 2, abril-junio, 2007, pp. 167-178
Universidade Estadual de Londrina
Londrina, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744084001>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Caracterização da solução de solos do Bioma Cerrado sob pastagens

Characterization of the soil solution of brazilian Cerrado soils under pasture

Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame^{1*}; Osmar Rodrigues Brito²;
Maria de Fátima Guimarães²; Éder de Souza Martins³; Thierry Becquer⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a solução de solos e avaliar a especiação do Al em solos sob pastagens no Bioma Cerrado. Para a coleta das soluções dos solos utilizou-se tubo de PVC com a extremidade inferior acoplada a uma ponta porosa de cerâmica especial. Para quantificar as formas iônicas do alumínio, foram comparadas duas metodologias: método químico do “aluminon” e o método WHAM (modelo geoquímico de especiação). Os solos utilizados no presente estudo foram coletados às margens das rodovias GO – 060 e BR – 154, no trecho entre os municípios de Goiânia, GO e Barra do Garças, MT. Os resultados permitiram concluir que as espécies iônicas de alumínio predominantes variaram em função do tipo de solo, pH e concentração de NO_3^- na solução do solo. Verificou-se também que as espécies iônicas mais abundantes foram: Al-M.O. , Al^{3+} e Al(OH)_4^- .

Palavras-chave: Especiação do alumínio, nitrogênio, pH, acidez

Abstract

The aim of the present work was to characterize the soils solution and to examine Al's speciation in soils under pasture in Brazilian Cerrado region. The soils used in this study were collected in the space between the towns of Goiânia, GO and Barra do Garças, MT, to the margins of GO – 060 and BR – 154 highways. For the collection of soil solutions it was used a special equipment built with a PVC tube whose inferior extremity was coupled to a porous tip of special ceramic. To quantify the aluminum ionic species, two methods were used: chemical method of “aluminon” and the method WHAM (geochemical speciation model). The results allowed to conclude that the predominant aluminum ionic species varied in function of soil type, pH and concentration of NO_3^- in the soil solution. More abundant Al's species in the soils were Al-M.O. , Al^{3+} and Al(OH)_4^- , in this order.

Key words: Aluminum species, nitrogen, pH, acidity

¹ Doutorando do Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, PR. E-mail: perovendrame@yahoo.com.br.

² Professores do Departamento de Agronomia/UEL. Londrina, PR.

³ Pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina – DF.

⁴ Pesquisador do Institut de Recherche pour le Développement (IRD)/Embrapa Cerrados.

* Autor para correspondência

Introdução

O Bioma Cerrado ocupa uma área de 207 milhões de hectares, o que representa 24% do território nacional (SANO; BARCELLOS; BEZERRA, 1999). Sob esta vegetação encontram-se principalmente solos intemperizados, que têm como características elevada acidez, baixa capacidade de troca de cátions e alta saturação por alumínio (ADAMOLI et al., 1985).

Aproximadamente 50 milhões de hectares do Bioma Cerrado é ocupado com pastagens, das quais entre 70 e 80% apresentam baixa produtividade. Calagem e adubações podem reduzir estes problemas, mas, devido ao alto custo ou mesmo à questões culturais, o manejo é geralmente extrativista (VILELA et al., 2004).

O alumínio é o terceiro elemento em abundância na litosfera, depois do oxigênio e do silício. Sua concentração é bastante expressiva nos minerais primários da fração argila, fazendo parte da rede cristalina. Para os solos do Cerrado é o segundo elemento em quantidade, superando o silício (MALAVOLTA, 1980).

Vários pesquisadores têm chamado atenção sobre os efeitos tóxicos do alumínio para às plantas (FAHL et al., 1982; PAVAN et al., 1982; NOBLE; SUMNER; ALVA, 1988a; RAIJ, 1991; FRÁGUAS, 1993). Porém, somente a determinação dos teores de alumínio trocável do solo ou de alumínio total da solução do solo, não são indicadores suficientes para avaliar a real toxicidade deste elemento para às plantas. Por isso, é necessário quantificar as espécies químicas consideradas tóxicas, principalmente as espécies de Al lábil, como Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ e AlSO_4^+ , assim como, as espécies não tóxicas, principalmente os complexos do alumínio com moléculas orgânicas (BOUDOT et al., 1994; BOUDOT et al., 1995) e os elementos que podem reduzir sua toxicidade, como os cátions (Ca e Mg) (ALVA et al., 1986; KINRAIDE; PARKER, 1987; NOBLE et al., 1988b).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar soluções de solos e avaliar a especiação do Al em solos sob pastagem do Bioma Cerrado.

Material e Métodos

Área de estudo e características dos solos

Os solos utilizados no presente estudo foram coletados na Região do Cerrado brasileiro, no trecho entre os municípios de Goiânia, GO e Barra do Garças, MT, às margens das rodovias GO – 060 e BR – 154. Para a definição dos solos a serem estudados, foram utilizados mapas geológicos e pedológicos com o intuito de amostrar solos intemperizados de diferentes materiais de origem. Todos os pontos amostrados foram georeferenciados com auxílio de Global Positioning System (GPS) (Tabela 1).

A coleta dos solos foi realizada com auxílio de pá reta à profundidade de 0-0,2 m. Após a coleta, os solos foram colocados em sacos plásticos de 40 L de capacidade e identificados, sendo, em seguida, levados à Embrapa Cerrados em Planaltina – DF, onde se instalou experimento em vasos em ambiente de casa de vegetação. No total, foram selecionados 14 solos para preenchimento de vasos com capacidade para 25 kg de solo.

A caracterização mineralógica e físico-química dos solos foi realizada nos laboratórios da Embrapa Cerrados, utilizando-se metodologia descrita em EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (1997). Alguns resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Localização de coleta, altitude, litologia, classe e textura dos solos avaliados.

| Solos | Município (Estado) | Altitude (m) | Litologia | Classe | Textura |
|-------|--------------------|--------------|--------------------------------------|--------|----------|
| 1 | Goiânia-GO | 850 | Granulitos paraderivados | LVA | Média |
| 2 | Santa Bárbara-GO | 704 | Metassedimentos | LV | Argiloso |
| 3 | Turvânia-GO | 733 | Granito gneisses | LVA | Argiloso |
| 4 | Firminópolis-GO | 673 | Granitos | LVA | Argiloso |
| 5 | Iporá-GO | 624 | Granitos | LV | Argiloso |
| 6 | Arenópolis -GO | 443 | Granitos | LVA | Argiloso |
| 7 | Piranhas-GO | 492 | Unidade metassedimentar | LVA | Média |
| 8 | Piranhas-GO | 518 | Unidade metassedimentar | LVA | Argiloso |
| 9 | Piranhas-GO | 402 | Granito gneisses | LVA | Média |
| 10 | Bom J. de Goiás-GO | 390 | Cobertura detrito lateríticas (TQDL) | LVA | Média |
| 11 | Bom J. de Goiás-GO | 395 | Cobertura detrito lateríticas (TQDL) | LVA | Média |
| 12 | Bom J. de Goiás-GO | 443 | Cobertura detrito lateríticas (TQDL) | NEO | Arenoso |
| 13 | Barra do Garças-MT | 370 | Arenitos | LVA | Média |
| 14 | Barra do Garças-MT | 350 | Arenitos | LVA | Média |

Tabela 2. Análises granulométricas e químicas dos solos estudados.

| Solos | Argila | Silte | Areia | C tot. | pH _{H2O} | pH _{KCl} | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Al ³⁺ | H ⁺ +Al ³⁺ |
|-----------|--------|-------|-------|--------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------------------------|------------------|----------------------------------|
| | % | | | | | | | | cmol _c kg ⁻¹ | | |
| 1 | 32 | 4 | 64 | 0,64 | 5,54 | 5,09 | 1,57 | 0,85 | 0,06 | 0,03 | 3,44 |
| 2 | 34 | 7 | 59 | 1,6 | 5,67 | 5,65 | 1,06 | 0,39 | 0,10 | 0,28 | 4,00 |
| 3 | 43 | 4 | 53 | 1,55 | 5,26 | 5,33 | 0,88 | 0,26 | 0,06 | 0,33 | 4,40 |
| 4 | 30 | 10 | 60 | 1,19 | 5,68 | 4,47 | 1,35 | 1,26 | 0,14 | 0,51 | 3,10 |
| 5 | 44 | 13 | 43 | 1,94 | 5,09 | 4,53 | 0,05 | 0,48 | 0,03 | 0,43 | 6,14 |
| 6 | 32 | 6 | 62 | 1,09 | 5,09 | 4,44 | 0,56 | 0,96 | 0,21 | 0,48 | 3,14 |
| 7 | 30 | 14 | 56 | 1,77 | 6,47 | 5,44 | 3,67 | 1,73 | 0,35 | 0,25 | 2,90 |
| 8 | 48 | 7 | 45 | 1,54 | 5,30 | 4,33 | 0,04 | 0,65 | 0,09 | 0,83 | 5,36 |
| 9 | 27 | 3 | 70 | 0,91 | 5,19 | 4,17 | 0,10 | 0,68 | 0,09 | 0,75 | 3,44 |
| 10 | 20 | 1 | 79 | 0,73 | 5,50 | 4,17 | 0,20 | 0,44 | 0,08 | 0,74 | 2,72 |
| 11 | 17 | 1 | 82 | 1,32 | 5,28 | 4,25 | 0,64 | 0,63 | 0,06 | 0,64 | 5,26 |
| 12 | 8 | 0 | 92 | 0,67 | 4,86 | 4,09 | 0,00 | 0,21 | 0,04 | 0,67 | 3,16 |
| 13 | 30 | 1 | 69 | 1,42 | 5,45 | 4,46 | 0,72 | 0,57 | 0,08 | 0,58 | 5,18 |
| 14 | 18 | 0 | 82 | 0,33 | 5,13 | 4,20 | 0,16 | 0,51 | 0,05 | 0,68 | 4,65 |

Coleta e análise da solução do solo

Simultaneamente ao preenchimento dos vasos, instalou-se nos mesmos um equipamento especial para coleta das soluções. Este equipamento é constituído de um tubo de PVC (3,8 cm de diâmetro e 60 cm de comprimento) com a extremidade inferior acoplada a uma cerâmica porosa (Soilmoisture Equipment Corp., USA, modelo B01M3). Na extremidade superior encontra-se uma rolha de borracha com dois furos, onde foram adaptados dois tubos flexíveis e finos. Um destes tubos é utilizado para a conexão à bomba de vácuo e outro para a extração da solução retida na cerâmica porosa (HUGHES; REYNOLDS, 1990).

Antes da utilização, todas as cerâmicas porosas foram lavadas, primeiro com água decarbonizada e em seguida com solução de HCl 10^{-3} M, visando eliminar possíveis contaminações com Al existente na própria cerâmica. Raulund-Rasmussen (1989), comparando soluções extraídas com cerâmicas porosas e com centrifugação, verificou problemas na utilização de cerâmicas porosas devido à liberação de Al. No entanto, Hughes e Reynolds (1990) utilizando o mesmo tipo de cerâmica, mostraram que não houve substancial dissolução do Al e que não ocorreu modificação da química da solução depois da limpeza com solução de HCl 10^{-3} M.

Após a instalação do equipamento de extração, todos os vasos foram umedecidos com água destilada, até atingir o ponto de máxima retenção de água de cada solo. Este nível de umidade foi mantido até o final da experimentação com reposição semanal da água evaporada.

Uma vez obtido o ponto de saturação de umidade, iniciou-se a extração da solução de cada solo, utilizando-se bomba de vácuo conectada ao equipamento de extração. A solução extraída foi removida mediante uso de seringas de 50 ml. Foram realizadas 8 extrações durante o período experimental, com intervalos semanais. À partir da 4ª semana, adicionou-se 1,8 g de nitrato de amônio

(NH_4NO_3)/vaso/vez, simulando adubação nitrogenada. As soluções extraídas foram colocadas em frascos de plástico, identificadas e encaminhadas para o laboratório de solos da Embrapa Cerrados. No laboratório, cada solução foi analisada para: pH, Ca, Mg e Al totais, determinados em aparelho ICP-AES; K, determinado em espectrofotômetro; e ânions (NO_3^- , Cl^- e SO_4^{2-}), determinados em cromatógrafo.

Avaliação das Espécies de Al

Para quantificar as espécies iônicas do Al, utilizou-se o modelo geoquímico de especiação de alumínio WHAM (Windermere Humic Aqueous Model) programa V. 6.0.9 (TIPPING, 1994; TIPPING, 1998). Também foi empregado o método químico do aluminon (GINTHING; WILKENS; JOHNSON, 2000), que permite quantificar as espécies de alumínio lábil (principalmente Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ e $\text{Al}(\text{OH})_2^+$), e que tem sido freqüentemente empregado em razão da simplicidade e da rapidez na obtenção de resultados.

Resultados e Discussão

Evolução da acidez da solução dos solos

Todos os solos tiveram os valores de pH da solução diminuídos durante o período experimental (8 semanas). Para um grupo de solos (1, 2, 4, 6, 7, 9, 10 e 13), a variação foi de, no máximo, 1 unidade de pH neste período. Para outro grupo (3, 5, 8, 11 e 14), a variação observada foi mais acentuada, variando de 1,5 a 3 unidades de pH. O solo 12 apresentou comportamento intermediário, com diminuição de 1,25 unidade de pH entre as 1ª e 2ª amostragens; entretanto, nas demais, os valores decresceram lentamente até alcançar pH 4,2 na última amostragem, que foi o valor mais baixo de pH encontrado entre os solos avaliados. Na Figura 1, é apresentado gráfico da variação dos valores de pH de 3 dos solos estudados, representando os grupos acima descritos.

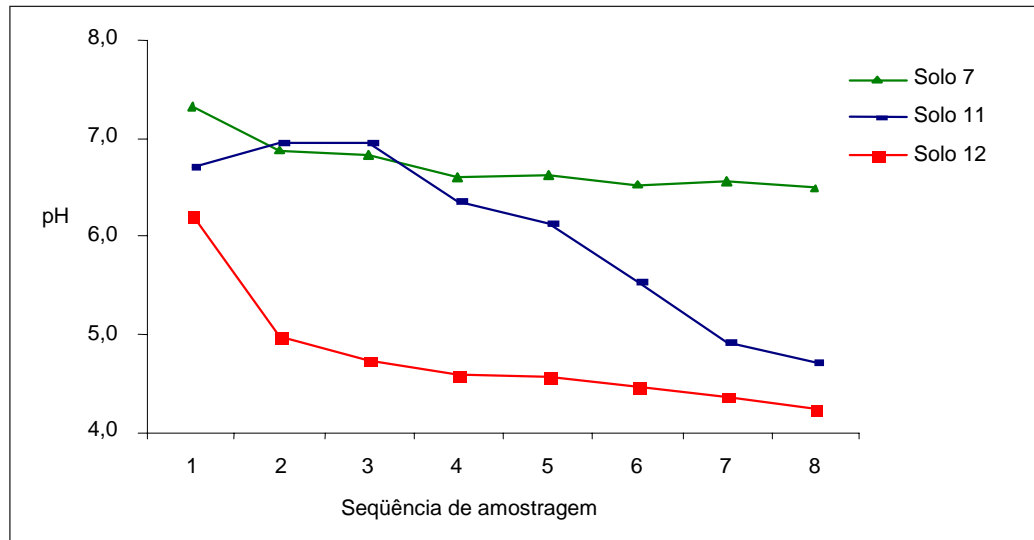


Figura 1. Variação dos valores de pH nos solos 7, 11 e 12, durante o período experimental.

Até a 4ª amostragem, observou-se que as concentrações de Al foram pequenas para a maioria dos solos ($\text{Al} < 0,1 \text{ mg L}^{-1}$), com exceção do solo n.º 12 que, na quarta amostragem, apresentou $2,7 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 2a). Verificou-se que os aumentos mais importantes nas concentrações de Al, ocorreram nas 7ª e 8ª amostragens, provavelmente, devido ao efeito da adição de nitrato de amônio (NH_4NO_3) realizada após a 4ª semana de instalação do experimento. Em estudo sobre a especiação química da solução do solo, Chaves, Pavan e Miyazawa (1991) verificaram que a adição de CaNO_3^+ também aumentou os teores de Al^{3+} em solução de solos do norte do Paraná. As maiores concentrações de Al-total em todas as amostragens, foram observadas no solo 12 (Figura 2a), no entanto, verificou-se também, considerável aumento nos teores deste elemento nos solos 5, 8, 10, 11 e 14 (Figura 2b). Para os demais solos, não foi verificada grande variação nos teores de Al total.

Quando se avaliaram os teores de Ca, verificou-se que nos solos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (Figura 3a), os teores oscilaram para mais e para menos durante o período experimental, sem definir uma tendência de

comportamento. Entretanto, todos apresentaram teores mais elevados na última avaliação. Para os solos 12 e 14, foi verificado o mesmo comportamento descrito anteriormente, no entanto, os teores de Ca observados na última amostragem foram menores que os da primeira (Figura 3b). Os solos 7, 8, 9, 10, 11 e 13 tiveram os teores de Ca aumentados somente após a adubação com nitrato de amônio (NH_4NO_3) (Figura 3c).

O fato de a adição de nitrato de amônio ter aumentado a quantidade de Ca, está ligado ao aumento na força iônica resultante da adição deste sal ao solo (TAKACHI; PAVAN, 1995).

Os teores de NO_3^- nos diferentes solos aumentaram continuamente durante o período experimental, sendo que, para as 4 primeiras semanas, os maiores teores foram verificados nos solos 1 e 9. A partir da 4ª amostragem, com a adição de nitrato de amônio, verificou-se elevações para todos os solos, como se previa, sendo que as maiores elevações se deram para os solos 1, 4, 9, 10 e 11 (Figura 4).

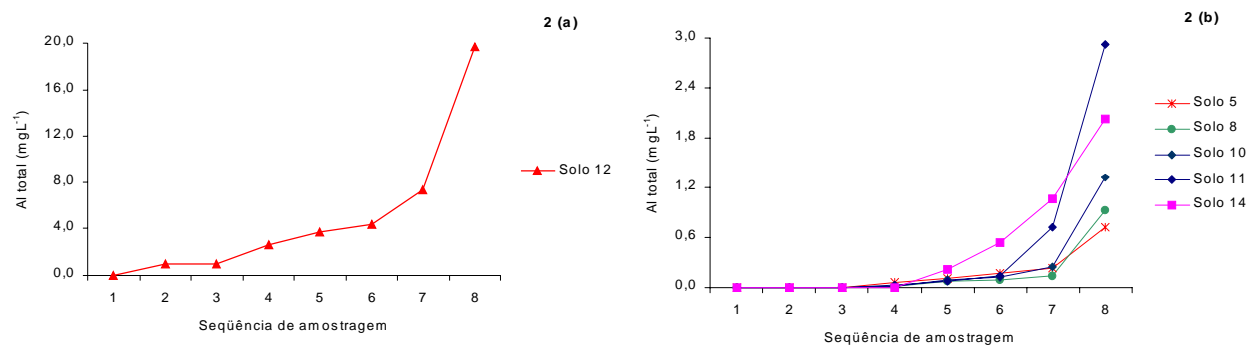


Figura 2. Evolução dos teores de Al total dos solos 12 (Figura 2a), 5, 8, 10, 11 e 14 (Figura 2b), durante o período experimental.

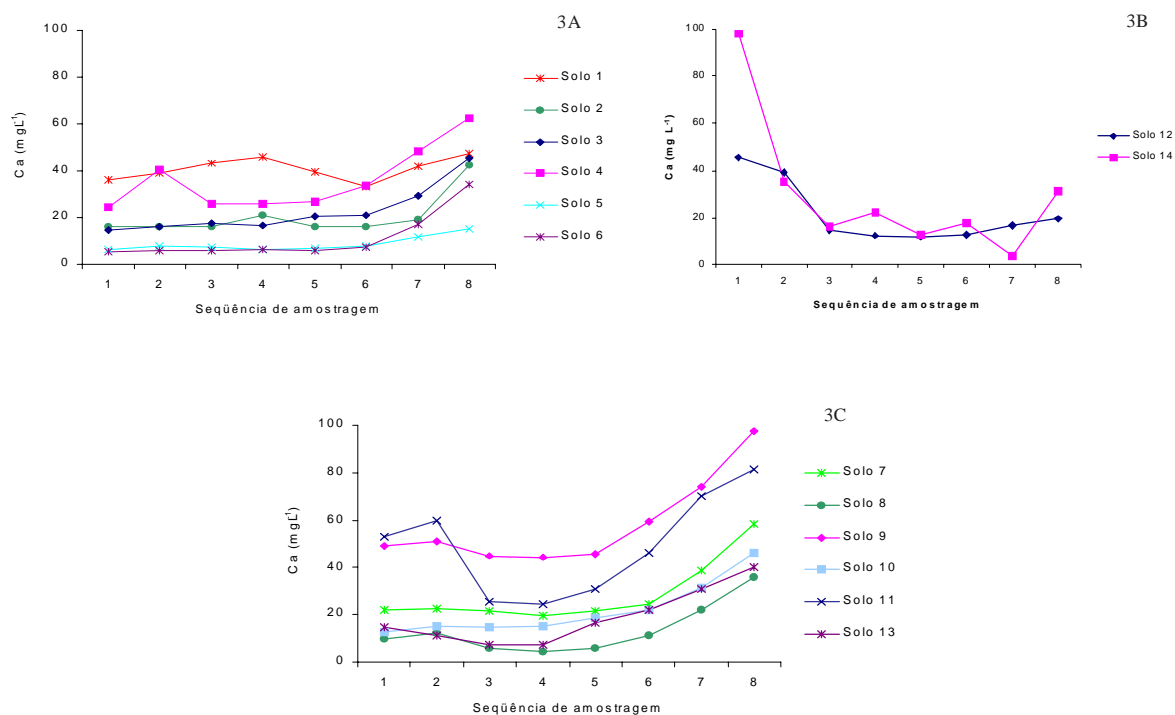


Figura 3. Variação dos teores de Ca durante o período experimental.

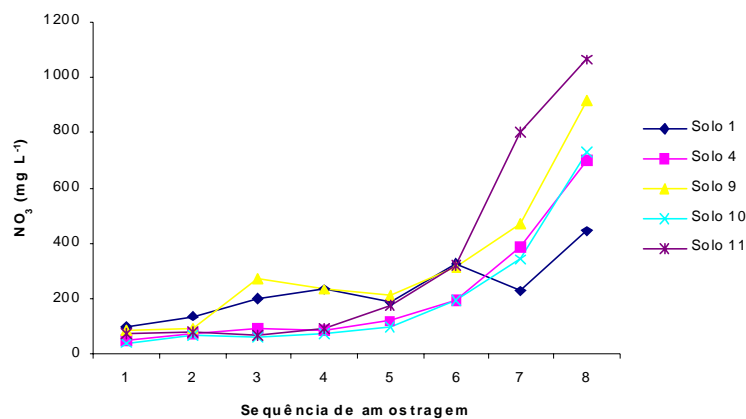


Figura 4. Variação dos teores de NO₃⁻ nos solos 1, 4, 9, 10 e 11 durante o período experimental.

Foi verificado que a diminuição do pH (Figuras 5a e 5b) e o aumento da concentração de NO_3^- (Figuras 6a e 6b) tiveram forte incidência sobre a

liberação do Al total na solução do solo. Já para os cátions (Ca, Mg e K), essa incidência foi menor.

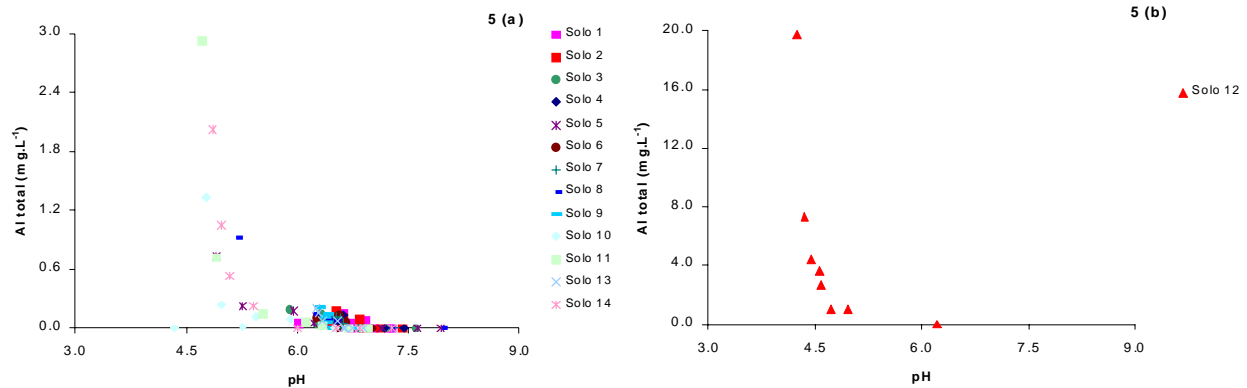


Figura 5. Variação dos teores de Al total em função dos valores de pH durante o período experimental.

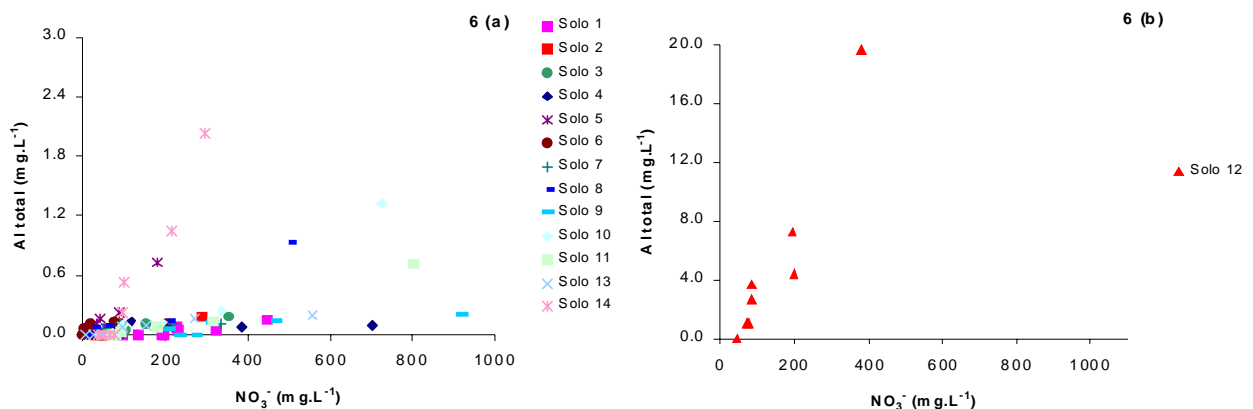


Figura 6. Variação dos teores de Al total em função dos teores de NO_3^- durante o período experimental.

Para avaliar a relação entre os teores de NO_3^- e Al^{3+} na solução dos solos, ajustou-se equações de regressão que junto com os coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (r) são apresentados no Quadro 3.

Analisando-se as equações de correlação (Tabela 3), verifica-se que a intensidade da ação de solubilização do Al total em função do aumento dos teores de NO_3^- foi variável para cada solo. Para um grupo de solos (1, 2, 3, 4, 6, 7, 9 e 13), para cada mol de NO_3^- adicionado à solução do solo, houve liberação de 0,0008 a 0,0030

mol de Al. Para um grupo intermediário, solos 5, 8, 10, 11 e 14, para cada mol de NO_3^- liberado na solução do solo, foram liberados de 0,004 a 0,010 mol de Al. Para o solo 12, para cada mol NO_3^- liberado na solução do solo, houve liberação de 0,13 mol de Al. Para os solos do grupo intermediário e, principalmente, para o solo 12, o aumento da concentração de NO_3^- na solução do solo resultou na liberação de maiores quantidades de Al solúvel, aumentando a possibilidade de torná-lo tóxico às plantas.

Especiação do Alumínio da Solução do Solo

- Resultados obtidos do programa de especiação WHAM.

Os resultados obtidos com o programa WHAM revelaram variações quali e quantitativas para as diferentes espécies de Al nos solos estudados. Até a 4ª amostragem, a espécie de Al predominante nos diferentes solos foi Al-M.O. (alumínio complexado por compostos orgânicos), com exceção do solo 12, onde, desde a 3ª amostragem, a espécie predominante foi Al^{3+} (Quadro 4).

Para os solos 3, 6, 7, 8 e 13, observou-se que, durante toda a fase experimental, a espécie Al-M.O. foi a mais abundante (Tabela 4). Para os demais, houve alterações entre as espécies predominantes,

sendo que, para os solos 1, 2, 4 e 9, a espécie predominante, na última amostragem, foi $Al(OH)_4^-$. Nos solos 5, 10, 11 e 14, a espécie mais abundante foi Al^{3+} .

Foi possível observar ainda, na última avaliação, que, nos solos em que houve predominância da espécie Al^{3+} , o pH variou entre 4,2 e 4,9. Nos solos onde a espécie predominante até a última avaliação foi o Al-M.O. (solos 3, 6, 7, 8 e 13), os valores de pH, medidos na última amostragem, ficaram entre 5,2 e 6,5, e onde predominou a espécie $Al(OH)_4^-$ (solos 1, 2, 4 e 9), os valores de pH foram sempre maiores que 6,3. Esse fato evidencia a influência do pH sobre as espécies de Al na solução do solo, o que está de acordo com resultados obtidos por Alva et al. (1986).

Tabela 3. Equações de regressão, coeficientes de determinação e de correlação do ajuste entre os teores de NO_3^- e de Al total da solução dos solos.

| Solos | $NO_3^- = f(Al-total)$ | R^2 | r |
|-------|------------------------|-------|------|
| 1 | $y = 784,72x + 0,0025$ | 0,78 | 0,88 |
| 2 | $y = 487,68x + 0,0004$ | 0,75 | 0,86 |
| 3 | $y = 497,54x + 0,0006$ | 0,61 | 0,78 |
| 4 | $y = 711,6x + 0,0019$ | 0,14 | 0,37 |
| 5 | $y = 91,414x + 0,0004$ | 0,91 | 0,95 |
| 6 | $y = 269,56x + 0,0003$ | 0,29 | 0,54 |
| 7 | $y = 584,49x + 0,0007$ | 0,49 | 0,70 |
| 8 | $y = 227,4x + 0,0005$ | 0,93 | 0,96 |
| 9 | $y = 1250,4x + 0,002$ | 0,78 | 0,88 |
| 10 | $y = 217,07x + 0,0014$ | 0,94 | 0,96 |
| 11 | $y = 148,67x + 0,0027$ | 0,81 | 0,90 |
| 12 | $y = 7,322x + 0,001$ | 0,92 | 0,95 |
| 13 | $y = 935,32x + 0,0001$ | 0,84 | 0,91 |
| 14 | $y = 52,84x + 0,0009$ | 0,96 | 0,98 |

Tabela 4. Especificação do AI calculada através do programa WHAM.

| SEQ. AMOS* | SOLOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| | Atividade** AISO ⁺ | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2,28E-31 | 1,36E-31 | 1,93E-44 | 4,26E-44 | 3,17E-45 | 3,78E-43 | 7,16E-44 | 6,93E-33 | 8,63E-43 | 1,25E-36 | 2,11E-42 | 8,65E-41 | 7,20E-43 | 1,56E-43 |
| 2 | 3,63E-31 | 9,22E-31 | 3,62E-31 | 1,71E-43 | 1,50E-44 | 1,65E-42 | 8,69E-43 | 8,93E-44 | 2,50E-42 | 1,07E-42 | 5,01E-43 | 5,39E-21 | 2,38E-42 | 9,47E-43 |
| 3 | 3,87E-43 | 4,25E-30 | 1,19E-42 | 5,10E-43 | 2,58E-43 | 2,07E-42 | 1,60E-42 | 9,67E-43 | 3,88E-42 | 1,91E-41 | 5,04E-43 | 1,06E-20 | 9,17E-42 | 1,32E-41 |
| 4 | 2,70E-14 | 3,20E-13 | 1,23E-12 | 5,53E-26 | 1,86E-24 | 2,35E-41 | 1,19E-41 | 3,54E-15 | 4,99E-29 | 2,44E-25 | 7,03E-27 | 4,57E-20 | 1,04E-41 | 5,49E-40 |
| 5 | 1,44E-29 | 2,75E-14 | 1,43E-24 | 1,44E-25 | 3,68E-24 | 2,90E-26 | 3,54E-26 | 1,42E-25 | 2,68E-25 | 6,51E-24 | 8,11E-25 | 6,64E-20 | 1,18E-25 | 1,74E-22 |
| 6 | 9,97E-13 | 3,01E-13 | 1,51E-25 | 1,38E-25 | 4,65E-23 | 2,01E-25 | 2,34E-25 | 2,86E-25 | 6,20E-25 | 3,91E-23 | 7,99E-23 | 7,37E-20 | 3,30E-25 | 2,44E-21 |
| 7 | 3,33E-14 | 1,74E-12 | 2,33E-11 | 4,12E-26 | 1,18E-21 | 2,29E-25 | 1,31E-25 | 2,54E-24 | 5,84E-25 | 7,75E-22 | 3,44E-21 | 1,18E-19 | 1,83E-24 | 7,71E-21 |
| 8 | 1,35E-25 | 3,85E-25 | 2,42E-23 | 4,86E-26 | 8,78E-21 | 1,77E-11 | 1,19E-12 | 3,56E-21 | 2,20E-24 | 8,62E-21 | 1,83E-20 | 2,28E-19 | 3,10E-24 | 1,64E-20 |
| | Atividade** Al ³⁺ | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1,65E-28 | 4,67E-29 | 2,20E-29 | 6,14E-29 | 2,88E-30 | 3,31E-28 | 9,47E-29 | 4,19E-30 | 1,40E-27 | 1,52E-21 | 4,41E-27 | 1,62E-25 | 8,82E-28 | 5,51E-28 |
| 2 | 2,36E-28 | 2,30E-28 | 1,56E-28 | 3,13E-28 | 1,40E-29 | 1,62E-27 | 1,20E-27 | 1,02E-28 | 4,10E-27 | 1,44E-27 | 1,11E-27 | 9,33E-06 | 2,79E-27 | 1,71E-27 |
| 3 | 7,38E-28 | 1,19E-27 | 1,48E-27 | 7,86E-28 | 2,33E-28 | 2,12E-27 | 2,22E-27 | 9,53E-28 | 6,81E-27 | 2,56E-26 | 7,34E-28 | 1,33E-05 | 9,89E-27 | 1,75E-26 |
| 4 | 1,87E-11 | 9,90E-11 | 1,59E-10 | 8,59E-11 | 1,87E-09 | 2,37E-26 | 1,64E-26 | 5,14E-13 | 8,58E-14 | 3,33E-10 | 1,04E-11 | 6,10E-05 | 1,04E-26 | 8,55E-25 |
| 5 | 8,39E-27 | 8,27E-12 | 1,90E-09 | 2,36E-10 | 3,48E-09 | 2,79E-11 | 4,87E-11 | 1,42E-10 | 4,59E-10 | 9,88E-09 | 1,42E-09 | 9,24E-05 | 1,65E-10 | 2,33E-07 |
| 6 | 8,07E-10 | 1,41E-10 | 2,07E-10 | 2,60E-10 | 4,60E-08 | 2,06E-10 | 3,51E-10 | 3,48E-10 | 1,24E-09 | 6,90E-08 | 1,81E-07 | 1,17E-04 | 5,26E-10 | 3,63E-06 |
| 7 | 9,42E-12 | 2,00E-11 | 1,43E-09 | 1,02E-10 | 1,34E-06 | 3,15E-10 | 2,54E-10 | 4,31E-09 | 1,37E-09 | 1,70E-06 | 1,15E-05 | 2,16E-04 | 3,58E-09 | 1,26E-05 |
| 8 | 3,15E-10 | 8,05E-10 | 5,28E-08 | 1,53E-10 | 1,19E-05 | 2,32E-09 | 5,71E-10 | 8,61E-06 | 6,76E-09 | 2,71E-05 | 7,13E-05 | 6,34E-04 | 7,63E-09 | 3,64E-05 |
| | Atividade** AIOH ⁺ | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2,38E-26 | 1,03E-26 | 7,28E-27 | 1,35E-26 | 2,19E-27 | 3,07E-26 | 1,58E-26 | 3,19E-27 | 8,06E-26 | 2,78E-22 | 1,59E-25 | 1,99E-24 | 5,73E-26 | 6,79E-26 |
| 2 | 2,98E-26 | 2,47E-26 | 1,97E-26 | 3,43E-26 | 5,09E-27 | 9,41E-26 | 7,20E-26 | 1,47E-26 | 1,67E-25 | 8,08E-26 | 7,19E-26 | 6,54E-06 | 1,32E-25 | 8,82E-26 |
| 3 | 5,88E-26 | 7,64E-26 | 8,92E-26 | 5,76E-26 | 2,91E-26 | 1,19E-25 | 1,16E-25 | 6,82E-26 | 2,45E-25 | 6,44E-25 | 5,12E-26 | 5,92E-06 | 3,46E-25 | 4,75E-25 |
| 4 | 7,01E-10 | 3,32E-09 | 2,96E-09 | 2,29E-09 | 2,72E-08 | 7,06E-25 | 5,15E-25 | 1,05E-11 | 1,88E-12 | 4,90E-10 | 1,77E-10 | 1,86E-05 | 4,01E-25 | 6,56E-24 |
| 5 | 3,37E-25 | 2,59E-10 | 3,25E-08 | 7,45E-09 | 5,43E-08 | 1,14E-09 | 1,65E-09 | 3,87E-09 | 8,38E-09 | 6,04E-08 | 1,36E-08 | 2,74E-05 | 4,48E-09 | 4,65E-07 |
| 6 | 6,23E-09 | 3,13E-09 | 2,91E-09 | 6,27E-09 | 3,55E-07 | 5,32E-09 | 8,98E-09 | 7,15E-09 | 2,11E-08 | 1,43E-07 | 4,27E-07 | 2,59E-05 | 8,94E-09 | 3,47E-06 |
| 7 | 5,77E-10 | 1,09E-09 | 2,16E-08 | 3,02E-09 | 2,02E-06 | 8,84E-09 | 6,81E-09 | 5,33E-08 | 2,47E-08 | 1,13E-06 | 5,87E-06 | 3,69E-05 | 5,12E-08 | 9,06E-06 |
| 8 | 8,99E-09 | 1,89E-08 | 2,93E-07 | 4,16E-09 | 7,78E-06 | 2,99E-08 | 1,20E-08 | 8,82E-06 | 8,73E-08 | 1,02E-05 | 2,22E-05 | 7,53E-05 | 9,11E-08 | 1,85E-05 |

continua

continuação

| SEQ. AMOS* | SOLOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| | Atividade** Al(OH) ₃ ⁺ | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2,69E-24 | 1,75E-24 | 1,83E-24 | 2,32E-24 | 1,25E-24 | 2,12E-24 | 2,04E-24 | 1,83E-24 | 3,64E-24 | 3,90E-23 | 4,58E-24 | 1,93E-23 | 2,85E-24 | 6,83E-24 |
| 2 | 2,96E-24 | 2,03E-24 | 1,91E-24 | 2,96E-24 | 1,39E-24 | 4,12E-24 | 3,34E-24 | 1,62E-24 | 5,32E-24 | 3,51E-24 | 3,72E-24 | 3,61E-06 | 4,79E-24 | 3,58E-24 |
| 3 | 3,72E-24 | 3,77E-24 | 4,12E-24 | 3,30E-24 | 2,70E-24 | 5,06E-24 | 4,68E-24 | 3,68E-24 | 6,97E-24 | 1,25E-23 | 2,77E-24 | 2,02E-06 | 9,19E-24 | 9,93E-24 |
| 4 | 2,09E-08 | 8,64E-08 | 4,22E-08 | 4,75E-08 | 2,99E-07 | 1,58E-23 | 1,26E-23 | 1,61E-10 | 3,24E-11 | 5,59E-10 | 2,34E-09 | 4,37E-06 | 1,16E-23 | 3,94E-23 |
| 5 | 1,07E-23 | 6,25E-09 | 4,28E-07 | 1,84E-07 | 6,34E-07 | 3,47E-08 | 4,31E-08 | 7,94E-08 | 1,21E-07 | 2,89E-07 | 1,02E-07 | 6,26E-06 | 9,47E-08 | 7,18E-07 |
| 6 | 3,83E-08 | 5,35E-08 | 3,17E-08 | 1,20E-07 | 2,06E-06 | 1,04E-07 | 1,79E-07 | 1,12E-07 | 2,89E-07 | 2,36E-07 | 8,08E-07 | 4,45E-06 | 1,19E-07 | 2,58E-06 |
| 7 | 2,82E-08 | 4,59E-08 | 2,57E-07 | 7,23E-08 | 2,32E-06 | 1,92E-07 | 1,45E-07 | 5,19E-07 | 3,57E-07 | 6,06E-07 | 2,47E-06 | 4,96E-06 | 5,84E-07 | 5,11E-06 |
| 8 | 2,07E-07 | 3,53E-07 | 1,31E-06 | 9,29E-08 | 3,94E-06 | 3,06E-07 | 2,03E-07 | 7,30E-06 | 9,25E-07 | 3,13E-06 | 5,70E-06 | 7,22E-06 | 8,81E-07 | 7,53E-06 |
| | Atividade** Al(OH) ₄ ⁻ | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 8,95E-22 | 1,16E-21 | 2,66E-21 | 1,69E-21 | 8,71E-21 | 2,13E-22 | 8,18E-22 | 1,34E-20 | 1,92E-22 | 1,79E-26 | 1,05E-22 | 4,88E-23 | 1,65E-22 | 2,27E-21 |
| 2 | 7,83E-22 | 3,23E-22 | 4,19E-22 | 5,94E-22 | 2,21E-21 | 1,73E-22 | 1,76E-22 | 4,48E-22 | 1,41E-22 | 1,62E-22 | 2,84E-22 | 2,88E-08 | 1,46E-22 | 1,57E-22 |
| 3 | 4,10E-22 | 2,18E-22 | 2,07E-22 | 2,76E-22 | 4,95E-22 | 2,02E-22 | 1,87E-22 | 2,33E-22 | 1,53E-22 | 1,15E-22 | 2,02E-22 | 5,60E-09 | 1,46E-22 | 1,04E-22 |
| 4 | 5,29E-07 | 1,44E-06 | 2,03E-07 | 5,24E-07 | 7,91E-07 | 1,74E-22 | 1,83E-22 | 8,09E-10 | 2,59E-10 | 1,78E-11 | 1,03E-08 | 5,79E-09 | 2,12E-22 | 3,61E-23 |
| 5 | 2,97E-22 | 8,67E-08 | 1,79E-06 | 2,94E-06 | 1,84E-06 | 6,96E-07 | 7,19E-07 | 7,28E-07 | 6,66E-07 | 1,67E-07 | 1,56E-07 | 7,92E-09 | 1,04E-06 | 4,15E-08 |
| 6 | 4,03E-08 | 3,72E-07 | 9,18E-08 | 1,21E-06 | 1,50E-06 | 8,68E-07 | 1,80E-06 | 6,50E-07 | 1,52E-06 | 1,72E-08 | 8,50E-08 | 3,40E-09 | 5,47E-07 | 3,58E-08 |
| 7 | 1,87E-06 | 2,01E-06 | 9,36E-07 | 1,26E-06 | 7,05E-08 | 2,22E-06 | 1,84E-06 | 1,31E-06 | 2,27E-06 | 5,06E-09 | 1,49E-08 | 2,39E-09 | 2,13E-06 | 4,28E-08 |
| 8 | 3,30E-06 | 3,55E-06 | 7,56E-07 | 1,55E-06 | 2,50E-08 | 8,87E-07 | 1,77E-06 | 1,53E-07 | 3,54E-06 | 9,94E-09 | 1,37E-08 | 2,00E-09 | 2,56E-06 | 3,62E-08 |
| | Atividade** Al-MO | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 9,99E-19 | 9,99E-19 | 9,97E-19 | 9,98E-19 | 9,91E-19 | 1,00E-18 | 9,99E-19 | 9,87E-19 | 1,00E-18 | 9,98E-19 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 9,98E-19 |
| 2 | 9,99E-19 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 9,99E-19 | 9,98E-19 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,81E-05 | 1,00E-18 | 1,00E-18 |
| 3 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 1,28E-05 | 1,00E-18 | 1,00E-18 |
| 4 | 1,20E-06 | 2,25E-06 | 2,03E-06 | 1,79E-06 | 1,07E-06 | 1,00E-18 | 1,00E-18 | 3,40E-07 | 1,11E-07 | 4,33E-07 | 9,40E-07 | 1,49E-05 | 1,00E-18 | 1,00E-18 |
| 5 | 1,00E-18 | 8,04E-07 | 2,96E-06 | 2,01E-06 | 1,70E-06 | 1,55E-06 | 1,29E-06 | 2,08E-06 | 1,74E-06 | 2,85E-06 | 2,38E-06 | 1,20E-05 | 1,80E-06 | 6,80E-06 |
| 6 | 1,73E-06 | 1,98E-06 | 1,68E-06 | 2,15E-06 | 2,27E-06 | 2,78E-06 | 2,66E-06 | 2,65E-06 | 2,82E-06 | 3,83E-06 | 3,80E-06 | 1,42E-05 | 2,43E-06 | 9,98E-06 |
| 7 | 1,02E-06 | 1,42E-06 | 2,73E-06 | 1,42E-06 | 2,82E-06 | 2,55E-06 | 1,98E-06 | 3,44E-06 | 2,56E-06 | 5,52E-06 | 6,76E-06 | 1,32E-05 | 3,36E-06 | 1,22E-05 |
| 8 | 2,11E-06 | 2,68E-06 | 4,35E-06 | 1,46E-06 | 3,31E-06 | 2,78E-06 | 2,08E-06 | 9,41E-06 | 3,37E-06 | 8,77E-06 | 8,81E-06 | 1,39E-05 | 3,64E-06 | 1,28E-05 |

* Sequência de amostragem. ** Valores expressos em moles L⁻¹

- Comparação entre os métodos “aluminon” e Wham de avaliação das espécies de alumínio na solução do solo

Construiu-se um gráfico para avaliar a relação existente entre as duas metodologias empregadas para separar as espécies de Al (Figura 7). Para tal, somou-se os resultados das formas lábeis

determinadas pelo programa WHAM (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, AlSO_4^+) e relacionou-as com os resultados obtidos pelo método “aluminon”. Além das concentrações de alumínio determinadas pelos dois métodos, relacionou-se também a atividade do alumínio (método WHAM) com a concentração deste elemento determinado pelo método aluminon.

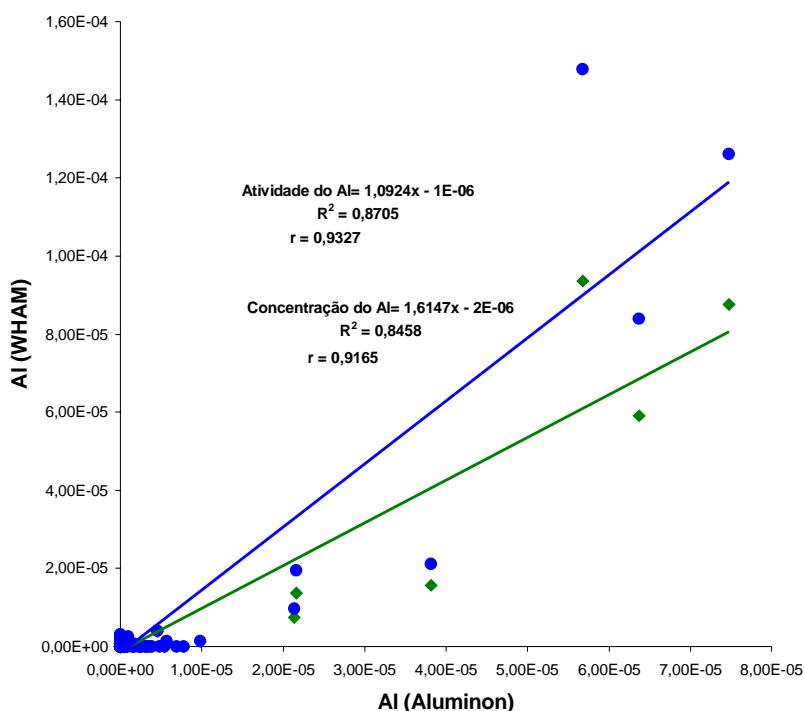


Figura 7. Relação entre o resultado determinado pelo “aluminon” e a soma das concentrações (em círculos) e atividades (em losangos) das formas consideradas lábeis determinadas pelo programa WHAM.

Verifica-se alta correlação entre os resultados obtidos pelo método químico aluminon e os dois parâmetros (concentrações e atividades iônicas) calculados pelo modelo geoquímico de especiação WHAM, com coeficientes de correlação de $r = 0,9165$ e $r = 0,9327$, respectivamente. Como a inclinação da linha de regressão entre os valores de concentração determinado pelo aluminon e a atividade do Al determinado pelo método WHAM ficou próximo de 1, há indicações de que as quantidades lidas pelo aluminon estão diretamente relacionadas com a atividade deste elemento na solução do solo. Portanto, o método pode ser considerado como adequado para a avaliação do Al lábil da solução do solo.

Conclusões

1 – As espécies iônicas de alumínio predominantes variam em função do tipo de solo, pH e concentração de NO_3^- na solução do solo.

2 – As principais espécies de alumínio nas soluções de solos sob pastagem do Bioma Cerrado são Al-M.O, Al^{3+} e $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, nesta ordem.

3 – A metodologia do “aluminon” é considerada adequada para avaliar a quantidade de Al lábil presente na solução dos solos.

Referências

- ADAMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; MADEIRA NETO, J. S. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W. J. *Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo*. São Paulo: Nobel; 1985. p.33-74
- ALVA, A. K.; EDWARDS, D. G.; ASHER, C. J.; BLAMEY, F. P. C. Relationships between root length of soybean and calculated activities of aluminium monomers in nutrient solution. *Soil Science Society of America*, Madison, v.50, n.4, p.959-962, jul./aug., 1986.
- BOUDOT, J. P.; BECQUER, T.; MERLET, D.; ROUILLER, J.; RANGER, J.; DAMBRINE, E.; MOHAMED, D. A. Potential role of aluminium toxicity in nutrient deficiencies as related to forest decline : an assessment of soil solution data from the Vosges mountains. In: LANDMANN, G.; BONNEAU, M. (Eds.). *Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains*. Berlin: Springer, 1995. p.270-285.
- BOUDOT, J. P.; BECQUER, T.; MERLET, D.; ROUILLER, J. Aluminium toxicity in declining forests a general overview with a seasonal assessment in the Vosges mountains (France). *Annales des Sciences Forestières*, Versailles, v.51, p.27-51, 1994.
- CHAVES, J. C. D.; PAVAN, M. A.; MIYAZAWA, M. Especificação química da solução do solo para interpretação da absorção de cálcio e alumínio por raízes de caféiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.26, p.447-453, 1991.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. p.212
- FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C.; DEUBER, R.; NOGUEIRA, S. S.; HIROCE, R. Influência do alumínio no crescimento e na nutrição mineral de cultivares de arroz. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.6, p.203-208, 1982.
- FRÁGUAS, J. C. Efeito do alumínio no comprimento de raízes e na absorção de fósforo e cálcio, em porta enxertos de videira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, p.251-255, 1993.
- GINTING, S.; WILKENS, S.; JOHNSON, B. B. Comparison of pyrocatechol and aluminon for the determination of "reactive" aluminium in the presence of organic acids. *Australian Journal Soil Research*, Melbourne, v.36, p.807-822, 2000.
- HUGHES, S.; REYNOLDS, B. Evaluation of porous ceramic cups for monitoring soil-water aluminium in acid soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.41, n.2, p.325-328, jun. 1990.
- KINRAIDE, T. B.; PARKER, D. R. Cation amelioration of aluminium toxicity in wheat. *Plant Physiology*, Minneapolis, v.83, p.546-551, 1987.
- MALAVOLTA, E. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Ceres, 1980.
- NOBLE, A. D.; SUMNER, M. E.; ALVA, A. K. The pH dependency of aluminum phytotoxicity alleviation by calcium sulfate. *Soil Science Society of America*, Madison, v.52, n.5, p.1398-1402, 1988a.
- NOBLE, A. D.; FEY, M. V.; SUMNER, M. E. Calcium-Aluminum balance and the growth of soybean roots in nutrient solutions. *Soil Science Society of America*, Madison, v.52, n.5, p.1651-1656, 1988b.
- RAIJ, B. V. Soil fertility and plant nutrition. *Plant soil-interactions at low pH*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. p.159-167.
- RAULUND-RASMUSSEN, K. Aluminium contamination and other changes of acid soil solution isolated by means of porcelain suction-cups. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.40, p.95-101, 1989.
- SANO, E. E.; BARCELLOS, A. O.; BEZERRA, H. S. Área e distribuição espacial de pastagens cultivadas no Cerrado Brasileiro. *Boletim de Pesquisa*, Brasília, n.3, p.1-21, 1999.
- TAKACHI, C. Y.; PAVAN, M. A. Efeito da natureza e da força iônica do cátion na acidez da solução do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.19, p.15-18, 1995.
- TIPPING, E. Humic ion-binding model VI: an improved description of the interactions of protons and metal ions with humic substances. *Aquatic Geochemistry*, Dordrecht, v.4, p.3-48, 1998.
- TIPPING, E. WHAM – a chemical equilibrium model and computer code for waters, sediments, and soils incorporating a discrete site/electrostatic model of ion-binding by humic substances. *Computational Geosciences*, Dordrecht, v.20, p.973-1023, 1994.
- VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; BARIONI, L. G.; BARCELLOS, A. O. Adubação na recuperação e na intensificação da produção animal em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Fealq, 2004. p.425-472.