

Comissão 2.4 - Química do solo

GEOQUÍMICA DE SOLOS DO PANTANAL NORTE, MATO GROSSO⁽¹⁾

Elaine de Arruda Oliveira Coringa⁽²⁾, Eduardo Guimarães Couto⁽³⁾ & Pablo Vidal Torrado⁽⁴⁾

RESUMO

A caracterização e análise geoquímica de solos permitem compreender os processos de migração, dispersão e concentração de elementos químicos no perfil, embasando a correlação dos atributos deles com as classes de solos formadas, o que possibilita inferências acerca das gêneses desses solos. Esta pesquisa teve por objetivos caracterizar e interpretar a composição geoquímica total de elementos maiores e menores em classes de solos representativas do Pantanal norte, na sub-região de Barão de Melgaço, Mato Grosso, Brasil. Foram selecionados 20 perfis das principais classes de solos do Pantanal e analisadas amostras dos horizontes A e B (ou C) quanto à concentração de óxidos totais por espectrometria de fluorescência de raios-X, além das caracterizações física, química e mineralógica. Os solos subdividiram-se em dois tipos geoquímicos: um composto por textura arenosa a franco-arenosa com teores relativamente elevados de SiO₂ e predominância de caulinita e quartzo, com menor teor de bases e elementos-traço; e outro composto por textura mais argilosa, geoquimicamente heterogêneos e com teores significativos de minerais 2:1, Al₂O₃, óxidos de Fe e Mn, bases e elementos-traço.

Termos de indexação: óxidos totais, solos hidromórficos, elementos-traço.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical - Recursos Naturais, da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT. Recebido para publicação em 20 de fevereiro de 2014 e aprovado em 14 de outubro de 2014.

⁽²⁾ Professora, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, *Campus* Cuiabá Bela Vista. Av. Juliano Costa Marques, s/n. CEP 78050-560 Cuiabá (MT). E-mail: elaine.coringa@blv.ifmt.edu.br

⁽³⁾ Professor Associado, Departamento de Solos e Engenharia Rural, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UFMT. Av. Fernando Corrêa da Costa, s/n. CEP 78060-900 Cuiabá (MT). E-mail: couto@ufmt.br

⁽⁴⁾ Professor, Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11. Caixa Postal 09. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: pvidal@usp.br

SUMMARY: SOIL GEOCHEMISTRY OF THE NORTHERN PANTANAL, MATO GROSSO, BRAZIL

Characterization and geochemical analysis of soils allows us to understand the processes of migration, dispersal, and concentration of chemical elements in the profile, serving as a basis for correlation of soil properties with the soil classes formed, which allows inferences about soil genesis. The aim of this study was to characterize and interpret the total geochemical composition of major and minor elements in soil classes representative of the northern Pantanal in the Barão de Melgaço subregion, Mato Grosso (Brazil). We selected 20 profiles of the major soil types of the Pantanal and analyzed samples of the A and B (or C) horizons in regard to the concentration of total oxides by X-ray fluorescence spectrometry, as well as physical, chemical, and mineralogical characterization. The soils are subdivided into two geochemical types: one composed of sandy to sandy loam soils with relatively high levels of SiO₂ and predominance of kaolinite and quartz, with lower levels of trace elements and bases; and another composed of a more clayey soil texture, geochemically heterogeneous, with significant contents of 2:1 clay minerals, Al₂O₃, Fe and Mn oxides, alkalis, and trace elements.

Index terms: total oxides, hydromorphic soils, trace elements.

INTRODUÇÃO

O padrão de distribuição da concentração de elementos no solo é influenciado principalmente pela litologia do material de origem, assim como pelos processos de formação do solo, que modificam a composição geoquímica básica e redistribuem o teor de metais no perfil do solo (Bini et al., 2011).

Os estudos de gênese dos solos com ênfase na geoquímica dos elementos presentes constituem uma ferramenta necessária para a classificação e o levantamento pedológico, possibilitando inferências acerca dos atributos físicos, químicos e mineralógicos desses solos (Lacerda et al., 2000). Além disso, a análise geoquímica procura estabelecer relações entre os solos e as potenciais fontes dos elementos (naturais ou antropogênicas) por meio da determinação da concentração de elementos maiores e elementos-traço, permitindo estimar e quantificar o fluxo de elementos durante o intemperismo, o processo de lixiviação e os ganhos e as perdas em relação ao material de origem (Chadwick et al., 1990).

Esses estudos são particularmente importantes em solos de áreas úmidas como o Pantanal norte-mato-grossense. Esses solos mantêm uma estreita relação com os tipos de sedimentos que foram depositados durante a sua gênese e que deram origem a uma diversidade de solos, cuja morfologia reflete as condições do regime hídrico de cada microambiente por meio dos processos redoximórficos atuantes.

Por isso, a análise geoquímica dos solos do Pantanal norte-mato-grossense em conjunto com os atributos físicos, químicos e mineralógicos torna-se uma ferramenta importante para a compreensão dos processos de migração, dispersão e concentração de elementos químicos no solo, permitindo a correlação com as classes de solos formadas, possibilitando inferências acerca das gênese desses solos. Os objetivos deste trabalho foram caracterizar e

interpretar a composição geoquímica total de elementos maiores e menores em classes de solos representativas do Pantanal norte-mato-grossense, na sub-região de Barão de Melgaço, Mato Grosso.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo:

O estudo foi realizado em solos do Pantanal de Barão de Melgaço, Mato Grosso, mais precisamente na Reserva Particular do Patrimônio Natural do Serviço Social do Comércio (RPPN SESC Pantanal), situada entre os rios Cuiabá e São Lourenço. A RPPN SESC Pantanal é uma área de 106.644 ha, inserida na sub-região do Pantanal de Barão de Melgaço, entre os paralelos 16° a 17° S e meridianos 56° a 57° W (Beirigo et al., 2010). Constitui a terceira sub-região do Pantanal mato-grossense em extensão, com aproximadamente 13,2 % da área total (Silva & Abdon, 1998). O clima da região é tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, de 100 a 150 m de altitude, com precipitação pluvial média anual entre 1.100 e 1.200 mm (com oito meses de déficit hídrico) e temperatura média de 22° a 32 °C, com temperaturas mais amenas associadas às florestas (em torno de 21 °C) (Hasenack et al., 2003). O período de inundação no Pantanal norte-mato-grossense é resultante do regime de chuvas locais, que coincide com a estação chuvosa (de outubro a abril); o período de vazante combina com a estação seca (maio a setembro) (Cunha et al., 2006).

O Pantanal mato-grossense pode ser caracterizado como uma grande e complexa planície de coalescência detrítico-aluvial (Ab'Saber, 1988), constituída por rochas pertencentes às Coberturas Detrito-Lateríticas do período Terciário (Neógeno) e pela Formação Pantanal e Aluviões recentes, do período Quaternário

(Pinto et al., 2002). Como consequência, o material de origem dos solos é formado por sedimentos arenosos, silticoarenosos, argiloarenosos e arenoconglomeráticos semiconsolidados a consolidados da Formação Pantanal. Os solos formados, em sua maioria, são influenciados por processos redoximórficos, que alteram o equilíbrio dos elementos no solo e causam decréscimo no potencial eletroquímico (Eh), propiciando a alternância nas condições de redução e oxidação dos óxidos de Fe e Mn (Lima et al., 2005).

Foram selecionados 20 perfis para análise geoquímica dos solos, situados em posições distintas na paisagem (Figura 1), que representam os principais solos do Pantanal norte-mato-grossense: Planossolos (nas cordilheiras), Plintossolos (nas cordilheiras, campos de inundação sazonal, vazantes, planícies fluviais e baías), Cambissolos Flúvicos e Neossolos Flúvicos (nos terraços fluviais do rio São Lourenço e diques marginais do rio Cuiabá); Gleissolos (nas planícies de inundação do rio Cuiabá) e Luvisolos (nos terraços fluviais do rio São Lourenço).

Análises laboratoriais

As concentrações dos elementos químicos na forma de óxidos totais foram determinadas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), em

espectrômetro de raios-X por dispersão em energia (Shimadzu EDX-700HS), equipado com tubo de ródio (Rh) e detector de Si (Li), e por rotina de análise semiquantitativa (por parâmetros internos fundamentais), implementada por meio do programa *EDX-Software*. As medidas foram feitas em vácuo, com tempo de aquisição de 200 s por canal analítico e feixe de 10 mm de diâmetro. Foram quantificados os elementos maiores (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K) e os menores ou traço (Mn, P, S, Cu, Zn, Ti, Ni, Cr, Zr, V, Sr, Sn, Y, Rb, Ba) na TFSA dos horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (B ou C) dos perfis.

As análises mineralógicas foram realizadas na fração argila dos horizontes subsuperficiais (B ou C) dos solos, em lâminas orientadas montadas após: oxidação da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio a quente, até cessar a emissão de CO₂; desferrificação das amostras com ditionito de sódio (3 g) + 0,3 mol L⁻¹ de citrato de sódio + bicarbonato de sódio aquecidos a 80 °C (Jackson, 1979). Após os tratamentos, a fração argila foi separada por peneiramento a 0,053 mm e sifonação após dispersão da argila. A argila obtida foi submetida à saturação com K⁺ (KCl 1 mol L⁻¹) e aquecimento em mufla a 110 e 550 °C por 2 h, saturação com Mg²⁺ (MgCl₂ 1 mol L⁻¹) e solvatação em etilenoglicol (EG) (Mehra & Jackson,

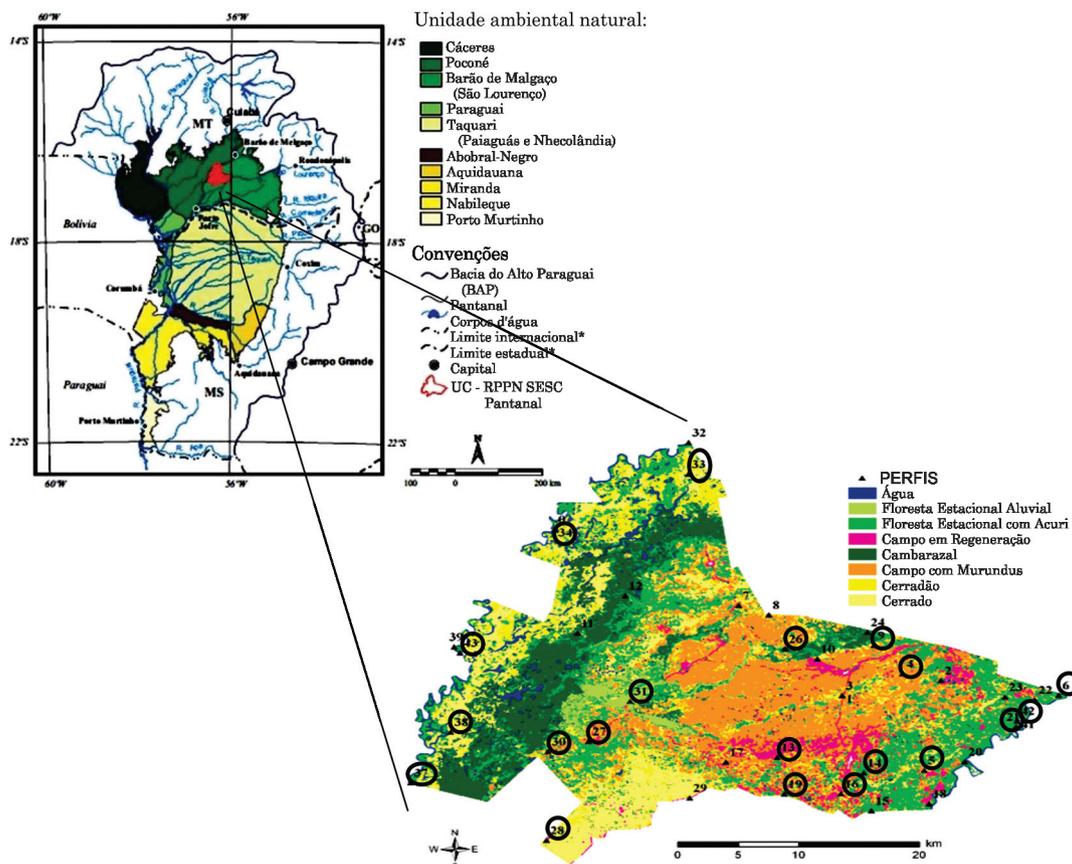


Figura 1. Localização da área de estudos; (a) Sub-regiões do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai (b) RPPN SESC Pantanal com suas fitofisionomias vegetais e pontos de amostragem.

Fonte: Cordeiro (2004) e Beirigo et al. (2010).

1960; Moore & Reynolds, 1989). As leituras foram feitas em difratômetro de raios-X com tubo de cobre (Cu) e monocromador de grafite, com energia de irradiação 40 KV e 30 mA, intervalo de varredura de 2° a 45° (2 θ). A interpretação dos resultados mineralógicos foi realizada por identificação dos espaçamentos interplanares (d), da forma, da largura e da intensidade das reflexões nos difratogramas frente aos tratamentos utilizados, confirmada por tabelas do *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS), disponível em Resende et al. (2005).

Análise estatística

Os resultados geoquímicos foram submetidos à análise estatística descritiva a fim de determinar os valores mínimos e máximos, média, mediana, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose. A hipótese de normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Para definir a relação entre os elementos estudados, utilizaram-se as correlações de Pearson e a Análise de Componentes Principais (ACP), que permitiram identificar os componentes responsáveis pela variação total dos dados e os grupos de variáveis explicativas dessas variações (Hair et al., 2005). Os fatores principais que respondem pela maior parte da variabilidade de todas as variáveis foram identificados, utilizando-se a matriz de correlação. A análise estatística foi realizada com o auxílio do programa estatístico XLSTAT 2011.1.01 (ADDINSOFT).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mineralogia da fração argila

Os solos possuem perfil mineralógico semelhante, constituído basicamente por: caulinita (Ct), mica (ilita) (Mi) e traços de quartzo (Qz), com algumas ocorrências de pequenas quantidades de minerais 2:1 expansivos como a esmectita (Es) (e possivelmente interestratificados mica-vermiculita) e a vermiculita com hidróxi entrecamadas (VHE) (Quadro 1, Figura 2). Essa composição mineralógica deve-se principalmente à natureza sedimentar do material de origem desses solos, formados a partir de sedimentos aluviais oriundos de materiais com diferentes estádios de intemperização, e à sazonalidade climática, que restringe a drenagem em determinada época do ano, dificultando a saída de bases e sílica do sistema, favorecendo a formação de argilominerais 2:1. De modo geral, as condições restritas de drenagem, resultantes das características ambientais e da granulometria fina dos sedimentos originais, condicionaram um processo de intemperismo menos acentuado do que aquele normalmente observado nos solos bem-drenados.

Algumas evidências discutidas por Furquim et al. (2010) sustentam a origem alóctone da caulinita em solos do Pantanal, pois geralmente esses solos são pouco

ácidos ou alcalinos, mal-drenados e com saturação por bases alta, condições opostas para a formação desse mineral. A caulinita seria então transportada pelos sistemas fluviais até os solos adjacentes, definindo a origem alóctone da caulinita. Entretanto, essas alternâncias sazonais teriam também favorecido a formação da ilita sob condições de maior evaporação (estações secas). Essa afirmação está de acordo com o campo de estabilidade da caulinita proposto por Dixon (1989), em que ambientes que permitem o estabelecimento de elevada relação $[K^+]/[H^+]$, o equilíbrio geoquímico é deslocado no sentido da formação de micas em vez da caulinita.

No Pantanal, as condições de drenagem, aliada à baixa permeabilidade do material de origem argiloso, dificultam a lixiviação das bases e da sílica e contribuem para maior atividade de silício e bases no sistema. Essas condições foram favoráveis à manutenção dos minerais 2:1 secundários no solo, uma vez que o próprio material de origem é rico em sílica. Uma fonte de esmectita seria, também, o aporte desse argilomineral por meio dos pulsos de inundação no Pantanal, dando origem às esmectitas detríticas. Entretanto, o fluxo lateral de água parece contribuir para a perda gradativa de sílica, e o resultado foi a menor intensidade das reflexões dos minerais 2:1 secundários nos horizontes e na ausência de reflexão basal (001) nos horizontes dos outros solos.

Geoquímica dos elementos maiores

Os elementos que ocorrem em maior proporção em todos os solos estudados são: silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3), potássio (K_2O), magnésio (MgO), titânio (TiO_2), cálcio (CaO), enxofre (SO_3) e fósforo (P_2O_5) (Quadro 2); esses também são abundantes nos solos de várzea estudados por Prakongkep et al. (2008), bem como por Furquim et al. (2010) nos do Pantanal da Nhecolândia, MS. As concentrações médias de Al, Fe, Ti e Mg dos solos da RPPN são comparáveis a solos com condições ambientais semelhantes (Lee, 2006; Prakongkep et al., 2008; Furquim et al., 2010).

A distribuição dos elementos maiores é controlada principalmente pelo teor relativo de minerais na fração argila dos solos: teores elevados de SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O geralmente estão relacionados com clorita e ilita em abundância, pois o Si, Al e K são mais facilmente retidos na estrutura desses minerais (Setti et al., 2004). Em particular, a ilita é importante carreador de K_2O em sedimentos (Wedepohl, 1978); entretanto, Fe_2O_3 e MgO estão relacionados a solos ricos em esmectita autigênica (Setti et al., 2004). Todos os solos da RPPN possuem caulinita, mica (ilita), traços de esmectita e VHE na fração argila.

Nos solos estudados, à medida que o material de origem é alterado nos horizontes subsuperficiais, ocorreram perdas dos teores de SiO_2 , CaO e P_2O_5 nos horizontes inferiores e aumento relativo de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 , principalmente nos solos de cordilheira

(Planossolos e Luvisolos), corroborando Ferreira et al. (2010). A exceção está nos Neossolos Quartzarênicos hidromórficos e alguns Cambissolos Flúvicos, onde a intemperização é mais lenta e o processo de deposição

de sedimentos é mais ativo, pois se situam em terraços e planícies fluviais dos rios São Lourenço e Cuiabá e nos diques marginais. Esse comportamento geoquímico observado na maioria dos perfis analisados

Quadro 1. Composição mineralógica qualitativa estimada da fração argila dos horizontes subsuperficiais dos solos da RPPN e do grau de predominância

Solo	Perfil	Predominância do mineral			
		Caulinita	Ilita	VHE	Esmectita
Plintossolo Pétrico	P26	+++++	+++	-	+++
Planossolo Háplico	P19	+++++	++++	-	-
Cambissolo Flúvico	P06	+++++	+++	-	++
Plintossolo Argilúvico	P14	++++	+++	++++	-
Luvissolo Crômico	P16	++++	+++	-	+++
Gleissolo Háplico	P33	++++	++	+++	-
Neossolo Flúvico	P42	+++	++++	++	+
Planossolo Háplico	P04	+++	++++	+	-
Plintossolo Argilúvico	P31	+++	+	-	-
Cambissolo Flúvico	P37	++	++++	-	++
Planossolo Háplico	P13	++	+	-	+
Planossolo Háplico	P43	++	++	++	-
Gleissolo Háplico	P38	+	++	-	-
Cambissolo Flúvico	P05	+	+	-	-

VHE (vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas); grau de predominância: muito alto (+++++); alto (++++); moderado (+++); baixo (++); muito baixo (+); não detectado (-).

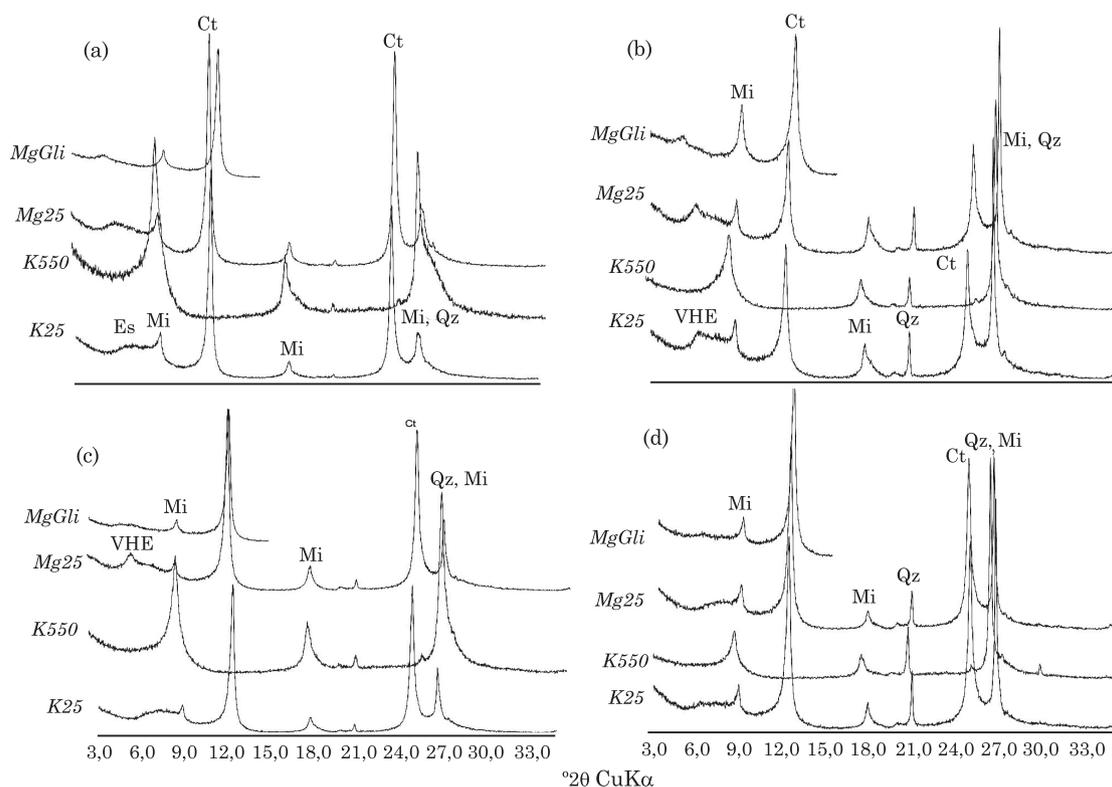


Figura 2. Difratomogramas da fração argila do horizonte Bt: (a) perfil P06 (Cambissolo); (b) perfil P19 (Planossolo); (c) perfil 31 (Plintossolo); (d) perfil 33 (Gleissolo). Lâminas saturadas por K⁺ e Mg²⁺ a 25 °C (K25; Mg25), glicoladas (MgGli) e calcinadas a 550 °C (K550). Mi: mica; Qz: quartzo; Ct: caulinita; VHE: vermiculita com hidróxi-Al entre camadas; e Es: esmectita

da RPPN reflete, provavelmente, o processo pedogenético e o grau de evolução dos solos com horizonte B textural (Planossolos, Luvisolos, Plintossolos Argilúvicos), caracterizado por perda moderada de sílica, enriquecimento relativo moderado de Al e Fe e lixiviação de bases.

A contribuição de materiais de fontes externas parece ser o motivo mais provável da ocorrência de

SiO₂ (e outros elementos móveis) nos horizontes superficiais dos solos em estudo, proveniente das águas de percolação saturadas em SiO₂ e também pela presença de sedimentos e minerais silicosos como quartzo. Os teores de Fe₂O₃ e Al₂O₃ são maiores nos horizontes B da maioria dos solos, evidenciando uma distribuição geoquímica esperada para elementos pouco móveis.

Quadro 2. Concentração dos elementos maiores (óxidos totais) nos horizontes (Hor.) superficiais (A) e subsuperficiais (B ou C) dos solos da RPPN SESC Pantanal

Classe de solo/sigla	Perfil	Hor.	g kg ⁻¹									
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅	
Planossolo Háplico eutrófico arênico (SXE)	P04	A	868,4	95,6	11,4	13,1	nd ⁽¹⁾	7,3	nd	3,0	nd	
		B _{in}	638,3	235,4	82,3	19,6	12,3	7,6	nd	1,2	nd	
Cambissolo Flúvico eutrófico típico (CYbe)	P05	A ₁	815,6	115,5	20,9	20,2	7,0	6,4	6,2	2,6	3,9	
		Bi	824,9	114,3	17,9	22,9	5,9	7,0	nd	2,4	3,4	
Cambissolo Flúvico eutrófico típico (CYbe)	P06	A ₁	761,7	145,6	35,5	23,8	7,8	9,4	8,2	2,2	3,3	
		Bi ₂	733,4	179,6	40,0	24,5	10,0	7,6	nd	1,8	nd	
Planossolo Nátrico órtico arênico (SNo)	P09	A	868,1	85,8	12,2	14,4	4,0	9,8	0,6	2,6	nd	
		B _{tfg2}	742,0	176,4	39,6	20,8	10,4	7,4	nd	1,6	nd	
Planossolo Háplico alumínico gleissólico (SXA)	P13	A	902,3	71,0	7,0	11,6	nd	3,5	nd	2,7	nd	
		B _{tg}	659,5	246,7	56,8	13,9	10,0	9,6	nd	<1,d	nd	
Plintossolo Argilúvico alumínico gleissólico (FTal)	P14	A	807,2	139,8	20,9	14,5	6,0	6,9	nd	2,3	nd	
		B _{tfg}	733,2	198,1	35,7	15,0	9,7	6,2	nd	1,9	nd	
Luvisolo Crômico pálico típico (TCp)	P16	A	741,5	153,3	38,8	26,1	11,5	9,8	8,9	2,4	4,7	
		B _t	655,9	210,7	73,7	29,9	13,4	10,9	nd	1,7	3,0	
Planossolo Háplico eutrófico arênico (SXE)	P19	A	852,2	101,3	15,8	20,5	nd	5,7	0,7	2,1	nd	
		B _{tg1}	682,0	216,0	53,6	24,2	12,3	9,0	nd	1,5	nd	
Neossolo Quartzarênico hidromórfico neofluvisólico (RQg)	P21	A	743,7	172,6	35,1	24,3	9,1	8,0	nd	2,6	3,3	
		C	934,3	39,5	12,3	7,1	nd	1,9	nd	3,2	nd	
Plintossolo Pétrico litoplântico êndico (FFlf)	P26	A	678,4	227,2	49,1	15,8	7,7	10,9	nd	2,4	6,6	
		B _{tg2}	700,5	211,8	39,6	22,6	12,3	10,6	nd	1,7	nd	
Plintossolo Argilúvico eutrófico gleissólico (FTE)	P27	A	734,9	178,5	25,1	22,5	8,5	12,0	6,3	3,9	4,6	
		2B _f	586,0	240,3	123,3	23,8	11,6	12,3	nd	1,4	nd	
Luvisolo Háplico pálico típico (TXp)	P28	A	753,7	150,3	32,7	24,1	8,2	8,6	12,6	2,5	4,8	
		B ₁₂	653,7	237,3	47,8	27,3	14,3	9,8	nd	1,3	nd	
Neossolo Quartzarênico hidromórfico plântico (TXp)	P30	A	854,2	105,2	9,4	17,2	nd	7,4	nd	2,9	2,4	
		C ₂	917,2	43,1	6,7	10,0	nd	1,7	nd	5,4	nd	
Plintossolo Argilúvico distrófico espessarênico (FTd)	P31	A	920,5	58,8	6,0	5,7	nd	5,2	nd	3,1	nd	
		B _{tfg2}	675,2	246,4	38,8	17,9	10,1	8,7	nd	1,4	nd	
Gleissolo Háplico alumínico típico (GXal)	P33	A ₁	637,7	235,1	77,5	21,6	12,3	9,4	3,4	0,9	nd	
		B _{g2}	601,1	246,4	110,3	13,5	10,3	9,3	2,9	0,8	nd	
Cambissolo Flúvico eutrófico gleissólico (CYve)	P34	A	632,0	248,9	50,0	36,4	16,9	10,4	nd	1,5	nd	
		Bi _g	651,7	222,2	59,5	34,5	15,6	10,8	nd	1,4	nd	
Cambissolo Flúvico eutrófico gleissólico (CYve)	P37	A	612,1	238,5	61,0	38,1	15,6	13,4	11,3	5,4	2,9	
		Bi _g	669,0	219,2	51,4	31,6	13,9	11,7	nd	1,6	nd	
Gleissolo Háplico alumínico neofluvisólico (GXal)	P38	A	656,3	225,2	52,8	27,9	13,0	11,3	6,5	2,7	2,6	
		B _{g2}	730,8	198,1	25,9	20,2	10,0	12,3	nd	1,6	nd	
Neossolo Flúvico eutrófico gleissólico (RYve)	P42	A	670,2	225,6	53,9	25,6	10,8	14,5	nd	1,4	nd	
		C	667,9	211,2	71,4	24,6	8,1	13,5	nd	2,0	nd	
Planossolo Háplico distrófico plântico (SXd)	P43	A	645,6	231,2	65,7	25,6	14,4	9,6	4,3	1,3	nd	
		B _{in}	681,1	237,9	36,5	19,5	12,3	10,4	nd	1,4	nd	

⁽¹⁾ nd: não detectável (abaixo do limite de detecção do método).

Os Gleissolos e Luvisolos possuem maiores teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , cuja magnitude aumenta com a profundidade do perfil. Com relação ao Fe, sua distribuição nos solos pode estar relacionada à presença de formas mais cristalinas de óxidos de Fe e nódulos de Fe e Mn nos horizontes de subsuperfície e à perda de Fe associada a períodos de redução (comum em ambientes mal-drenados como o Pantanal matogrossense) nos horizontes superficiais, onde o Fe na forma reduzida torna-se bastante solúvel e passível de ser lixiviado.

Os teores de K_2O são maiores que CaO e MgO em todos os solos e aumentam com a profundidade, com maiores valores nos Luvisolos e Cambissolos Flúvicos, de acordo com a mineralogia da fração argila com presença de mica. Os teores de MgO são superiores ao de CaO, como observado por Furquim et al. (2010) em solos do Pantanal de Nhecolândia, MS, possivelmente também relacionados à presença de mica.

Portanto, a distribuição geoquímica dos elementos evidencia que o primeiro grupo de constituintes móveis refere-se ao Mg e Ca, que são rapidamente mobilizados, fixando-se nos horizontes superficiais em razão principalmente da ciclagem vegetal. Segue-se o K, que também é mobilizado e transportado com menor intensidade por causa da sua fixação na estrutura das ilitas que compõem a mineralogia da fração argila dos solos. O Si é mais lentamente transportado e enriquecido nos horizontes superficiais pelo aporte de material sedimentar rico em quartzo. Em seguida, o Al e Fe são os elementos menos móveis, visto que o Al^{3+} imobiliza-se sob pH 4,5 a 9,5 e o Fe^{3+} em condições oxidantes, além de estar segregado nos nódulos e mosqueados na maioria dos perfis.

Geoquímica dos elementos-traço

Dos elementos-traço analisados, alguns foram encontrados em todos os solos da RPPN (Mn, Zr e Rb), enquanto outros foram detectados somente em alguns solos (Sr, Y, Cr, V, Ni, Zn) (Quadro 3); elementos raros ocorrem isolados em alguns horizontes de poucos perfis (Sm, Cs, W, Ag, Co, Cu, Sn, Eu) (dados não apresentados). Concentrações abaixo do limite de detecção do método podem estar relacionadas à menor ocorrência desses elementos na natureza aliada às condições ácidas e moderadamente ácidas da maioria dos solos da RPPN. Nessas condições, a mobilidade desses elementos e as perdas por lixiviação podem ser determinantes para os baixos teores no solo, conforme ressaltado por Paye et al. (2010).

Os teores dos elementos-traço encontrados nos solos em estudo são geralmente explicados pelos processos de intemperismo de minerais primários que são herdados da rocha ou transportados de outros locais (Chandrajith et al., 2005). Além da natureza do material de origem, outros fatores como o teor e a composição da fração argila, o teor de matéria orgânica e as condições físico-químicas dos solos podem

influenciar a concentração de elementos-traço (Fadigas et al., 2002).

As diferenças encontradas entre os solos estudados podem ser atribuídas, principalmente, ao material de origem e a fatores pedogenéticos, onde alguns elementos são enriquecidos e outros são esgotados ao longo da pedogênese. Além disso, particularmente em solos de áreas úmidas, o enriquecimento dos elementos se dá principalmente pelo processo de sedimentação em razão dos pulsos de inundação a que estão sujeitos, onde materiais heterogêneos são acumulados.

Em prospecções geoquímicas, valores altos de assimetria, curtose e desvio-padrão dos dados indicam a ocorrência de anomalias geoquímicas, e o coeficiente de variação denota o grau de variação dos dados geoquímicos (Licht, 1998). De acordo com esses critérios, a maior variação foi observada para Ca, Mn e P (Quadro 4), indicando que esses elementos se mobilizaram com maior intensidade entre os solos da RPPN, em razão das condições ambientais e das características intrínsecas dos solos. Os elementos considerados residuais (Al, Fe, Ti) e ligados à estrutura cristalina dos filossilicatos (K, Mg) demonstram menor variação. Somente a sílica apresenta menor variação em sua concentração entre os perfis, provavelmente por causa do enriquecimento em quartzo a que os solos estão submetidos, em maior ou menor grau, dependendo da sua localização.

Análise de componentes principais (ACP)

Considerando-se as concentrações médias dos elementos nos perfis dos solos da RPPN, os elementos que melhor definiram as características geoquímicas dos perfis foram: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MgO, TiO_2 , SO_3 (no primeiro componente) e ZrO_2 e P_2O_5 (no segundo componente), todos apresentando carga fatorial superior a 0,7 (Figura 3). Juntos, esses elementos explicaram 75,5 % da variação total dos dados, sendo 58,05 % para o primeiro componente e 17,45 %, para o segundo. Analisando o Componente 1, os elementos Si, Al, Fe, K, Mg, Ti e S explicaram aproximadamente 58 % da variação dos dados; Al, Fe, K, Mg e Ti correlacionaram-se negativamente, ao contrário do Si e S. No Componente 2, foram observadas correlações positivas somente entre o Zr e P.

Com base na ACP (Figura 3), foram definidos três grupos de solos, que integrados à análise granulométrica e mineralógica refletiram tipos geoquímicos diferenciados:

Grupo I - SNo, SXe, RQg, SXe, SXa, FTa, FTd (P09, P19, P21, P04, P13, P14 e P31, respectivamente): formados pela maioria dos Planossolo, Plintossolo e Neossolo Quartzarênico; textura predominante franco-arenosa a arenosa nos horizontes superficiais, menores teores de Fe, Mn e Al; relativamente pobres em bases e elementos-traço; e geoquimicamente semelhantes em relação ao Si e S. Possuem teores relativamente mais altos de SiO_2 , em razão da predominância de quartzo e caulinita na fração argila;

Grupo II - CYve, CYbe, TCp, TXp e RYve (P37, P06, P16, P28 e P42, respectivamente): formados por Cambissolo Flúvico, Luvisso e Neossolo Flúvico; são solos eutróficos, ricos em bases e elementos-traço, P_2O_5 , MnO_2 e minerais resistentes ao intemperismo (Zr); textura argilosa a franco-siltosa, ricos em matéria orgânica, com geoquímica semelhante com relação ao K, Mn, Mg, Ca, Zr e P; e mineralogia

composta de mica (ilita) e caulinita, com traços de esmectitas; e

Grupo III - CYve, GXal, SXd, FFlf e FTe (P34, P38, P43, P26 e P27, respectivamente): formados por Plintossolo Pétrico e Argilúvico eutrófico, Gleissolo, Planossolo distrófico e Cambissolo Flúvico; são solos com textura mais argilosa que dos outros da mesma classe; e geoquimicamente semelhantes quanto aos

Quadro 3. Teores totais de elementos-traço (óxidos) nos horizontes superficiais e subsuperficiais dos solos da RPPN SESC Pantanal

Classe de solo/sigla	Perfil	Hor.	MnO_2	ZrO_2	V_2O_5	SrO	NiO	Rb ₂ O	ZnO	Y_2O_3	Cr_2O_3
Planossolo Háptico eutrófico arênico (SXE)	P04	A	400	600	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		B _{tn}	400	400	n	nd	dn	130	nd	nd	570
Cambissolo Flúvico eutrófico típico (CYbe)	P05	A ₁	630	80	nd	80	nd	70	110	nd	nd
		Bi	150	100	nd	70	170	80	nd	nd	530
Cambissolo Flúvico eutrófico típico (CYbe)	P06	A ₁	1.200	880	nd	125	nd	110	160	65	nd
		Bi ₂	180	900	nd	90	nd	100	110	50	460
Planossolo Nátrico órtico arênico (SNo)	P09	A	970	1.000	nd	nd	nd	nd	nd	nd	300
		B _{tg2}	960	450	nd	nd	nd	130	130	nd	nd
Planossolo Háptico alumínico gleissólico (SXA)	P13	A	300	500	nd	nd	100	nd	nd	nd	nd
		B _{tg}	150	550	nd	nd	nd	90	nd	nd	560
Plintossolo Argilúvico alumínico gleissólico (FTal)	P14	A	400	550	230	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		B _{tfg}	nd ⁽¹⁾	430	nd	80	nd	90	nd	nd	nd
Luvisso Crômico pálico típico (TCp)	P16	A	1.500	800	nd	130	nd	100	150	nd	260
		B _t	600	250	nd	130	nd	120	nd	70	650
Planossolo Háptico eutrófico arênico (SXE)	P19	A	800	1.000	nd	0	nd	70	nd	nd	nd
		B _{tg1}	200	850	550	180	nd	100	nd	nd	nd
Neossolo Quartzarênico hidromórfico neofluvisso (RQg)	P21	A	500	600	nd	nd	130	80	90	110	nd
		C	50	500	120	70	nd	80	nd	nd	690
Plintossolo Pétrico litoplântico êndico (FFlf)	P26	A	610	600	nd	nd	nd	110	120	50	nd
		B _{tg2}	50	300	350	100	nd	100	nd	70	nd
Plintossolo Argilúvico eutrófico gleissólico (FTe)	P27	A	800	500	480	130	nd	130	160	nd	nd
		2B _t	40	320	310	120	nd	120	110	70	390
Luvisso Háptico pálico típico (TXp)	P28	A	1.700	500	250	110	nd	80	150	nd	nd
		B _{t2}	230	330	310	130	nd	140	nd	70	320
Neossolo Quartzarênico hidromórfico plântico (TXp)	P30	A	550	nd	nd	nd	nd	50	nd	nd	nd
		C ₂	190	120	nd	nd	nd	nd	nd	nd	810
Plintossolo Argilúvico distrófico espessarênico (FTd)	P31	A	nd	389	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		B _{tfg2}	430	330	370	nd	nd	80	nd	nd	480
Gleissolo Háptico alumínico típico (GXal)	P33	A ₁	800	nd	670	nd	nd	190	nd	90	nd
		B _{g2}	250	230	550	120	nd	200	nd	80	390
Cambissolo Flúvico eutrófico gleissólico (CYve)	P34	A	480	400	nd	70	nd	270	160	nd	nd
		Bi _g	700	550	nd	70	nd	120	130	70	380
Cambissolo Flúvico eutrófico gleissólico (CYve)	P37	A	400	nd	160	70	nd	110	nd	nd	nd
		Bi _g	850	840	nd	nd	nd	nd	120	70	480
Gleissolo Háptico alumínico neofluvisso (GXal)	P38	A	650	nd	340	100	530	230	nd	60	nd
		B _{gf2}	90	530	420	90	nd	160	nd	70	nd
Neossolo Flúvico eutrófico gleissólico (RYve)	P42	A	1.910	700	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		C	1.850	700	nd	150	nd	150	130	60	nd
Planossolo Háptico distrófico plântico (SXd)	P43	A	700	nd	nd	nd	nd	200	170	70	nd
		B _{tn}	nd	400	nd	nd	nd	90	110	50	390

⁽¹⁾ nd: não detectável (abaixo do limite de detecção do método)

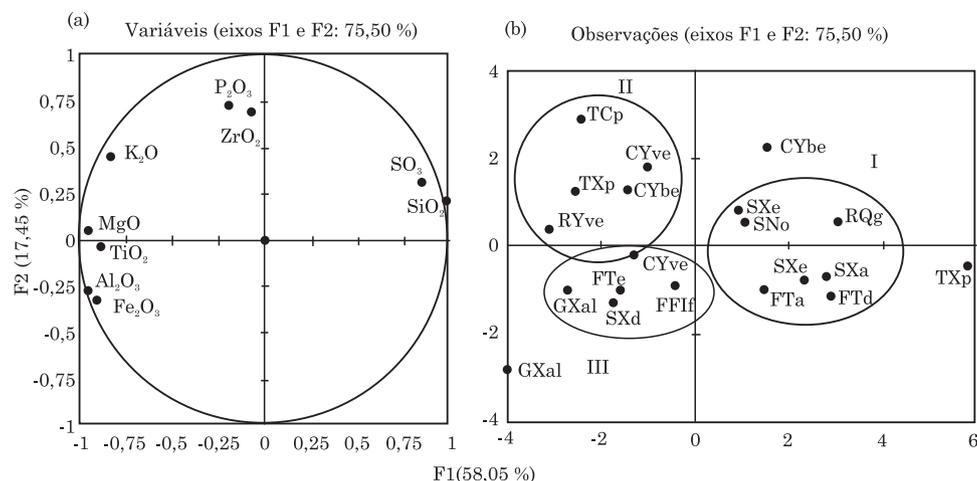


Figura 3. Análise de Componentes Principais (ACP) dos teores médios de elementos (óxidos) dos solos da RPPN SESC Pantanal, por perfil (n = 20). (a) variáveis componentes; e (b) grupos de perfis.

Quadro 4. Parâmetros estatísticos descritivos dos teores dos elementos maiores e menores nos horizontes dos solos da RPPN SESC Pantanal

Estatística	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2	CaO	MnO	SO_3	ZrO_2	P_2O_5
Nº de observações	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Mínimo (%)	0,16	54,02	2,84	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo (%)	12,33	95,72	30,87	3,81	1,69	1,45	1,26	0,21	0,54	0,19	0,66
1º Quartil	2,05	67,02	10,82	1,50	0,47	0,62	0,00	0,00	0,15	0,04	0,00
Mediana	3,75	74,20	17,09	2,05	0,90	0,85	0,00	0,03	0,20	0,06	0,00
3º Quartil	5,47	83,54	21,92	2,46	1,16	1,06	0,00	0,06	0,25	0,07	0,00
Média (%)	4,11	75,41	16,19	2,00	0,79	0,80	0,10	0,04	0,21	0,05	0,08
Variância (n-1)	7,60	109,11	47,41	0,50	0,25	0,12	0,06	0,00	0,01	0,00	0,02
Coefficiente de variação (%)	0,67	0,14	0,43	0,36	0,63	0,42	2,50	1,25	0,43	0,60	1,87
Desvio-padrão (n-1)	2,76	10,45	6,89	0,71	0,50	0,34	0,25	0,05	0,09	0,03	0,15
Assimetria (Pearson)	0,84	0,13	-0,17	-0,16	-0,45	-0,61	2,78	1,39	0,75	0,21	1,75
Curtose (Pearson)	0,23	-0,94	-0,93	-0,25	-1,01	-0,07	7,38	1,57	2,43	1,09	2,07

teores de Fe, Al e Ti (óxidos), considerados elementos residuais nos solos e altamente resistentes ao intemperismo e que fazem parte da estrutura dos óxidos minerais de Fe e Al.

Alguns perfis permaneceram isolados dos grupos (*outliers*), como: CYbe (P05), TXp (P30) e GXal (P33), apresentando características geoquímicas particulares, ditadas pelo regime de sedimentação/lixiviação aliado aos processos pedogenéticos atuantes nesses solos.

CONCLUSÕES

1. A análise multivariada dos resultados geoquímicos elementares permitiu prever dois tipos geoquímicos de perfis de solos da RPPN, em que o primeiro é composto por solos de textura arenosa a

franco-arenosa, com teores relativamente elevados de SiO_2 e predominância de caulinita e quartzo, bem como menor teor de bases e elementos-traço; e o segundo, de solos de textura mais argilosa, geoquimicamente heterogêneos e caracterizados pela presença significativa de minerais 2:1 na fração argila, Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MnO_2 , bases e elementos-traço.

2. Os processos pedológicos desempenham importante papel na determinação da composição química dos solos da RPPN, e não somente os processos deposicionais, embora esses solos estejam sujeitos à inundação sazonal.

LITERATURA CITADA

AB'SABER, A.N. O Pantanal Mato-grossense e a teoria dos refúgios. R. Bras. Geogr., 1:9-57, 1988.

- BEIRIGO, R.M.; VIDAL TORRADO, P.; STAPE, J.L. & ANDRADE, G.R.P. Solos da Reserva Particular do Patrimônio Natural SESC Pantanal. Rio de Janeiro, SESC, Departamento Nacional, 2010. 76p.
- BINI, C.; SARTORI, G.; WAHSHA, M. & FONTANA, S. Background levels of trace elements and soil geochemistry at regional level in NE Italy. *J. Geochem. Explor.*, 109:125-133, 2011.
- CHANDRAJITH, R.; DISSANAYAKE, C.B. & TOBSCHALL, H.J. The abundances of rarer trace elements in paddy (rice) soils of Sri Lanka. *Chemosphere*, 58:1415-1420, 2005.
- CHADWICK, O.A.; BRIMHALL, G.H. & HENDRICKS, D.M. From a black to a gray box - a mass balance interpretation of pedogenesis. *Geomorphology*, 3:369-390, 1990.
- CORDEIRO, L.P. Estrutura e heterogeneidade da paisagem em uma unidade de conservação no nordeste do Pantanal (RPPN Sesc Pantanal), Mato Grosso, Brasil: Efeitos sobre a distribuição e densidade de antas (*Tapirus terrestris*) e de cervos-do-pantanal (*Blastoserus dichotomus*). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 202p. (Tese de Doutorado)
- CUNHA, C.N.; RAIWEL, P.; WANTZEN, K.W.; JUNK, W.J. & LEMES DO PRADO, A. Mapping and characterization of vegetation units by means of Landsat imagery and management recommendations for the Pantanal of Mato Grosso (Brazil), north of Poconé. *Amazoniana*, 19:1-32, 2006.
- DIXON, J.B. Kaolin and serpentine group minerals. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.467-525.
- FADIGAS, F.S.; AMARAL-SOBRINHO, N.M.B.; MAZUR, N.; ANJOS, L.H.C. & FREIXO, A.A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. *Bragantia*, 61:151-159, 2002.
- FERREIRA, C.A.; SILVA, A.C.; VIDAL TORRADO, P. & ROCHA, W.W. Genesis and classification of Oxisols in a highland toposequence of the upper Jequitinhonha Valley (MG). *R. Bras. Ci. Solo*, 34:195-209, 2010.
- FURQUIM, S. A.C.; BARBIÉRO, L.; GRAHAM, R.C.; QUEIROZ NETO, J.P.; FERREIRA, R.P.D. & FURIAN, S. Neof ormation of micas in soils surrounding an alkaline-saline lake of Pantanal wetland, Brazil. *Geoderma*, 158:331-342, 2010.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. & BLACK, W.C. *Análise multivariada de dados*. 5.ed. Porto Alegre, Bookman, 2005. 593p.
- HASENACK, H.; CORDEIRO, J.L.P. & HOFMANN, G.S. O clima na RPPN SESC Pantanal: Relatório técnico. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Biociências, Centro de Ecologia, 2003. 31p.
- JACKSON, M.L. *Soil chemical analysis: Advanced course*. Madison, Prentice-Hall, 1979. 895p.
- LACERDA, M.P.C.; ANDRADE, H. & QUÉMÉNEUR, J.J.G. Correlação entre material de origem e perfis de alteração em solos com B textural na região de Lavras, MG. *Ci. Agrotec.*, 24:585-596, 2000.
- LEE, S. Geochemistry and partitioning of trace metals in paddy soils affected by metal mine tailings in Korea. *Geoderma*, 135:26-37, 2006.
- LICHT, O.A.B. *Prospecção geoquímica: Princípios, técnicas e métodos*. Rio de Janeiro, CPRM, 1998.
- LIMA, H.N.; MELLO, J.W.V.D.; SCHAEFER, C.E.G.R. & KER, J.C. Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos à inundação. *Acta Amaz.*, 35:317-330, 2005.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAY MINERALS, 7., Washington, DC, 1958. *Proceedings...* New York, Pergamon Press, 1960. p.317-327.
- MOORE, D. & REYNOLDS, R.C. *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford, Oxford University Press, 1989. 332p.
- PAYE, H.S.; MELLO, J.W.C.V.; ABRAHÃO, W.A.P.; FERNANDES FILHO, E.I.; DIAS, L.C.P.; CASTRO, M.L.O.; MELO, S.B. & FRANÇA, M.M. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:2041-2051, 2010.
- PINTO, S.D.S.; BITTENCOURT ROSA, D.; GARCIA NETTO, L.R. & GROEFF, M.L.F. A propósito de novos dados acerca da área de predominância do Pantanal Matogrossense no estado de Mato Grosso. In: ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS BRASILEIROS, João Pessoa, 2002. *Anais...* João Pessoa, UFPB, Associação dos Geógrafos Brasileiros, 2002. v.2. p.4-9.
- PRAKONGKEP, N.; SUDDHIPRAKARN, A.; KHEORUENROMNE, I.; SMIRK, M. & GILKES, R.J. The geochemistry of Thai paddy soils. *Geoderma*, 144:310-324, 2008.
- RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C. & REZENDE, S.B. *Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicações*. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2005. 192p.
- SETTI, M.; MARINONI, L. & LOPEZ-GALINDO, A. Mineralogical and geochemical characteristics (major, minor, trace elements and REE) of detrital and authigenic clay minerals in a Cenozoic sequence from Ross Sea, Antarctica. *Clay Miner.*, 39:405-421, 2004.
- SILVA, J.S.V. & ABDON, M.M. Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas sub-regiões. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:1703-1711, 1998.
- WEDEPOHL, K.H. *Handbook of geochemistry elements*. Berlin, Springer, 1978.