

Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão

Chemical attributes of constructed soils after surface coal mining related to sulphurization process

Alberto Vasconcellos Inda^{I*} Oscar Rafael Gadea Quinões^{II} Elvio Giasson^I
Carlos Alberto Bissani^I Deborah Pinheiro Dick^{III} Paulo César do Nascimento^I

RESUMO

A mineração de carvão a céu aberto envolve a remoção superficial do solo e de camadas geológicas, os quais devem ser repostos visando à reabilitação das áreas mineradas. Essa obra expõe o carvão às condições oxidativas do ar e altera as características originais do solo e da paisagem. Como consequência, o processo de sulfurização pode ser ativado nos solos construídos em razão da oxidação da pirita, condicionando alterações químicas e mineralógicas. Nesse contexto, o estudo objetivou avaliar a evolução temporal de solos construídos há 24 (SA-24) e dois (SA-2) anos, em duas áreas mineradas e reconstruídas no Município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS), tendo como base atributos químicos relacionados com o processo de sulfurização. Para tanto, foram determinados o pH, a condutividade elétrica (CE), os teores de bases (SB) e de alumínio (Al^{3+}) trocáveis, a acidez potencial ($H+Al$), os teores totais de Al, Fe e Si e o teor de sulfato solúvel ($S-SO_4^{2-}$) e calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC), a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m). Os resultados indicaram a atuação do processo de sulfurização nos solos construídos de ambas as áreas reabilitadas. A CE e os teores de $S-SO_4^{2-}$ foram maiores na SA-2, indicando um estágio de sulfurização mais ativo nos solos dessa área. Na SA-24, a menor CE e os menores teores de $S-SO_4^{2-}$, de SB e V, bem como a maior saturação por Al e teores de $H+Al$, sugerem a proximidade do estágio de pós-sulfurização. Elementos como Al e P concentraram-se relativamente nos solos construídos mais antigos. Os solos em ambas as áreas apresentam limitações químicas para o desenvolvimento de vegetação, influenciando negativamente para a recuperação das áreas.

Palavras-chave: sulfurização, acidificação, pirita, áreas degradadas.

ABSTRACT

Coal stripmining involves the removal of upper soil and geological layers, which must be relocated in a similar way that in the original profile when reconstructing the landscape. As this process changes soil and landscape characteristics, pyrite may oxidize and change soil chemical and mineralogical characteristics. In this context, the study aimed to evaluate the temporal evolution of soils reconstructed 2 (SA-2) and 24 (SA-24) year ago, in Boa Vista Coal Mining, in Minas do Leão, Rio Grande do Sul, Brazil. Soil characteristics measured were pH, electrical conductivity (EC), bases and aluminium content, potential acidity ($H+Al$), and contents of Al, Fe, Si, and soluble sulphate. Calculations accounted for cation exchange capacity, base saturation and aluminium saturation. Results indicated occurrence of oxidation processes in both reconstructed areas. Electrical conductivity and soluble phosphate contents were higher in SA-2, indicating a more active sulphurization stage in these soils. In soils of area SA-24, lower EC and smaller contents of soluble sulphate, lower base saturation, as well as higher aluminium saturation and $H+Al$ suggest a more advanced sulphurization process compared to SA-2. Aluminum and P concentrated in older soil profiles. Soils in both areas have chemical limitations for plant growth with adversely affects to recuperation of the area.

Key words: sulphurization, acidification, pyrite, degraded lands.

INTRODUÇÃO

No processo de mineração de carvão a céu aberto em faixas (stripmining) (KOPPE & COSTA, 2002),

^IDepartamento de Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 90001-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: alberto.inda@ufrgs.br. *Autor para correspondência.

^{II}Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

^{III}Departamento de Físico-química, Instituto de Química, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

o carvão é extraído após a remoção e estocagem em separado do solo (horizontes pedogenéticos A, B e C), do saprolito e dos estéreis, compostos pelas camadas geológicas sobrejacentes ou intercaladas à camada de carvão (siltitos, argilitos e folhelhos carbonosos) (PINTO, 1997; KÄMPF et al., 2000). A recuperação de áreas mineradas envolve a reposição dos materiais estéreis e do saprolito na cava minerada e a cobertura destes com o solo retirado no início do processo, visando à reconstituição topográfica (GAIVIZZO et al., 2002). Essas camadas passam a ser denominadas de “solos construídos”, pois ocorrem mudanças nas características originais do solo e sobre os quais passam a atuar processos pedogenéticos (KÄMPF et al., 1997; CAMPOS et al., 2003). Quando o processo de reabilitação de áreas mineradas é inadequado, um processo pedogenético previsível nos solos construídos e nas demais áreas afetadas pela mineração de carvão é a sulfurização. Nesses locais, sulfetos (principalmente a pirita - FeS_2) presentes nos materiais estéreis e resíduos de carvão, quando expostos ao oxigênio e à água, oxidam-se, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) (FANNING & FANNING, 1989).

Nos solos construídos, a perda de estrutura decorrente de deficiências nos processos de lavra e recuperação das áreas mineradas implica aumento da densidade do solo e diminuição da taxa de infiltração de água, modificações que ocasionam aumento do escoamento superficial e do transporte de solo pela erosão (CIOLKOSZ et al., 1985; POTTER et al., 1988; KÄMPF et al., 2000; SHUKLA et al., 2004; QUIÑONES et al., 2008). Como consequência da erosão em solos construídos, materiais de camadas subsuperficiais contendo pirita são expostos a condições ambientais favoráveis a sua oxidação, ativando assim o processo de sulfurização. A intensa acidificação produzida, caracterizada por valores de pH inferiores a 3,5, determina a dissolução de minerais aluminossilicatados, bem como a formação de novas fases minerais a partir dos produtos dessa dissolução (KÄMPF et al., 1997). A evolução desse processo em solos construídos também é representada por decréscimos dos teores de cátions básicos e aumentos de alumínio trocável, sulfato solúvel e da condutividade elétrica, comparativamente às condições do solo natural anteriormente à mineração (KÄMPF et al., 1997; CAMPOS et al., 2003), e tais alterações são dependentes e indicativas do estágio de sulfurização alcançado pelo solo (KÄMPF et al., 1997).

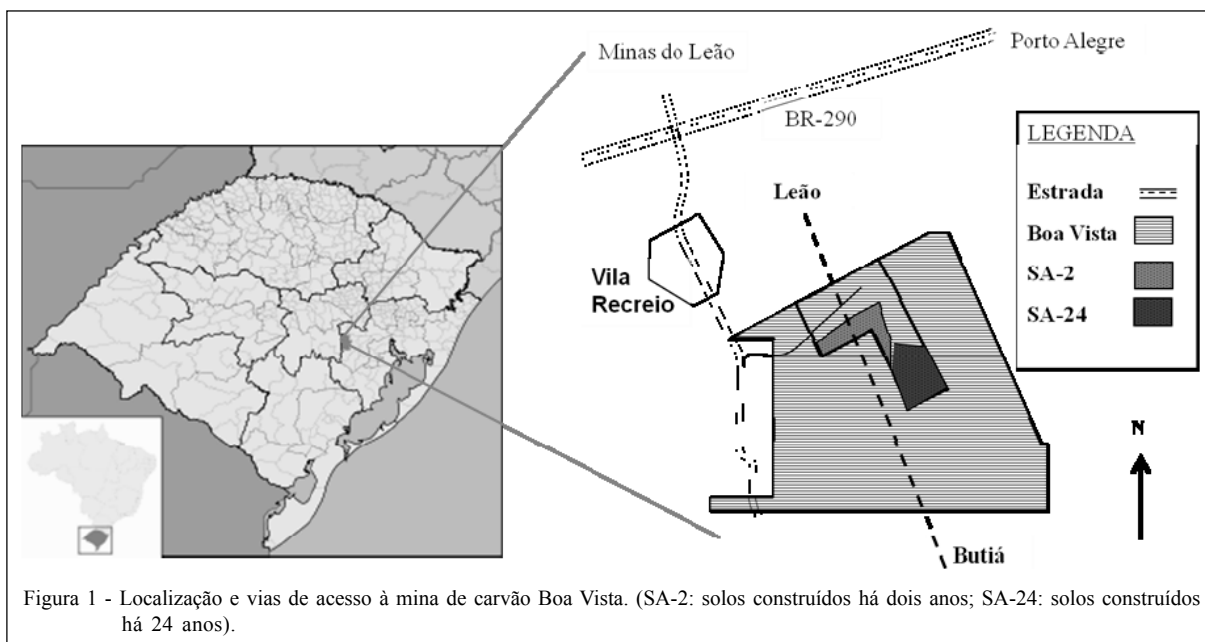
A legislação ambiental requer o estabelecimento de um plano de execução de recuperação ambiental das áreas mineradas, em que os solos construídos devem proporcionar condições para

o desenvolvimento de vegetação (PINTO, 1997). O presente estudo objetivou avaliar a evolução temporal de solos construídos há 24 e dois anos no Município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul (RS), tendo como base atributos químicos desses solos relacionados ao processo pedogenético de sulfurização.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na mina de carvão Boa Vista, da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), situada em região próxima à margem do Km 85 da BR-290, no Município de Minas do Leão (RS) (Figura 1). As camadas de carvão fazem parte da formação Rio Bonito, do grupo Guatá, do supergrupo Tubarão e do Permiano Superior (BRASIL, 1986). No processo de construção dos solos na mina Boa Vista, os materiais geológicos foram repostos em camadas, por tratores de esteira, para preenchimento das cavas mineradas. Como cobertura final, foi usado material do solo natural (mistura de horizontes A, B e C), que fora removido e separado no início do processo de mineração. Após a realização da recomposição topográfica, foi implantada a cobertura vegetal, com utilização de várias espécies de gramíneas como a *Bracchiaria humidicola*, *Bracchiaria brizanta*, *Bracchiaria dactomeura*, *Panicum maximum*, entre outras. Uma vez estabelecida a vegetação de cobertura, foram implantadas as espécies vegetais de reflorestamento *Eucaliptus* ssp. e *Pinus* ssp.

Foram selecionados perfis em duas áreas da mina reabilitadas em 1978 e 2000. Essas áreas representavam, na época de amostragem, solos construídos com idades de 24 (SA-24) e dois (SA-2) anos de construção. Na área SA-24, revegetada com *Eucaliptus* ssp., *Pinus* ssp. e gramíneas, foram selecionados quatro perfis de solos construídos, identificados como: P1-24, em uma trincheira aberta num reflorestamento de eucaliptos; P2-24, em uma trincheira aberta em área de capoeira com evidência de alta erosão; P3-24 e P4-24, em trincheiras abertas em reflorestamento de pinus. Na área SA-2, revegetada com gramíneas e com *Eucaliptus* ssp., ambas com desenvolvimento heterogêneo e incipiente, foram selecionados três perfis de solos construídos ao longo de uma sequência em declive, identificados como: P1-2, na porção inferior; P2-2, na porção média; e P3-2, na porção superior. A separação das camadas ou horizontes nos perfis selecionados e a coleta de amostras em todas as camadas ou horizontes foram realizadas conforme LEMOS & SANTOS (1996). A caracterização morfológica e física desses perfis de solos construídos, além de atributos químicos relacionados à composição dos materiais utilizados na construção desses solos



(CTC, C orgânico, etc...), é descrita por QUIÑONES et al. (2008).

A determinação do pH e da condutividade elétrica foi realizada no mesmo dia da coleta das amostras. As demais análises foram realizadas em amostras secas ao ar, moídas e passadas em peneiras de 2mm. As análises químicas consistiram em: pH em H₂O, na proporção em peso 1:1 de solo em solução (EMBRAPA, 1997), condutividade elétrica (CE), na proporção 1:5 de solo em solução (TEDESCO et al., 1995); teores de bases trocáveis e acidez potencial (EMBRAPA, 1997); alumínio trocável utilizando metodologia indicada para solos com alto teor de carbono orgânico (McLEAN, 1965); teores de Si, Fe, Al e P mediante ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997); teor de sulfato solúvel em CaCl₂ 0,1mol L⁻¹ (BISSANI et al., 1995). Foram calculados os valores de soma de bases, saturação por bases e saturação por alumínio. Para análise dos resultados, foram utilizados parâmetros de estatística descritiva, empregando o programa Microsoft Excel. Para avaliar se existem diferenças significativas entre os atributos analisados nas amostras dos perfis representativos das áreas SA-2 e SA-24, foi aplicado o teste não paramétrico ou de distribuição livre U de Mann-Whitney, segundo KÄMPF et al. (1997), sendo utilizado o programa STATISTIX7 (2000). Esse teste não utiliza valores médios em seu cálculo, mas verifica se as distribuições de probabilidade de uma variável podem ser consideradas iguais nas duas populações de amostras em estudo (SIEGEL, 1975).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos químicos avaliados nos perfis variaram irregularmente com a profundidade em ambas as áreas, indicando deficiências na seleção prévia e na reposição dos materiais nas cavas de mineração (Tabelas 1 e 2). O pH não diferiu significativamente entre os conjuntos de camadas das áreas SA-24 e os SA-2 (Tabela 3), apresentando valores médios de 4,6 e 4,8, respectivamente. Essa semelhança evidencia um processo já intenso de oxidação da pirita na área reabilitada há dois anos (SA-2), embora algumas de suas camadas apresentem valores de pH mais alcalino (C1 e C2 do P2-2; C2 e C3 do P3-2) (Tabela 1), os quais representam ainda características do material geológico empregado na construção. A rápida acidificação constatada na SA-2 é consequência da oxidação da pirita exposta à superfície por um processo erosivo acelerado, favorecido pela declividade acentuada e, praticamente, ausência de cobertura vegetal do solo (QUIÑONES et al., 2008).

A condutividade elétrica diferiu significativamente entre as áreas SA-24 e SA-2, com valores médios de 101,0μS cm⁻¹ e 240,6μS cm⁻¹, respectivamente. Segundo DANIELS (1996), valores CE > 100μS cm⁻¹ indicam restrição ao desenvolvimento de espécies sensíveis ao excesso de sais. Da mesma forma, os teores de sulfato solúvel (S-SO₄²⁻) diferiram significativamente entre as áreas, com valores médios de 0,17g kg⁻¹ para SA-24 e 0,38g kg⁻¹, para a SA-2 (Tabela 1). A expressiva correlação obtida neste estudo entre

Tabela 1 – Atributos químicos dos perfis de solos construídos com dois e 24 anos de construção.

horizonte/camada	prof. cm	pH-H ₂ O	CE ¹ μS cm ⁻¹	Ca	Mg	K	Na	SB ²	Al	H+Al	V ⁴ %	m ⁵	S-SO ₄ ²⁻ g kg ⁻¹
-----Perfil P1-2-----													
A 1	0-58	4,6	65	4,0	1,7	1,5	0,1	7,3	8,1	11,9	38	53	0,19
C 1	-75	4,5	77	8,6	1,4	0,7	0,2	10,9	13,1	16,4	40	55	0,17
C 1	-75	4,2	235	6,6	10,0	0,6	0,2	17,4	16,0	18,6	48	48	0,40
C 2	-87	3,9	273	7,2	1,5	0,7	0,2	9,5	7,7	12,3	44	45	0,40
C 2	-87	4,1	124	2,4	2,6	1,3	0,0	6,4	1,8	4,7	58	22	0,32
C 3	-100	4,0	166	8,3	11,4	0,7	0,1	20,5	8,0	12,8	62	28	0,32
-----Perfil P2-2-----													
A 1	0-16	4,2	184	5,3	2,8	0,4	0,1	8,6	7,2	13,8	38	46	0,04
C 1	-53	6,6	360	8,7	4,3	0,1	0,2	13,4	0,0	1,2	92	0	0,60
C 2	-65	7,0	373	2,3	6,8	0,1	0,4	9,6	0,0	0,5	96	0	0,61
C 3	-89	5,9	385	8,2	11,6	0,6	0,3	20,7	0,0	1,6	93	0	0,32
C 4	-104	4,6	357	12,3	2,8	0,5	0,5	16,1	1,5	4,9	77	9	0,60
C 5	-112	4,4	252	7,2	11,2	0,6	0,3	19,4	1,5	5,4	78	7	0,45
-----Perfil P3-2-----													
A 1	0-14	4,1	163	8,8	17,7	0,1	0,1	26,6	20,7	29,7	47	44	0,34
C 1	-34	4,3	167	6,8	1,6	0,2	0,2	8,9	11,6	17,6	34	57	0,32
C 2	-48	6,8	214	2,7	7,0	0,1	0,4	10,2	0,0	1,9	84	0	0,39
C 3	-61	7,0	342	8,2	3,0	0,1	0,2	11,6	1,7	5,0	70	13	0,58
C 4	-75	4,3	355	8,0	3,2	0,1	0,3	11,7	2,0	8,1	59	15	0,33
-----Perfil P1-24-----													
A 1	0-4	3,9	144	2,2	0,6	1,6	0,0	4,4	9,5	26,3	14	68	0,02
C 1	-15	4,0	126	1,2	0,3	1,0	0,0	2,5	7,7	14,9	14	75	0,31
C 2	-67	4,3	145	2,3	2,1	1,5	0,1	6,0	9,0	16,6	26	60	0,29
C 2	-67	4,4	94	2,6	1,5	1,0	0,0	5,2	6,3	13,0	29	55	0,26
C 3	-98	4,6	62	1,9	1,8	0,9	0,0	4,6	3,4	9,5	33	42	0,13
C 4	-115	4,3	121	3,2	1,0	0,7	0,3	5,2	4,9	9,5	35	49	0,27
-----Perfil P2-24-----													
A 1	0-26	4,9	76	4,6	2,1	2,7	0,0	9,5	1,3	7,2	57	12	0,11
C 1	-61	4,1	173	6,9	1,7	0,8	0,1	9,5	5,4	9,3	51	36	0,36
C 2	-69	3,7	329	4,9	6,5	2,8	0,1	14,3	3,3	6,8	68	19	0,51
C 3	-96	3,9	298	5,7	5,2	2,3	0,1	13,4	3,6	5,2	72	21	0,05
-----Perfil P3-24-----													
A 1	0-20	5,4	29	4,2	2,5	0,4	0,1	7,2	0,3	6,6	52,0	4,2	nd
C 1	-58	5,6	12	7,7	4,6	0,1	0,2	12,6	3,8	7,5	62,6	23,1	nd
C 2	-58	5,2	31	6,9	4,4	0,1	0,3	11,7	2,6	7,2	61,9	18,2	nd
C 3	-82	5,0	25	4,0	12,5	0,2	0,1	16,7	4,7	9,6	63,5	22,1	nd
C 4	-89	5,3	10	3,9	3,3	0,1	0,2	7,4	9,2	71,8	9,4	55,3	nd
C 5	-113	5,0	22	4,6	0,9	0,3	0,1	5,8	6,0	9,1	39,1	50,7	nd
C 6	-122	4,7	34	5,0	1,1	0,2	0,1	6,5	3,0	7,6	45,8	31,4	nd
-----Perfil P4-24-----													
A 1	0-4	3,9	124	0,5	0,5	0,3	0,0	1,3	10,9	34,2	4	89	0,25
A 2	-9	4,3	89	0,5	0,4	0,2	0,0	1,1	8,9	21,9	5	89	0,28
C 1	-27	4,6	67	0,8	0,5	0,1	0,0	1,5	6,0	16,4	8	80	0,21
C 2	-46	4,8	56	1,7	1,2	0,1	0,0	3,1	4,2	13,3	19	58	0,21
C 3	-74	4,5	81	4,7	9,5	0,5	0,1	14,7	3,3	10,7	58	18	0,16
C 4	-84	4,5	204	3,1	6,3	0,2	0,1	9,8	2,7	9,3	51	22	0,38
C 5	-100	4,5	77	9,0	17,0	0,5	0,3	26,7	12,1	24,8	52	31	0,20

¹ Condutividade elétrica; ² Soma de bases; ³ Capacidade de troca de cátions; ⁴ Saturação por bases;

⁵ Saturação por alumínio; ⁶ Não determinado.

Tabela 2 - Teores totais de elementos extraídos por ataque sulfúrico e índice de intemperismo Ki das camadas dos perfis de solos construídos com dois e 24 anos de construção.

Horizonte /camada	prof. cm	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Ki
-----g kg ⁻¹ -----						
-----Perfil P1-2-----						
A 1	0-58	164,8	43,5	93,2	0,2	3,0
C 1	-75	272,9	52,5	137,4	0,1	3,4
C 1	-75	286,3	34,5	150,6	0,0	3,2
C 2	-87	277,3	31,7	157,2	0,3	3,0
C 2	-87	112,4	47,3	71,8	0,2	2,6
C 3	-100	263,9	45,6	150,6	0,3	3,0
-----Perfil P2-2-----						
A 1	0-16	191,5	45,3	99,3	0,5	3,3
C 1	-53	302,0	28,7	168,8	0,3	3,0
C 2	-65	306,4	66,8	142,3	0,5	3,7
C 3	-89	304,1	18,6	180,3	0,4	2,9
C 4	-104	295,3	63,6	132,4	0,7	3,8
C 5	-112	235,4	46,6	102,6	0,6	3,9
-----Perfil P3-2-----						
A 1	0-14	351,2	82,8	160,6	0,7	3,7
C 1	-34	323,1	63,1	154,0	0,7	3,6
C 2	-48	346,7	50,6	107,5	0,6	5,5
C 3	-61	337,7	15,7	119,2	0,4	4,8
C 4	-75	308,6	25,2	109,2	0,6	4,8
-----Perfil P1-24-----						
A 1	0-4	214,6	39,3	140,6	1,3	2,6
C 1	-15	217,0	87,1	137,4	1,1	2,7
C 2	-67	263,9	97,7	167,1	0,9	2,7
C 2	-67	223,6	98,8	147,2	1,0	2,6
C 3	-98	186,6	83,9	130,8	1,2	2,4
C 4	-115	322,1	49,6	171,5	0,5	3,2
-----Perfil P2-24-----						
A 1	0-26	163,5	42,8	88,7	0,9	3,1
C 1	-61	295,3	48,6	154,0	0,4	3,3
C 2	-69	288,7	18,9	177,1	0,5	2,8
C 3	-96	277,3	28,5	183,7	0,3	2,6
-----Perfil P3-24-----						
A 1	0-20	211,2	30,3	72,9	1,1	4,9
C 1	-58	348,8	47,0	114,1	0,6	5,2
C 2	-58	335,6	21,0	86,1	0,4	6,6
C 3	-82	259,4	97,7	165,4	1,2	2,7
C 4	-89	186,6	28,6	107,5	1,2	2,9
C 5	-113	357,8	23,3	168,8	0,6	3,6
C 6	-122	357,8	16,0	197,0	0,7	3,1
-----Perfil P4-24-----						
A 1	0-4	406,1	36,3	194,6	1,1	3,5
A 2	-9	317,8	56,6	190,8	1,6	2,8
C 1	-27	279,5	66,9	171,7	0,9	2,8
C 2	-46	300,1	68,0	168,5	0,9	3,0
C 3	-74	341,3	47,9	181,2	0,4	3,2
C 4	-84	306,0	57,1	162,4	0,3	3,2
C 5	-100	409,0	60,7	157,9	0,3	4,4

Ki= SiO₂/Al₂O₃.

CE e S-SO₄²⁻ (CE=583,8 S-SO₄²⁻-14,77; R²=0,925) confirma que a CE pode ser utilizada como indicativo da formação de sulfatos solúveis durante o processo de sulfurização, conforme já constatado por KÄMPF et al. (1997) em solos construídos no Rio Grande do Sul. A maior CE nos solos da área SA-2 está relacionada ao estágio de sulfurização ativa, em que a liberação de sais para a solução do solo é intensa (FANNING & FANNING, 1989; ALMEIDA, 1999; KÄMPF et al., 2000). Solos construídos mais antigos, em estágio de pós-sulfurização, tendem a uma diminuição dos valores de CE em razão do gradativo esgotamento das fontes de sais, da lixiviação destes (SCHAFER et al., 1980; CIOLKOSZ et al., 1985) e da precipitação de novas fases minerais pela neogênese (KÄMPF et al., 1997).

Em relação aos atributos químicos relacionados ao complexo de troca, os teores de Ca, Mg, Na, a acidez potencial (H+Al) e os valores de soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) diferiram significativamente entre as áreas SA-2 e SA-24; no entanto, esse resultado não foi constatado para os teores de K e Al (Tabela 3). O valor médio da soma de bases (SB), com predomínio de Ca e Mg, foi superior na área SA-2 (13,4cmol_c kg⁻¹), o que conferiu também um maior valor médio de V (63%) comparativamente à área SA-24 (SB=8,4cmol_c kg⁻¹; V=39%) (Tabela 1). Esses resultados estão de acordo os obtidos por HAERING et al. (1993) em solos construídos jovens, no Estado de Virginia, Estados Unidos, e confirmam as constatações feitas por QUIÑONES et al. (2008), que indicaram para a área SA-2 um processo mais ativo de dissolução protônica de minerais tamponantes (carbonatos e esmectitas) constituintes das camadas geológicas utilizadas na recuperação dessas áreas (PINTO, 1997; KÄMPF et al., 2000).

A deficiência de cátions básicos em solos construídos após mineração de carvão reflete a intensa intemperização dos minerais e as consequentes perdas desses elementos por lixiviação (PITCHEL et al., 1994). Portanto, os menores valores de SB e V na área SA-24 devem-se ao maior tempo de exposição das camadas contendo pirita a condições oxidantes (sulfurização). Essa situação favorece a dissolução de silicatos e a lixiviação de cátions (Ca, Mg e Na) acompanhados do ânion sulfato (CAMPOS et al., 2003), bem como a já referida neogênese de fases minerais contendo K e Na (KÄMPF et al., 1997).

A maior acidez potencial (H+Al) na SA-24 (15,4cmol_c kg⁻¹), em comparação com a SA-2 (9,4cmol_c kg⁻¹; P=0,0672), é decorrente da dissolução dos silicatos, que resulta em elevada liberação de prótons (H⁺) na hidrólise do Al e Fe liberados no processo

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos relacionados à evolução dos conjuntos de amostras dos solos construídos com dois e 24 anos de construção.

Atributos do solo	Idade anos	Média	Mínimo	Máximo	U ³	p
pH	2	4,8	3,9	7,0	217,5	0,9797
	24	4,6	3,7	5,6	214,5	
CE, $\mu\text{S cm}^{-1}$	2	241	65	385	372,0	0,0001
	24	101	10	329	60,0	
Ca, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	2	7,0	2,3	12,3	349,0	0,0008
	24	3,8	0,5	9,0	83,0	
Mg, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	2	5,7	1,4	17,7	295,5	0,0446
	24	3,7	0,3	17,0	136,5	
K, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	2	0,5	0,1	1,5	186,0	0,4485
	24	0,8	0,1	2,8	246,0	
Na, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	2	0,2	0,0	0,5	339,5	0,0013
	24	0,1	0,0	0,3	92,5	
SB, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	2	13,4	6,4	26,6	326,5	0,0052
	24	8,4	1,1	26,7	105,5	
Al, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	2	5,6	0,0	20,7	175,5	0,3090
	24	5,5	0,3	12,1	256,5	
H+Al, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	2	9,4	0,5	29,7	143,5	0,0672
	24	15,4	5,2	71,8	288,5	
V, %	2	63	34	96	330,0	0,0039
	24	39	4	72	102,0	
m, %	2	25	0	57	122,0	0,0174
	24	43	4	89	310,0	
S-SO ₄ ²⁻ , g kg^{-1}	2	0,38	0,04	0,61	279,0	0,0011
	24	0,17	0,00	0,51	63,0	
Fe ₂ O ₃ , g kg^{-1}	2	44,9	15,7	82,8	185,0	0,4382
	24	52,1	16,0	98,8	247,0	
Al ₂ O ₃ , g kg^{-1}	2	130,4	71,8	180,3	129,0	0,0279
	24	151,5	72,9	197,0	303,0	
SiO ₂ , g kg^{-1}	2	274,0	112,4	351,2	200,5	0,7030
	24	286,2	163,5	409,0	231,5	
Ki	2	3,62	2,60	5,50	294,5	0,0469
	24	3,33	2,40	6,60	137,5	
P ₂ O ₅ , g kg^{-1}	2	0,44	0,01	0,80	97,0	0,0025
	24	0,81	0,30	1,60	335,0	

¹ Desvio padrão; ² Coeficiente de variação; ³ Teste Mann-Whitney; CE – Condutividade elétrica; SB - Soma de bases; CTC - Capacidade de troca de cátions; V - Saturação por bases; S-Al - Saturação por alumínio.

(KÄMPF et al., 2000). Os teores médios de Al trocável verificados em ambas as áreas (SA-24 = 5,5 mol_c kg⁻¹ e SA-2 = 5,6 mol_c kg⁻¹) representam níveis tóxicos para o desenvolvimento de várias espécies vegetais (Tabela 1). Embora o Al trocável não tenha discriminado as áreas quanto ao estágio do processo de sulfurização, a saturação por Al diferiu significativamente (P=0,0174), com valores médios de 43% para a SA-24 e 25% para a SA-2. Isso provavelmente se deve à baixa mobilidade do Al, que ocupa os sítios de troca em substituição aos cátions básicos que foram lixiviados nos solos construídos da SA-24. Na SA-2, esse efeito pode ser observado nas camadas superficiais, em razão da maior exposição destas à ação da água e do oxigênio, favorecendo o processo de sulfurização. Já nas camadas subsuperficiais dos mesmos perfis (principalmente P2-2 e P3-2), esse processo foi menos intenso em razão do aumento da compactação (SOARES et al., 2002; QUIÑONES et al., 2008) e da diminuição da condutividade hidráulica (KÄMPF et al., 1997; QUIÑONES et al., 2008). Esses processos restringem a ação da água e do oxigênio, promovendo o aumento da taxa das reações produtoras de alcalinidade, ao mesmo tempo em que retardada a cinética das reações produtoras de acidez (SOARES et al., 2002).

No extrato sulfúrico, os teores médios de Al₂O₃ (SA-24=151,6g kg⁻¹ e SA-2=130,4g kg⁻¹) diferiram significativamente (P=0,0279) entre as áreas, ao contrário do verificado para os teores médios de Fe₂O₃ (SA-24=52,2g kg⁻¹ e SA-2=45,0g kg⁻¹) e SiO₂ (SA-24=286,2g kg⁻¹ e SA-2=274,0g kg⁻¹) (Tabela 2). Os teores significativos mais elevados de Al₂O₃ na SA-24 indicam que, uma vez liberado pela dissolução ácida dos silicatos, a baixa mobilidade do Al³⁺ favorece a sua concentração relativa em razão lixiviação preferencial dos cátions básicos. Os valores da relação molar entre SiO₂ e Al₂O₃ (índice Ki), utilizada como discriminante de classes de solos em sistemas de classificação taxonômica de solos (EMBRAPA, 2006), apresentaram uma ampla variação nas áreas estudadas (2,4<Ki<6,6), indicando camadas formadas por materiais de distintos graus de intemperismo. Os valores médios de Ki (SA-24=3,3 e SA-2=3,6) indicam uma presença significativa de argilominerais 2:1 em ambas as áreas e, para o conjunto das camadas de cada área, um estágio de intemperização mais avançado na SA-24.

Os teores de P₂O₅ apresentaram uma variação de <0,01 a 1,6g kg⁻¹, com valores médios de 0,81g kg⁻¹ na SA-24 e 0,44g kg⁻¹ na SA-2. Embora esses teores de P₂O₅ sejam considerados baixos, verificou-se uma diferença significativa (P=0,0025) destes entre as áreas, e os maiores teores obtidos na SA-24 também estão relacionados a uma concentração relativa de P₂O₅ nessa área, conforme verificado para os teores de Al₂O₃.

Os atributos químicos dos solos construídos avaliados neste estudo indicam que o processo de sulfurização constitui-se como o principal elemento da evolução pedogenética desses solos. Os resultados são suficientes para afirmar que os solos construídos na SA-2 se apresentam em estágio de sulfurização ativa e menos evoluídos em comparação aos solos da SA-24 que se mostram próximos ao estágio de pós-sulfurização. Essa avaliação indica sérias deficiências no processo de construção dos solos realizado em ambas as áreas, cujas consequências ambientais desfavoráveis foram a restrição ao desenvolvimento vegetal adequado, o processo de erosão acelerado e a contaminação do solo e da água. A prévia seleção dos materiais a serem utilizados na construção dos solos, bem como a disposição uniforme destes durante o processo de construção, são medidas que devem ser consideradas na reabilitação de áreas após a mineração de carvão a céu aberto.

CONCLUSÃO

Os atributos químicos dos perfis de solos em áreas reconstituídas após mineração de carvão foram influenciadas pelo processo de sulfurização e pelo tempo de atuação desse processo. Na área mais jovem (SA-2), o estágio de sulfurização ativo está representado por valores de pH muito baixos, associados a uma maior condutividade elétrica, teores elevados de sulfato solúvel e de soma de bases e maior saturação por bases. Na área mais antiga (SA-24), a proximidade do estágio de pós-sulfurização é indicada pela menor condutividade elétrica e pelos menores teores de sulfato solúvel, associados às maiores saturação por alumínio e acidez potencial e teores elevados de alumínio e de fósforo total. Em ambas as áreas, os solos apresentam limitações químicas para o desenvolvimento de vegetação, influenciando negativamente para a recuperação dessas áreas e de áreas adjacentes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P.S.G. **Acidificação experimental em materiais estéreis de área de mineração de carvão**. 1999. 118f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- BISSANI, C.A. et al. Determinação de sulfato solúvel em solos tiomórficos de áreas de mineração de carvão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p.1535-1537.

- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro, 1986. V.33, 796p.
- CAMPOS, M.L. et al. Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1123-1137, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000600017&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 30 mar. 2010. doi: 10.1590/S0100-06832003000600017.
- CIOLKOSZ, E.J. et al. Characteristics, genesis, and classification of Pennsylvania minesoils. **Soil Science**, Philadelphia, v.139, n.3, p.232-238, 1985. Disponível em: <<http://soil.scijournals.org/cgi/reprint/72/1/231>>. Acesso em: 30 mar. 2010. doi:10.2136/sssaj2007.0047
- DANIELS, W.L. Manipulating the chemical properties of soil and mining wastes. In: ALVAREZ V.V.H. et al. (Eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.869-897.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Brasília: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FANNING, D.S.; FANNING, M.C.B. **Soil: morphology, genesis and classification**. New York: J. Willey, 1989. 395p.
- GAIVIZZO L.H.B. et al. Potencial poluidor de regiões carboníferas. II-Efeitos da recuperação com camadas de solo sobre as plantas e a população microbiana. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, p.955-961, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782002000600007&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 30 mar. 2010. doi: 10.1590/S0103-84782002000600007.
- HAERING, K.C. et al. Changes in mine soil properties resulting from overburden weathering. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.22, p.194-200, 1993.
- KÄMPF, N. et al. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do baixo Jacuí (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.79-88, 1997.
- KÄMPF, N. et al. Solos construídos em áreas de mineração da Bacia Carbonífera. In: Centro de Ecologia – UFRGS. **Carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. Cap.17, p.596-640.
- KOPPE, J.C.; COSTA, J.F.C. Mineração. In: TEIXEIRA, E.C. **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p.15-27.
- LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 3.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p.
- McLEAN, E.O. Aluminum. In: BLACK, C.A. et al. **Methods of soil analysis**. Part. 2. Madison: ASA, 1965. p. 978-998. (Agronomy Series 9).
- PINTO, L.F.S. **Potencial de acidificação e neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão**. 1997. 186f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciências do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- PITCHEL, J.R. et al. Comparison amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.23, p.766-772, 1994.
- POTTER, K.N. et al. Physical properties of constructed and undisturbed soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.52, p.1453-1438, 1988.
- QUIÑONES, O.R.G. et al. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e a composição do material utilizado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.6, p.1564-1571, 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000600012&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 29 mar. 2010. doi: 10.1590/S0103-84782008000600012.
- SCHAFFER, W.M. et al. Minesoil genesis and morphology in a spoil chronosequence in Montana. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.802-807, 1980.
- SHUKLA, M.K. et al. Physical and hydrological characteristics of reclaimed mine soils in Southeastern Ohio. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.68, p.1352-1359, 2004.
- SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 350p.
- SOARES, E.R. et al. Efeito da compactação e CaCO₃ na oxidação da pirita em estéril de mineração de carvão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.65-73, 2002.
- STATISTIX 7. **Analytical Software**. User's manual. Tallahassee, 2000. 396p.
- TEDESCO, J.M. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. (Boletim técnico n.5).