



ATIVIDADE DO ALUMÍNIO NA SOLUÇÃO DO SOLO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO SUBMETIDO AO MANEJO DO SOLO E DE CULTURAS

Silvio Tulio SPERA^{1*}, Pedro Alexandre Varella ESCOSTEGUY²,
Henrique Pereira dos SANTOS³, Vilson Antônio KLEIN³

¹Embrapa Agrossilvipastoril, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

²Embrapa Trigo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

³Universidade Federal de Passo Fundo, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

*E-mail: silvio.spera@embrapa.br

Recebido em dezembro/2013; Aceito em maio/2014.

RESUMO: O objetivo do trabalho foi avaliar a interação do manejo do solo e de culturas nos atributos químicos da solução de solo referentes à porcentagem e atividade de formas de Al tóxico de camadas de solo entre 0 a 20 cm. As amostras foram provenientes de experimento conduzido em Passo Fundo, RS, em um Latossolo Vermelho distrófico, com mais de duas décadas de cultivo sem aplicação de calcário. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema de subparcelas. Os tratamentos foram: plantio direto (PD), cultivo mínimo com escarificador (PM) e preparo convencional com arado e grade (PC), combinados com as rotações de culturas: trigo/soja (R1); trigo/soja - ervilhaca/sorgo (R2) e trigo/soja - ervilhaca/sorgo - aveia branca/soja (R3), para avaliar o efeito da interação destas rotações com o tipo de manejo de solo no rendimento de grãos (RG), na massa seca da parte aérea (MS) e nos atributos químicos da solução do solo referentes à porcentagem e atividade de formas de Al tóxico, nas camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm. Uma floresta subtropical adjacente foi amostrada com a finalidade de se balizar os valores originais dos atributos avaliados. Não houve correlações entre o RG e a MS e os atributos de solo avaliados, em ambas as camadas, mesmo havendo diferenças de níveis de restrições físicas e químicas entre as camadas. Os atributos químicos da solução do solo não foram influenciados pela interação dos fatores estudados, sendo pouco influenciados pela rotação de culturas. O plantio direto propiciou maiores valores de carbono orgânico dissolvido e menor teor e atividade de Al na solução.

Palavra-chave: acidez; sistema plantio direto, preparo convencional, química do solo.

ACTIVITY ALUMINIUM ON THE SOIL SOLUTION OF A TYPIC HAPLUSTOX UNDER SOIL AND CROP MANagements

ABSTRACT: The aim of this work was to evaluate the interaction of soil and crop managements in chemical attributes on soil solution concerning the percentage of activity and forms of toxic Al in two soil layers situated among 0 to 20 cm. The samples were from experiment conducted in Passo Fundo, RS, in a Typic Haplustox, after more than two decades of cropping, without limestone application. The experimental design was randomized block, in subplots scheme. The treatments consisted of: no-tillage (PD), minimum cultivation with chisel plow (PM) and conventional plowing with disk plow (PC). These were combined with crop rotations: wheat-soybean (R1); wheat- soybean/common vetch-sorghum (R2) and wheat-soybean/common vetch-sorghum/white oats-soybean (R3), to assess the effect of these rotations interactions with the soil management type on the grains yield (RG), in the crops dry mass (MS) and chemical attributes of soil solution concerning the percentage on activity and forms of Al toxic, in layers of 0 to 6.7 cm and 6.8 to 20 cm. There were no correlations between the RG and the MS and the soil attributes assessed, in both layers, even when differences in levels of chemical and physical constraint between the layers. Chemical attributes of soil solution were not influenced by the studied factors interaction, being slightly influenced by crop rotation. The PD provided the greatest values of dissolved organic carbon and lowest level and Al activity in soil solution.

Keywords: soil acidity; no-till, soil plowing, soil chemistry.

1. INTRODUÇÃO

A solução do solo é o local predominante de ocorrência das reações químicas no solo e o meio natural de crescimento das plantas, além abrigar as frações químicas dos elementos imediatamente disponíveis no ambiente (WOLT, 1994). Assim, o conhecimento da atividade química dos elementos da solução do solo é de grande importância, tanto para estudos de manejo ambiental, como da fertilidade do solo e da nutrição de plantas (SALET et al., 1999). Os programas para computadores, como o MinteqA2 facilitam esta tarefa, fornecendo em minutos, a estimativa das espécies e as respectivas atividades na solução do solo (MEURER; ANGHINONI, 2012). A presença de alumínio (Al) em quantidades tóxicas é um dos principais problemas para o crescimento das culturas. Entretanto, no sistema plantio direto, a maior quantidade de ligantes orgânicos na solução do solo e a maior força iônica da solução nesse sistema condicionam redução na atividade química do alumínio, quando comparado ao preparo convencional por revolvimento (SALET et al., 1999; ZAMBROSI et al., 2007).

O alumínio da solução do solo pode ocorrer na forma livre Al^{3+} , complexado com hidróxidos [$Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_3^0$ e $Al(OH)_4^-$], com o sulfato ($AlSO_4^+$) e, ainda, pode ocorrer na forma de polímeros - polinúcleos de Al. O somatório das diferentes formas químicas de alumínio representa a concentração total do elemento na solução do solo. A distribuição de um elemento químico, nas formas possíveis permitidas pelas condições do meio, pode ser descrita com a utilização de constantes de equilíbrio (SPARKS, 2003), também denominadas constantes de estabilidade do complexo. Essas constantes são obtidas em experimentos com soluções simples contendo poucos íons e variam com a força iônica e a temperatura da solução (SPOSITO, 1996). Quanto maior o valor da constante de equilíbrio (cKE), maior será a estabilidade do complexo Al-ligante (SALET et al., 1999).

Os ligantes orgânicos mostram grande variação na efetividade de complexação do Al, devido às diferenças estruturais e grupos funcionais existentes entre os ligantes. As constantes de estabilidade variam muito também entre os grupos funcionais. Os polímeros de Al também têm sido estudados, pois já foram constatados efeitos tóxicos às plantas por polinúcleos de hidróxidos de Al. O sistema plantio direto mostra algumas condições para especulação quanto a presença de polímeros de Al. A calagem aplicada na superfície pode favorecer a associação do alumínio abundante no solo com as hidroxilas e carbonatos do calcário.

Anghinoni; Salet (2000) avaliaram nas camadas de 0 a 5 e de 5 a 15 cm, a especiação e a atividade química do Al na solução de um Latossolo Vermelho após oito anos com plantio direto e preparo convencional. Na camada de 5 a 15 cm não observaram diferenças entre os tipos de manejo quanto à composição da solução do solo. A diferença ocorreu, porém, na camada superficial, onde os efeitos do Al normalmente são mais acentuados, pois, de acordo com Oliveira et al. (2002) afeta a fase mais suscetível da cultura, o estágio de plântula. Anghinoni; Salet (2000) também constataram que, no sistema plantio direto 70% do Al solúvel estavam complexados por

ligantes orgânicos, enquanto no preparo convencional, somente 49% encontrava-se nessa forma. Isso pode ser parcialmente explicado pela maior quantidade de carbono orgânico dissolvido na solução do solo no sistema plantio direto (4,4 mmol L⁻¹), em comparação com o preparo convencional (2,0 mmol L⁻¹). Outra diferença entre os sistemas, é o percentual das espécies Al^{3+} e $Al(OH)_2^+$ consideradas tóxicas. As proporções de espécies tóxicas no preparo convencional foram em média 60% maior que as encontradas no plantio direto e a atividade química do Al livre na solução do solo com plantio direto foi menor. O fator preponderante na diminuição da atividade do Al no plantio direto foi, possivelmente, a maior quantidade de ligantes orgânicos solúveis. A força iônica teve pouca influência na atividade do Al (MEURER; ANGHINONI, 2012).

A constante adição de resíduos vegetais à superfície do solo no sistema PD favorece a diminuição da toxidez por Al, devido à atuação dos processos químicos de complexação de ligantes orgânicos e de hidrólise, em função do aumento do pH do solo (ANGHINONI; SALET, 2000; NOLLA et al., 2007; ALLEONI et al., 2010). Zambrosi et al. (2007) avaliaram a especiação iônica da solução do solo de amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, manejado com plantio direto, cinco anos após a aplicação superficial de 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola. A especiação, realizada com auxílio do programa Minteq indicou que para o Al, as principais espécies químicas foram os complexos com carbono orgânico dissolvido (Al-COD) e com o F. O carbono orgânico dissolvido (COD) foi o principal ligante do Mg e Ca, mas em muito maior magnitude para este último, refletindo importante participação dos ânions orgânicos na dinâmica desses nutrientes. O fosfato apresentou forte interação com o Al em solução.

A maior parte do Al solúvel no sistema plantio direto encontra-se complexado como Al ligado a compostos orgânicos de diversas formas, e conseqüentemente, neste tipo de manejo, a solução do solo contém menor teor de espécies tóxicas de alumínio em relação ao manejo, preparo convencional, em todas as camadas e ao cultivo com escarificador de hastes, nas camadas abaixo da superficial (ANGHINONI; SALET, 2000). A atividade do Al, portanto, é menor nas camadas superficiais dos manejos conservacionistas e menor, nas demais camadas do sistema plantio direto (ZAMBROSI et al., 2008; ALLEONI et al., 2010).

Salet et al. (1999) estudaram o efeito da complexação do Al pelo COD, estimado por programa de especiação química, nas camadas de 0 a 5 cm e de 5 a 15 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico de Passo Fundo, manejado com sistema plantio direto e preparo convencional, cuja calagem ocorrera há nove anos. Esse estudo mostrou que a maior parte do Al solúvel, no sistema plantio direto, estava complexada como COD, diferentemente do verificado no preparo convencional. Salet et al. (1999) constataram também que, após quase uma década sem calagem, observou-se forte correlação inversa entre atividade do Al^{3+} e o teor de COD, mas somente na camada de 0 a 5 cm. Na camada de 5 a 15 cm, os autores obtiveram maior porcentagem de espécies de Al tóxico na solução e menores teores de Al-COD independente do tipo de manejo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, foram selecionadas parcelas de um experimento instalado sobre um Latossolo Vermelho distrófico, localizado em Passo Fundo, RS. O experimento desse estudo foi conduzido durante 25 anos, em delineamento de blocos casualizados, com esquema de subparcelas, envolvendo tratamentos de manejo de solo: plantio direto (PD); preparo mínimo de solo com escarificador de hastes (PM) e; revolvimento com arado e grades, uma vez ao ano, antecedendo a cultura de inverno (PC). Em cada um dos tratamentos de manejo de solo, continha, como subparcela, as rotações de culturas trigo/soja - que é uma sucessão de culturas propriamente dita - (R1), trigo/soja e ervilhaca/sorgo (R2) e, trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja (R3). Não foi reaplicado calcário nas parcelas por 22 anos. Um fragmento de floresta subtropical com araucárias, adjacente ao experimento, foi amostrado com a finalidade de se balizar os valores originais dos atributos avaliados, entretanto, sem compor as comparações estatísticas.

As amostras foram coletadas em junho de 2007, em dois ambientes edáficos representando as camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm, amostras estas destinadas às análises químicas de rotina. Foram coletadas amostras de plantas para avaliação do rendimento de grãos e a massa da matéria seca da parte aérea das culturas e constam em Spera (2009) e Spera et al. (2011). O limite entre camadas de 6,7 cm de profundidade considerou o efeito mecânico do sulcador da semeadora usada.

A solução do solo foi extraída com o método da pasta saturada. Após serem saturadas com água deionizada, as amostras permaneceram 24 horas em repouso, a 4°C. Em seguida, foram acondicionadas em tubos de teflon, com capacidade de 500 mL. A solução foi extraída em centrífuga Ciatic CT 6000, por 30 min., a 3.200 rpm. Após a centrifugação, as amostras foram decantadas e filtradas com bomba de vácuo em membrana filtrante com diâmetro de poros de 42 µm. As amostras da solução foram então fracionadas e parte da alíquota (10 mL) foi acidificada a pH 3,0 com HCl (0,5 mol L⁻¹), acondicionadas e mantidas em congelador.

As análises de cátions monovalentes foram realizadas em fotômetro de chama Micronal, enquanto que as dos demais cátions, em espectrofotômetro de absorção atômica, no Laboratório de Solos da UPF. Os ânions e o C orgânico dissolvido (COD) foram analisados no Laboratório de Qualidade de Água da UFSM, mediante sistema de cromatografia iônica modelo Sykam IC S135, com soluções ultrafiltradas e diluídas em água Milli-Q. O COD foi determinado pelo método descrito por Silva (2001), em amostras filtradas em membrana de celulose com diâmetro de poros de 0,45 µm e 1,5 mL de dicromato de potássio 0,1 N, com incubação em estufa por 4 horas, a 60°C, e leitura em espectrofotômetro, no comprimento de onda de 580 nm.

Os teores dos cátions, ânions e COD analisados na solução do solo das duas camadas avaliadas foram obtidos, originalmente, em mmol L⁻¹ de solução. Entretanto, estes teores foram corrigidos de acordo com o volume de solução e a densidade do solo e, portanto, pôde ser expresso com base no volume de solo (mmol dm⁻³), o que representa a disponibilidade real do volume de solução no solo, de acordo com Spera (2009).

A especiação iônica da solução foi efetuada utilizando-se os valores de concentração dos cátions e dos ânions analisados, da força iônica calculada e do pH medido na solução. Com a especiação, estimou-se a distribuição das espécies iônicas livres e das espécies complexadas, obtendo-se a distribuição percentual, concentração e a atividades de cada espécie. As espécies ligadas aos ânions orgânicos foram estimadas com base no teor de COD, utilizando o modelo "Gaussian DOM" (DOM = matéria orgânica dissolvida), conforme Grimm et al. (1991).

A força iônica das soluções foi calculada mediante equação que correlaciona esta variável com a condutividade elétrica:

$$\log I (M) = 1,159 + 1,09 * \log CE25 (dS m^{-1});$$

sendo que: CE25 é a condutividade elétrica corrigida para 25 °C, de acordo com Sparks (2003) e Escosteguy (2001). Após efetuar as estimativas de espécies químicas, foram obtidos os valores da atividade do Al em solução, calculados com auxílio do programa computacional VisualMinteqA2 ver.2.61, a partir da concentração do Al em solução. Nesse trabalho, foram comparados os efeitos dos tratamentos nos atributos químicos da solução do solo: Al³⁺, AlOH²⁺, Al(OH)₂⁺, o somatório das espécies de Al tóxico (Al³⁺ + AlOH²⁺ + Al(OH)₂⁺) e o Al-DOM, atributos estes relevantes quanto à toxidez do Al do solo.

Os resultados das análises dos atributos da solução do solo foram submetidos à análise de variância e de correlação com o programa CoStat (COHORT, 2009), enquanto as médias dos valores dos atributos químicos da solução do solo das camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm foram comparadas com o teste t pareado (SNEDECOR; COCHRAN, 1989).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de pH, da força iônica, do COD, dos cátions e de ânions da solução foram utilizados para estimar a especiação iônica, com o software MinteqA2 e avaliar a atividade do Al tóxico às plantas, na solução do solo. Os resultados da análise de variância dos valores dos percentuais e das atividades de diferentes espécies químicas de Al na solução do solo, mostraram que, na camada de 0 a 6,7 cm, houve efeito da interação entre manejo de solo e rotação de culturas nas variáveis Al³⁺ e Al(OH)₂⁺ (Figuras 1, 2, 3 e 4).

Os valores de Al³⁺ e de Al(OH)₂⁺, na camada de 0 a 6,7 cm (Figuras 1, 2, 3 e 4), foram maiores nas rotações R1 (Al³⁺) e R1 e R2 (Al(OH)₂⁺), nos manejos PC e PM, indicando que a mobilização do solo alterou os percentuais e a atividade destas espécies tóxicas de Al, além do tipo de rotação de culturas. Em geral, os percentuais de Al complexados com ligantes orgânicos foram maiores na mata e nas camadas dos manejos conservacionistas, em relação ao manejo PC. As porcentagens de Al tóxico, principalmente na forma de Al³⁺, foram maiores nas camadas superficiais do manejo PC e menores no PD, concordando com as observações de Salet et al. (1999) e de Cambri (2004), embora estes autores avaliassem somente as camadas de 0 a 5 e de 5 a 15 cm de solo sob os manejos PC e PD.

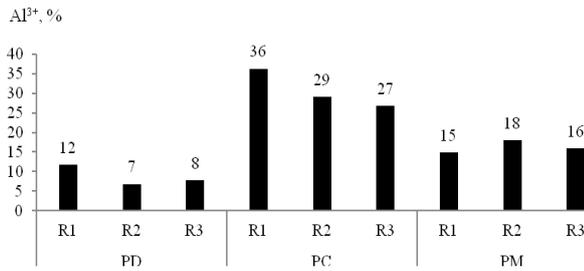


Figura 1. Percentuais de Al³⁺ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um LV distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três rotações de culturas.

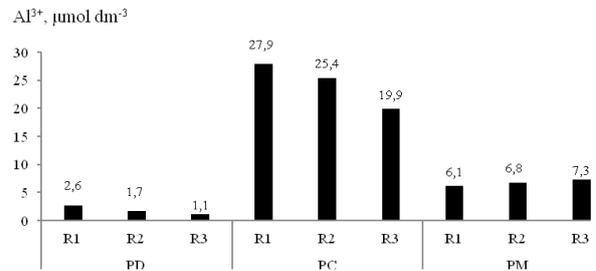


Figura 3. Atividade de Al³⁺ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um LV distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três rotações de culturas.

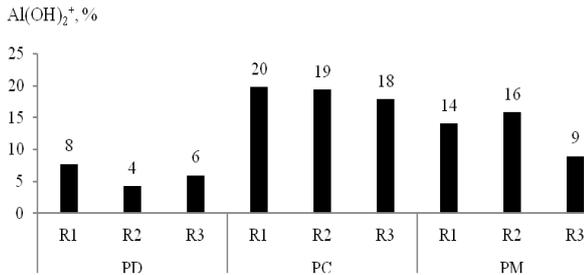


Figura 2. Percentuais de Al(OH)₂⁺ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um LV distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três rotações de culturas.

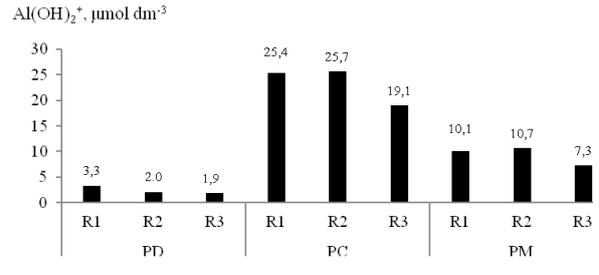


Figura 4. Atividade de Al(OH)₂⁺ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um LV distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três rotações de culturas.

Tabela 1. Valores de percentuais de formas de Al tóxico na solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

Médias	Camada, cm		Camada, cm		Valor de t
	0 – 6,7	CV, %	6,8 - 20	CV, %	
	Al ³⁺ , %				
PD	8b	7,9	11	8,2	0,78 ^{ns}
PC	30a	6,8	24	6,3	0,96 ^{ns}
PM	16b	5,4	23	13,3	5,99*
R1	21a	7,3	18	6,8	0,67 ^{ns}
R2	22a	8,6	18	7,9	0,73 ^{ns}
R3	13b	8,5	22	7,4	3,42*
Mata	13	11,1	11	13,2	0,44 ^{ns}
	Al(OH) ₂ ⁺ , %				
PD	6c	7,4	8	6,6	1,84 ^{ns}
PC	19a	6,2	18	10,0	0,63 ^{ns}
PM	13b	6,4	15	16,6	0,98 ^{ns}
R1	15a	7,3	15	6,5	0,35 ^{ns}
R2	12b	7,1	13	6,8	0,88 ^{ns}
R3	11b	8,9	13	7,3	1,66 ^{ns}
Mata	8	16,3	7	14,8	1,08 ^{ns}
	Al(OH) ₂ ⁺ , %				
PD	3b	7,8	4	6,7	4,44*
PC	8a	7,2	9	7,1	0,39 ^{ns}
PM	7a	9,1	6	7,6	0,98 ^{ns}
R1	8a	7,2	8	7,4	0,16 ^{ns}
R2	6ab	5,2	7	8,5	1,36 ^{ns}
R3	5b	10,0	5	8,0	0,81 ^{ns}
Mata	3	22,7	2	17,7	1,58 ^{ns}
	Σ Al tóxico, %				
PD	18c	7,4	44	6,9	1,44 ^{ns}
PC	58a	13,7	52	11,3	1,23 ^{ns}
PM	37b	5,7	23	7,7	1,80 ^{ns}
R1	45a	7,3	41	6,4	0,91 ^{ns}
R2	39a	7,7	38	6,8	0,04 ^{ns}
R3	29b	8,6	40	7,2	3,11*
Mata	24	12,5	19	16,4	0,83 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Na camada de 0 a 6,7 cm, houve efeito isolado dos fatores manejo e rotação nos resultados de percentuais e atividades de Al^{3+} , $AlOH^{2+}$, $Al(OH)_2^+$ e no somatório das espécies de Al tóxico ($Al^{3+} + AlOH^{2+} + Al(OH)_2^+$) (Tabelas 1 e 3). O Al-DOM variou somente entre os tipos de manejo, na camada superficial (Tabelas 2 e 4).

Em geral, os percentuais de Al complexados com ligantes orgânicos foram maiores na mata e nas camadas dos manejos conservacionistas, em relação ao manejo PC. Os resultados indicaram que a maior parte do Al solúvel no PM e no PD encontrava-se complexado com compostos orgânicos. Embora houvesse uma tendência de que esta espécie de Al aumente com a profundidade do

solo, as diferenças não foram confirmadas pelo teste t. Como consequência, nestes manejos, a solução do solo contém, na camada de 0 a 6,7 cm, menor percentual de espécies tóxicas de alumínio, em relação ao PC (Tabela 2). As atividades das formas de Al tóxico refletiram os efeitos dos percentuais e atividades de Al tóxico e de Al-DOM (Tabelas 3 e 4). Os mesmos efeitos da interação entre manejo e rotações podem ser observados nas Figuras 3 e 4, com mais intensidade no manejo PC. A atividade do Al, portanto, foi menor nas camadas superficiais dos manejos conservacionistas e na segunda camada do PD, em relação ao PC. Constatações semelhantes foram obtidas por Zambrosi et al., (2008).

Tabela 2. Valores de percentuais de Al-DOM na solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

Médias	Camada, cm		Camada, cm		Valor de t
	0 - 6,7	CV, %	6,8 - 20	CV, %	
	Al-DOM, %				
PD ⁽¹⁾	39b	7,7	56	6,1	2,21 ^{ns}
PC	29c	5,9	40	5,5	0,66 ^{ns}
PM	43a	12,7	33	7,2	1,62 ^{ns}
Rotações ⁽²⁾	37	9,0	43	8,9	1,61 ^{ns}
Mata	65	5,2	76	3,3	1,41 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Tabela 3. Valores da atividade de formas de Al tóxico na solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

Médias	Camada, cm		Camada, cm		Valor de t
	0 - 6,7	CV, %	6,8 - 20	CV, %	
	Al^{3+} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$				
PD	1,8b	9,4	6,7b	10,6	1,80 ^{ns}
PC	24,3a	8,2	18,2a	9,2	0,60 ^{ns}
PM	6,5b	5,3	21,2a	7,5	4,07*
R1	14,0a	11,0	12,2b	8,1	0,30 ^{ns}
R2	13,7a	10,9	11,8b	9,8	0,26 ^{ns}
R3	5,0b	9,4	22,0a	9,0	2,99*
Mata	15,3	7,1	16,3	10,6	0,45 ^{ns}
	$AlOH^{2+}$, $\mu\text{mol dm}^{-3}$				
PD	2,5b	8,6	7,2b	10,1	1,75 ^{ns}
PC	23,3a	6,7	20,5a	7,7	0,42 ^{ns}
PM	9,3b	6,0	19,2a	5,3	4,27*
R1	15,5a	9,6	14,8ab	7,5	0,16 ^{ns}
R2	12,2ab	10,0	12,2a	8,9	0,01 ^{ns}
R3	7,5b	9,8	19,8a	8,4	3,24*
Mata	14,8	13,2	12,4	12,0	1,09 ^{ns}
	$Al(OH)_2^+$, $\mu\text{mol dm}^{-3}$				
PD	1,7c	8,3	3,8b	9,1	1,96 ^{ns}
PC	12,2a	4,6	12,3a	6,0	0,14 ^{ns}
PM	7,2b	8,4	9,3a	5,0	1,30 ^{ns}
R1	9,3a	8,5	9,3	7,7	0,01 ^{ns}
R2	5,8b	8,7	7,0	8,2	1,00 ^{ns}
R3	5,8b	10,4	9,2	8,2	2,45 ^{ns}
Mata	7,2	20,3	5,2	14,4	1,58 ^{ns}
	Σ Al tóxico, $\mu\text{mol dm}^{-3}$				
PD	5,8b	8,6	17,5b	10,1	1,76 ^{ns}
PC	60,3a	6,8	51,2a	7,8	0,51 ^{ns}
PM	23,3b	6,1	49,5a	5,9	3,79*
R1	38,8a	9,7	36,3	7,5	0,24 ^{ns}
R2	32,2ab	10,2	30,8	8,9	0,10 ^{ns}
R3	18,5b	9,7	51,0	8,5	3,15*
Mata	37,3	11,7	33,9	14,0	0,65 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Tabela 4. Valores da atividade do Al-DOM na solução do solo de duas camadas de um LV distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

Médias	Camada, cm		Camada, cm		Valor de t
	0 – 6,7	CV, %	6,8 - 20	CV, %	
	Al-DOM, $\mu\text{mol dm}^{-3}$				
PD ⁽¹⁾	27,8b	6,8	64,5	9,3	1,65 ^{ns}
PC	50,6a	5,3	50,2	5,9	0,05 ^{ns}
PM	50,0a	5,5	76,2	6,3	3,02*
Rotações ⁽²⁾	42,8	6,5	63,6	8,0	2,35*
Mata	187,0	6,1	234,1	6,4	1,10 ^{ns}

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Tabela 5. Correlações fortes (Pearson) entre rendimentos de grãos e de matéria seca de culturas com atributos físicos e químicos de um LV distrófico submetido a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

Variáveis correlacionadas	Correlação (r)	P (r = 0)	Camada avaliada, cm
			Solução do solo
MS soja e ativ. Al ³⁺	-0,61	0,0008	0 a 6,7
MS soja e ativ. AlOH ²⁺	-0,63	0,0004	0 a 6,7
MS soja e ativ. Al tóxico	-0,62	0,0006	0 a 6,7
MS soja e ativ. Al DOM	0,70	<0,0001	0 a 6,7
MS trigo e Al ³⁺ sol. solo	-0,61	0,0008	0 a 6,7
RG sorgo e Al ³⁺ sol. solo	-0,63	0,0049	0 a 6,7

RG = rendimento de grãos; MS = matéria seca.

Os valores do pH da solução do solo do presente estudo foram ao redor de 5,1, e que, de acordo com Kinraide (1991) e Nolla et al. (2007), é o valor no qual as mais importantes formas tóxicas do Al, em condição de acidez, principalmente o AlOH²⁺ e o Al(OH)₂⁺, atingem elevados valores relativos de atividade.

Salet et al. (1999) e Cambri (2004) estudaram, nas camadas 0 a 5 cm e 5 a 10 cm, o efeito da complexação do Al pelo COD estimado por programas de especiação química, em um Latossolo Vermelho distrófico de Passo Fundo, sob PD e PC, cuja calagem ocorrera há menos de dez anos. Esse estudo mostrou que a maior parte do Al solúvel no PD se encontrava complexado com COD, diferentemente do verificado no PC. Esta observação foi aprofundada neste trabalho, uma vez que a dinâmica do C no solo depende do tempo de cultivo e varia com o tipo de manejo de solo e rotações de culturas (CAMBRI, 2004; JANTÁLIA et al., 2006; VIEIRA et al., 2009).

A comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os obtidos por Salet et al. (1999), Cambri (2004) e Vieira et al. (2009) mostra que, após 22 anos sem calagem, os resultados foram de magnitudes diferentes, mas com tendência semelhante. No presente trabalho, observou-se correlação inversa moderada entre atividade do Al³⁺ e o teor de COD, na camada superficial, assim como observaram Salet et al. (1999), Cambri (2004), Vieira et al. (2009) e Alleoni et al. (2010). Na camada subsuperficial, obteve-se maior porcentagem de Al tóxico na solução e maior variação dos teores de COD entre os tipos de manejo, mas não foram constatadas correlações entre estes atributos (Tabela 4). Houve, porém, correlação inversa entre o COD e o somatório das espécies tóxicas de Al, nesta última camada.

A produção das culturas e a atividade dos tipos de Al tóxicos se correlacionaram inversamente com a MS das culturas de soja e trigo e com o RG do sorgo, porém, houve correlação positiva entre a MS de soja e o Al complexado ao carbono da solução (Tabela 5). Os resultados mostram que o único atributo com o qual a

atividade do Al³⁺ teve muito fraca correlação foi o teor de argila do solo, porém, isto pode ser atribuído a pouca variação dos valores do teor de argila no solo.

4. CONCLUSÕES

O preparo convencional aumenta os valores de percentual e atividade do alumínio na solução do solo e percentual e a atividade do somatório das formas de alumínio tóxico na solução do solo, destacadamente na camada de 0 a 6,7 cm e na média das rotações de culturas.

Na solução do solo, o sistema plantio direto propicia menor teor e atividade de Al, amenizando a toxidez de Al, em relação aos demais tipos de manejo.

Correlações fortes entre atividade e teor do alumínio da solução do solo e rendimento de grãos ou produção de matéria seca foram observadas em somente seis variáveis correlacionadas.

5. REFERÊNCIAS

ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.74, n.3, p.1.010-1.017, maio 2010.

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. In: KAMINSKI, J., (Coord.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas: SBCS-NRS, 2000, p.41-59.

CAMBRI, M. A. *Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto*. 2004. 83f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

COHORT SOFTWARES. *Free Trial Version of CoStat 6.4*. Disponível em: <<http://www.cohort.com>>. Acesso em: 02/04/2009.

- ESCOSTEGUY, P. A. V. **Exchangeable and formation constants of copper, zinc and cadmium with humic substances at indigenous concentrations**. 2001. 208f. Thesis (Ph.D. in Soil Science) – University of Wisconsin, Madison, 2001.
- GEBRIM, F. O. et al. Lixiviação de cátions favorecida pela presença de ânions inorgânicos e ácidos orgânicos de baixa massa molecular em solos adubados com camadas de aviário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.esp., p.2.255-2.267, dez. 2008.
- GLOAGUEN, T. V. et al. Composição química da solução do solo nas diferentes classes de poros do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p.1.105-1.113, set./out. 2009.
- GRIMM, D. M. et al. Continuous multiligand distribution model used to predict the stability constant of copper (II) metal complexation with humic material from fluorescence quenching data. **Environment Science Technology**, Athens, v.25, n.9, p.1.427-1.431, set. 1991.
- JANTÁLIA, C. P. et al. Mudanças no estoque de C do solo em áreas de produção de grãos: avaliação do impacto do manejo do solo. In: ALVES, B. J. R. et al. (Eds.). **Manejo de sistemas agrícolas. Impacto no sequestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa**. Porto Alegre: Genesis, 2006. p.35-57.
- KINRAIDE, T. B. Identify of the rhizotoxic aluminum species. In: WRIGHT, R. S. et al. (Eds.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer, 1991. p.717-728.
- MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 5.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. p.87-113.
- NOLLA, A. et al. Crescimento, morfologia radicular e liberação de compostos orgânicos por plântulas de soja em função da atividade de alumínio na solução do solo de campo natural. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.1, p.97-101, jan./fev. 2007.
- SALET, R. L. et al. Atividade do alumínio na solução do solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v.1, n.1, p.9-13, jun. 1999.
- SILVA, L. S. **Dinâmica da matéria orgânica e a interação com componentes inorgânicos na planta e no solo**. 2001. 167f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames: ISU Press, 1989. 503p.
- SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2.ed. San Diego: Academic Press, 2003. 352p.
- SPERA, S. T. **Atributos físicos e químicos de um latossolo e produtividade de culturas, em função de manejo de solo e de rotação de culturas**. 2009. 228f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.
- SPERA, S. T. et al. Atributos químicos restritivos de latossolo vermelho distrófico e tipos de manejo de solo e rotação de culturas. **Agrarian**, Dourados, v.4, n.14, p.324-334, jul./set. 2011.
- SPOSITO, G. **The environmental chemistry of aluminum**. 2.ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1996. 464p.
- VIEIRA, F. C. B. et al. Organic matter kept Al toxicity in a subtropical no-tillage soil under long-term (21-year) legume-based crop systems and N fertilization. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.47, n.3, p.707-714, abr. 2009.
- WOLT, J. D. **Soil solution chemistry: applications to environmental science and agriculture**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 345p.
- ZAMBROSI, F. C. B. et al. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.1, p.110-117, jan./fev. 2007.
- ZAMBROSI, F. C. B. et al. Liming and ionic speciation of an Oxisol under no-till system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, n.2, p.190-203, nov./dez. 2008.