



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbc.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A.; SOUZA, L. S.
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, vol. 27, núm. 6, novembro-diciembre, 2003, pp. 1123-1137
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214033017>

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

redalyc.org

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

SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DE TRÊS ÁREAS DE SOLO CONSTRUÍDO APÓS MINERAÇÃO DE CARVÃO A CÉU ABERTO EM LAURO MÜLLER, SANTA CATARINA⁽¹⁾

M. L. CAMPOS⁽²⁾, J. A. ALMEIDA⁽³⁾ & L. S. SOUZA⁽⁴⁾

RESUMO

Em solos construídos após mineração de carvão, a contaminação das camadas superficiais com pirita provoca intensa acidificação do solo, acelera a intemperização de minerais, eleva os teores de Al e Mn e aumenta a lixiviação de bases. O presente trabalho avaliou características químicas, teor de argila e mineralogia, bem como a variabilidade espacial para algumas dessas características em três áreas de solos construídos após mineração de carvão a céu aberto no município de Lauro Müller, Santa Catarina. As três áreas selecionadas apresentavam diferenças no modo de construção topográfico. A primeira, denominada Mina Juliana (MJ), foi construída em 1996, utilizando material (sólum, regolito argiloso e rocha) que foi separado e estocado antes da mineração, conforme previsto no plano de reabilitação. A segunda, denominada Mina do Apertado (MA), foi construída, em 1996, usando, como material de cobertura, o sólum proveniente do decapeamento de um morro adjacente à área. A terceira área, denominada Mina Rio do Meio (MRM), sofreu apenas construção topográfica em 1983, com mistura de resíduos de pirita de carvão e rochas de várias camadas. Amostras de solo foram coletadas em sistema de grade de pontos, em três profundidades, sendo analisados o pH em água, teores de Ca, Mg, K e Al trocáveis, H + Al e condutividade elétrica. Em amostras selecionadas, analisaram-se alguns metais pesados e a mineralogia da fração argila. Análises efetuadas em dois perfis de solo representativos das condições anteriores à mineração foram utilizados, para comparação. Todas as áreas apresentaram grande dispersão de valores para características químicas e teor de argila dos solos entre os pontos amostrados. O processo de construção do solo que resultou em maior uniformidade destas características e melhores condições para o estabelecimento de espécies vegetais foi o da área MJ. O solo da área MA, graças

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado apresentada, pela primeira autora, ao Curso de Mestrado em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Suporte financeiro da CAPES. Recebido para publicação em agosto de 2000 e aprovado em setembro de 2003.

⁽²⁾ Engenheira-Agrônoma, Mestre em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). E-mail: marialex@bol.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, UDESC. Bolsista do CNPq. E-mail: a2jaa@cav.udesc.br

⁽⁴⁾ Pesquisador da EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa da Mandioca e Fruticultura Tropical. Caixa Postal 7, CEP 44380-000 Cruz das Almas (BA). E-mail: lsouza@cnpmf.embrapa.br

à mistura de resíduos de carvão piritoso com o solo superficial, está em franco processo de acidificação e contém alta concentração de sais. O solo da área MRM, em virtude do abandono e do longo período de exposição de resíduos piritosos na camada superficial, mostra elevada acidez, tendo já sofrido intensa lixiviação dos sais. As únicas variáveis testadas que apresentaram modelo definido para semivariância foram Al trocável, H + Al e argila, cujo alcance variou de 50 a 70 m.

Termos de indexação: oxidação da pirita, variabilidade espacial, solos construídos.

SUMMARY: EVALUATION OF THREE CONSTRUCTED SOIL AREAS AFTER SURFACE COAL MINING IN LAURO MÜLLER, SANTA CATARINA STATE, BRAZIL

In soils constructed after coal mining, superficial contamination with pyrite coal residues causes acidification, accelerates the mineral weathering, increases Al and Mn contents, and base leaching. The present work evaluated chemical characteristics, clay content and mineralogy, and the spatial variability for some of these characteristics in three constructed soil areas after surface coal mining in Lauro Müller, Santa Catarina State, Brazil. The selected areas present differences in their topographic soil construction. The first area, Juliana Mine (MJ), was constructed in 1996 with materials that had been removed and stored separately before mining (solum, loamy regolithe and rock fragments), as laid down in the rehabilitation plan. The second, Apertado Mine (MA), was constructed in 1996 with solum removed from an adjacent hilltop. The third area, Rio do Meio Mine (MRM), was only submitted to topographical reconstitution in 1983 with a mixture of coal pyrite residues and rock fragments from several soil layers. Soil samples were collected in a grid system, at three depths, and analyzed for pH, exchangeable Ca, Mg, K, Al and H + Al contents, and electric conductivity. Heavy metals and clay mineralogy were also analyzed in some selected samples. Representative analyses of pre-mining conditions, carried out in two soil profiles, were utilized for comparisons with the constructed soils. Values of the chemical soil characteristics and clay contents in all areas presented a high variability among the sampled points. The soil construction process utilized in MJ caused the highest uniformity of characteristics and provided the most adequate conditions for the establishment of vegetal species. In MA, the addition of pyrite coal material to the superficial soil is causing a continuous soil acidification, as well as high salt concentrations. In the MRM area, which had been abandoned and exposed to pyrite coal deposition on the surface layer for an extended period, the soil is very acid and has already suffered intensive leaching of salts. Al, H + Al, and clay contents were the only tested variables that presented a defined model for semi-variance, with a range of 50-70 m.

Index terms: pyrite oxidation, spatial variability, constructed soils.

INTRODUÇÃO

O carvão mineral constitui dois terços dos recursos energéticos não-renováveis nacionais, sendo suas reservas vinte vezes maiores do que as do petróleo e setenta e cinco vezes superiores às do gás natural. Santa Catarina dispõe de reserva de 4,3 bilhões de toneladas, o que corresponde a 13 % do total do País (Sanchez & Formoso, 1990). As reservas de carvão do estado de Santa Catarina concentram-se numa área alongada no sentido norte/sul, situada entre os municípios de Araranguá e Lauro Müller, com 70 km de comprimento por 15-20 km de largura (Brasil, 1987).

A exploração do carvão em Santa Catarina é feita em minas subterrâneas e a céu aberto. Ambos os processos acarretam problemas ambientais, pois modificam a estrutura do meio natural, pela disposição inadequada dos resíduos da mineração, causando contaminação de águas superficiais e subterrâneas, promovendo alterações na atmosfera ao redor das minas pela geração de gases e poeiras e perdas de solo fértil (Sanchez & Formoso, 1990).

Em Santa Catarina, nos municípios de Siderópolis, Urussanga, Criciúma e Lauro Müller, existiam, até 1990, cerca de 2.100 ha de terras improdutivas, direta ou indiretamente, afetadas pelas atividades de mineração (Santa Catarina, 1990). Em 1997, o

resíduo da mineração do carvão já cobria um total de 4.700 ha, tendo sido incluídas neste cálculo as minas de carvão ativas ou não e locais de lavagem do carvão (Mitsubishi Materials Corporation, 1997).

De acordo com a resolução 001/86 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), que institui a obrigatoriedade da apresentação de EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental/ Relatório de Impacto Ambiental), para licenciamento de empreendimentos de mineração, o plano de lavra e o de reabilitação da área a ser minerada devem constar no projeto de mineração. A obrigação de reabilitar áreas degradadas encontra-se regulamentada pelo decreto número 97.632, de 10 abril de 1989, porém, segundo Castro (1998), o tratamento legal dispensado pela legislação brasileira para esta finalidade é insuficiente, devendo ser aprimorado.

No processo de reabilitação de áreas de mineração de carvão a céu aberto, são utilizados o solo e as litologias sobrejacentes às camadas de carvão para a construção topográfica da paisagem, devendo ser proporcionadas, ao solo assim construído, condições para desenvolvimento da vegetação (Pinto, 1997).

As etapas de reabilitação das áreas degradadas pela mineração, assumidas atualmente como ambientalmente aceitas pelos órgãos de fiscalização, foram observadas em vários projetos de mineração apresentados ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) como “plano de recuperação de área degradada”. Este plano sugere, de forma geral: (1) remoção do sólum no sentido perpendicular ao corte, para estocagem em local pré-determinado; (2) retirada do regolito argiloso e camadas sobrejacentes ao carvão no sentido do espaço criado pelo corte para último recobrimento; (3) após retirada do carvão, preenchimento da cava com o “estéril” piritoso e o arenito; (4) recobrimento do “estéril” repostado com parte do regolito argiloso proveniente do corte adjacente; (5) reposição do sólum previamente estocado sobre o corte já preenchido e recoberto; (6) conformação e drenagem do terreno, e (7) plantio e, ou, semeadura de espécies vegetais para fixação do solo.

Entretanto, os diferentes processos de lavra utilizados pelas empresas mineradoras, aliados às dificuldades na fiscalização, conduzem na prática a deficiências no processo de construção, resultando normalmente na contaminação das camadas superficiais do solo construído com os resíduos do carvão.

Com esses resíduos encontra-se a pirita (FeS_2) que, em contato com o ar e a água, oxida-se formando H_2SO_4 . Os altos níveis de acidificação resultantes da oxidação da pirita podem provocar dissolução de minerais aluminossilicatados, elevar a concentração de metais, como Al, Fe, Mn, Cu, Ni e Zn, a níveis tóxicos (Barnhisel et al., 1982), acelerar as perdas de Ca e Mg, por lixiviação na forma de sais sulfato

(Pitchel et al., 1994) e pode ainda determinar a deficiência de P, N, Mo e B, prejudicando o programa de revegetação das áreas exploradas (Pugh et al., 1981; Nordstrom, 1982; Pitchel et al., 1994).

As características dos solos construídos após mineração de carvão dependem da variabilidade herdada dos materiais geológicos e dos diferentes processos construtivos, determinando espessura e grau de compactação das camadas distintos, bem como diferente disposição dos materiais, aos quais os processos pedogênicos irão se sobrepor (Kämpf et al., 1997). As operações de mineração a céu aberto tendem a misturar materiais de várias partes da coluna geológica. Essa é a razão por que as propriedades dos solos construídos após mineração de carvão variam muito em escalas de distâncias menores do que as do solo natural (Schafer et al., 1980), determinando que em cada local se faça um estudo específico. O conhecimento dessas variações é fundamental como subsídio para definição de esquemas mais apropriados de amostragem, para explicação das respostas diferenciadas obtidas após implantação de espécies vegetais e para melhor definição de opções de uso e manejo dessas áreas.

Considerando a inexistência de informações acerca dos solos construídos após mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina, o presente trabalho objetivou avaliar as características químicas, o teor de argila e a mineralogia da fração argila, bem como a variabilidade espacial para algumas dessas características no solo de três áreas mineradas com carvão no município de Lauro Müller (SC), que sofreram diferentes modos de construção do solo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O município de Lauro Müller situa-se nas coordenadas $28^\circ 20' \text{ S}$ e $49^\circ 20' \text{ W}$. As litologias verificadas na região constituem parte das formações gondiônicas da Bacia do Paraná, representadas localmente pelas Formações Palermo e Rio Bonito, camada minerada Barro Branco (Brasil, 1987).

As avaliações foram efetuadas em três áreas de mineração de carvão a céu aberto, no município de Lauro Müller, distrito de Guatá, as quais sofreram diferentes processos de construção topográfica. A expressão solo construído, já utilizada por Kämpf et al. (1997) e Pinto (1997), para indicar construção topográfica de áreas que sofreram mineração a céu aberto, será utilizada para se referir a essas áreas.

Para a seleção das áreas, foram considerados três tipos de construção de solo mais frequentes na região de Lauro Müller. A primeira área, denominada Mina Juliana (MJ), foi minerada durante o ano de 1995 com prévia remoção e estocagem do sólum, do regolito argiloso e das camadas de rocha consolidada

sobrejacentes ao carvão. Após a retirada do carvão, em 1996, deu-se início à recuperação da área, sendo a cava preenchida com o resíduo piritoso e o arenito e sobre estes foi depositado o regolito argiloso, ou seja, seguiu o plano de reabilitação previsto no projeto que a mineradora apresentou ao DNPM. Por último, segundo a informação da Mineradora Barro Branco, foram feitas a reposição do sólum, a conformação e a drenagem do terreno. Como tentativa de minimizar as perdas de solo por erosão, foi semeada uma gramínea, a qual, no momento da coleta, cobria menos do que 20 % da área. É difícil saber a origem exata do sólum utilizado, pois o processo de construção dessa área foi realizado por contrato de empreitada, por empresa diferente da que procedeu à mineração da área. Observou-se, entretanto, que parte do morro adjacente à área construída encontrava-se parcialmente decapeada, sugerindo ter sido parte de seu sólum utilizada no recobrimento final da área.

A segunda área, denominada Mina do Apertado (MA), foi minerada em 1992 e recomposta em 1995/96. Para cobrir os resíduos da mineração, utilizou-se material proveniente do decapeamento de um morro situado nas proximidades da área minerada. O decapeamento foi necessário, segundo a empresa mineradora, porque o processo de mineração utilizado fez uso de explosivos e maquinaria pesada, o que resultou em mistura das várias camadas geológicas e perda do sólum original. Na tentativa de revegetar a área, foi realizado o plantio de mudas de *Eucaliptus* spp, as quais apresentavam diâmetro médio do caule inferior a 1 cm na época da amostragem, com perda de mudas por erosão hídrica.

A terceira área, denominada Mina Rio do Meio (MRM), foi minerada e construída em 1983, e o perfil topográfico caracteriza-se por uma mistura do material da coluna geológica e o resíduo piritoso. Na superfície do terreno, havia grande quantidade de fragmentos de rochas e de resíduos de carvão, com pequena quantidade de material proveniente dos horizontes superficiais do perfil de solo anterior à mineração. Aparentemente, logo após a mineração, o terreno sofreu conformação e houve uma tentativa de revegetar a área com *Eucaliptus* spp, porém as árvores encontravam-se com pequeno porte e pequena espessura do tronco, considerando a idade das plantas (15 anos).

Considerando que se trata de áreas onde os solos foram construídos, segundo diferentes processos, esses solos são essencialmente antropogênicos. Devido ao tempo muito recente de construção, assume-se que os processos pedogênicos são incipientes, não sendo possível ainda identificar a presença de horizontes genéticos. Por esse motivo, a amostragem dos solos foi feita em camadas, em diferentes profundidades.

Nos meses de agosto e setembro de 1998, em cada uma das áreas, foram coletadas amostras de

material dos solos construídos nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m. As amostras foram coletadas em sistema de grade, com pontos distanciados a cada 20 m, lateral e longitudinalmente. O comprimento das linhas variou, para cada mina, de acordo com o tamanho e formato da área, resultando em 25 pontos, para as MJ e MA, e em 21 pontos, para a MRM. As dimensões aproximadas dessas áreas foram respectivamente de 1,1, 1,2 e 0,8 ha.

Foram descritas e coletadas amostras em dois perfis de solo representativos das condições dos solos antes da mineração. O primeiro perfil, representativo da área da Mina Juliana, foi coletado em corte adjacente à área construída. O segundo, representativo das Minas do Apertado e do Rio do Meio, foi coletado em corte adjacente à Mina do Apertado, pois os solos dessas duas áreas eram semelhantes.

Na fração terra fina seca ao ar das amostras (TFSA), foram realizadas análises físicas e químicas de rotina. O pH foi determinado em água e em solução de KCl mol L⁻¹ por potenciometria, utilizando-se uma relação solo/solução de 1:1 (Tedesco et al., 1995). A condutividade elétrica (CE) foi determinada em pasta saturada, usando condutivímetro digital (EMBRAPA, 1997). Os teores de Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídos com solução neutra de KCl mol L⁻¹. O Ca e o Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al por titulometria de neutralização com NaOH (Tedesco et al., 1995). Os teores de K foram extraídos com solução de H₂SO₄ 0,05 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹ e determinados por fotometria de chama (Tedesco et al., 1995). A acidez total (H + Al) foi extraída com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ tamponado a pH 7 e quantificada por titulometria de neutralização com NaOH (EMBRAPA, 1979). Os valores de soma de bases (S), saturação por bases (V %) e CTC a pH 7 foram calculados segundo EMBRAPA (1979). O carbono orgânico, analisado segundo Tedesco et al. (1995), foi determinado apenas para as amostras do solo dos perfis representativos das condições dos solos antes da mineração.

Os teores de Cd, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn foram analisados somente nas amostras da camada de 0-0,2 m, em 13 pontos da MJ e da MA e em 11 pontos da MRM, selecionando-se apenas uma amostra de cada dois pontos coletados. Tais elementos foram extraídos com solução de H₂SO₄ 0,05 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹ e determinados por espectrometria de plasma, segundo Gomes et al. (1997).

A composição granulométrica das amostras de solo foi determinada após agitação prévia com 10 mL de NaOH mol L⁻¹ e 75 mL de água destilada por 10 min em baixa rotação, as amostras permaneceram em repouso por 12 h e então sofreram nova agitação por duas horas. A fração areia foi obtida por peneiramento, a argila pelo método de Bouyoucos, e o silte por diferença (EMBRAPA, 1979).

Para avaliar as possíveis variações na composição mineralógica do solo entre as áreas construídas e os horizontes dos solos pré-mineração, foram separadas as frações argila total, silte e areia de horizontes selecionados dos perfis representativos, além de amostras de cinco pontos de cada área construída, selecionados dentre aqueles que apresentaram valores de pH muito baixos ou CE alta. A composição mineralógica foi determinada segundo Jackson (1965), sem eliminação da matéria orgânica e dos óxidos de Fe. Apenas a fração argila, saturada com Na, foi analisada em lâminas de argila orientada por difratometria de raios X, utilizando-se um difratômetro PHILIPS, dotado de goniômetro vertical, com variação angular de 3 a $40^\circ \pm 2^\circ$. A identificação dos componentes mineralógicos presentes nessa fração foi feita segundo procedimentos sugeridos por Whitthig & Allardice (1986).

Na análise dos dados obtidos, foram utilizados alguns parâmetros da estatística descritiva como média, máximo, mínimo, e coeficiente de variação, utilizando-se o programa Microsoft Excel.

Para modelar a variabilidade espacial e obter o alcance de dependência espacial para os atributos pH em água, condutividade elétrica, acidez potencial ($H + Al$), Al trocável, Ca, Mg e teor de argila, foi utilizado o semivariograma, partindo do pressuposto do atendimento da hipótese intrínseca, o qual foi estimado por:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

em que $\gamma^*(h)$ é a semivariância, $N(h)$ é o número de pares separados pela distância h , e $Z(x_1)$, $Z(x_2)$, ..., $Z(x_n)$ são os valores medidos em cada ponto x_1 , x_2 , ..., x_n (Souza, 1992; Mallants et al., 1996; Souza et al., 1997; Vieira, 2000).

A semivariância ($\gamma^*(h)$) aumenta juntamente com o aumento da distância (h) até uma distância "a", chamada de alcance da dependência espacial (Souza, 1992), que representa a distância na qual os pontos amostrais estão correlacionados entre si. O valor do alcance "a" de um atributo garante que todos os vizinhos situados dentro de uma circunferência com raio igual ao alcance são tão similares que podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles (Webster, 1985). O conhecimento do alcance é importante para definição da intensidade ótima de amostragem, visando reduzir o esforço e o erro-padrão da média, além de aumentar a representatividade da amostra (Webster, 1985).

O efeito pepita (Co) é o valor de $\gamma^*(h)$ quando $h = 0$, que indica a variabilidade não explicada, devido a erros de medida ou microvariabilidade não detectada, considerando a distância de amostragem utilizada (Souza, 1992; Salviano et al., 1998). O

patamar ($Co + C1$) representa o valor de $\gamma^*(h)$ em "a", e é, a princípio, a variância da variável (Webster, 1985).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos perfis de solo pré-mineração

Os materiais de solo dos perfis são derivados de siltitos, com alguma contribuição de arenitos, presentes na formação que lhes deu origem. Ambos apresentaram textura média/argilosa, coloração bruno-amarelada e bruno forte e profundidade do sólim inferior a 1,5 m. Os horizontes superficiais do perfil da MJ apresentaram teores de argila um pouco mais altos do que o perfil representativo da MA e MRM (Quadro 1) e estrutura moderada a fracamente desenvolvida em blocos subangulares no horizonte B, com cerosidade fraca e comum revestindo a superfície dos agregados.

Como se pode verificar, a reação do solo foi extremamente ácida, com pH em água nos horizontes superficiais inferior a 4,0 no perfil da MJ, cujos valores aumentaram a partir do horizonte B1. No perfil representativo da MA e da MRM, os valores de pH foram mais altos que os da MJ nos horizontes superficiais, mas não diferiram deste em profundidade. Os teores de carbono orgânico também foram mais altos nos horizontes superficiais do perfil representativo da MA e da MRM, provavelmente pelo fato de ter sido este perfil coletado em área de mata nativa (Quadro 1). A condutividade elétrica do extrato de saturação foi muito baixa, indicativo da ausência de sais solúveis em ambos os perfis. Os valores de soma (S) e saturação por bases (V %) foram muito baixos. Por outro lado, os teores de Al trocável foram muito elevados, geralmente superiores a $7,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, resultando em uma saturação média por Al de 95 % nos dois perfis. A CTC a pH 7, corrigida para 100 g de argila, sem correção para C orgânico, ficou em torno de $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no horizonte B dos dois perfis, indicando solos com argila de atividade alta (EMBRAPA, 1999). Considerando a presença de um horizonte B textural e as demais características, os perfis de solo representativos das condições anteriores à mineração foram classificados como Alissolos Crômicos Argilúvicos (EMBRAPA, 1999).

Características químicas e teor de argila dos solos construídos

Os parâmetros estatísticos descritivos, determinados para algumas características químicas e para o teor de argila dos solos construídos, estão indicados nos quadros 2, 3 e 4, respectivamente, para as profundidades de 0-0,2 m, nas MJ, MA e MRM, e de 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m, nas MJ e MA.

Quadro 1. Caracterização dos perfis de solo de áreas próximas das minas: Juliana, do Apertado e Rio do Meio

Horizonte	Profundidade	Cor úmida	Argila	pH H ₂ O	Al	H + Al	S	CTC	pH 7,0	V	m	CE	C
	cm		%		— cmol _c kg ⁻¹ —				%			mS m ⁻¹	dag kg ⁻¹
Mina Juliana													
A1	0- 10	10YR 4/4	30	3,87	7,7	11,7	0,5	12,1	4	94	12,38	0,99	
A2	10- 30	10YR 5/6	30	3,84	9,2	10,0	0,2	10,2	2	98	12,38	0,76	
AB	30- 43	10YR 5/6	33	3,87	8,4	12,3	0,3	12,6	3	96	10,02	0,76	
B1	43- 71	10YR 5/6	40	4,34	8,4	10,9	0,3	11,2	2	97	11,07	0,73	
B2	71-104	7,5YR 5/6	40	4,45	7,8	10,3	0,4	10,6	4	95	9,96	0,59	
B3	104-144	7,5YR 5/8	40	4,39	7,5	9,6	0,2	9,8	2	98	12,34	0,34	
BC	144-224	7,5YR 5/8	37	3,84	3,8	9,5	0,3	9,7	3	94	7,38	-	
C	224-236	7,5YR 5/8	27	4,47	-	-	0,2	-	-	-	8,53	-	
CR	236-320 ⁺		-	4,44	-	-	-	-	-	-	8,53	-	
Mina do Apertado e Mina Rio do Meio													
A1	0- 8	10YR 3/2	22	4,41	6,9	14,3	1,4	15,6	9	83	15,79	3,45	
A2	18- 23	10YR 4/4	25	4,35	6,8	14,0	0,5	14,5	3	93	11,27	1,77	
AB	23- 47	10YR 4/6	28	4,38	6,9	10,2	0,2	10,4	2	96	7,42	1,17	
B1	47- 90	10YR 5/6	37	4,41	7,4	10,2	0,2	10,6	2	97	8,04	0,71	
B2	90-132	7,5YR 5/8	40	4,48	7,6	9,7	0,1	9,8	1	98	6,95	0,41	
BC1	132-160	5YR 5/8	40	4,50	8,1	9,2	0,2	9,5	3	97	5,47	0,41	
BC2	160-205	5YR 5/8	40	4,34	8,2	9,9	0,2	10,1	2	98	6,15	-	
C	205-267 ⁺	10YR 5/8	28	4,48	7,1	7,1	0,2	-	-	-	7,81	-	

Quadro 2. Parâmetros estatísticos para pH, CE, cátions trocáveis, H + Al e argila na profundidade de 0-0,2 m no perfil de solo construído nas áreas das minas: Juliana, do Apertado e Rio do Meio

Estatística	pH	CE	H + Al	Al	K	Ca	Mg	Argila
		mS m ⁻¹			— cmol _c kg ⁻¹ —			dag kg ⁻¹
Mina Juliana								
Média	4,48	9,79	9,96	2,96	0,12	0,94	0,63	41,5
Máximo	4,80	14,30	12,07	3,34	0,19	4,03	1,48	51,6
Mínimo	3,90	5,90	4,02	2,67	0,06	< 0,01	0,12	31,6
C.V. (%)	5	24	17	7	27	123	48	11
Mina do Apertado								
Média	4,07	140	12,97	8,5	0,20	0,95	1,16	28,4
Máximo	4,65	2.460	16,78	11,6	0,25	5,99	7,02	40,0
Mínimo	3,20	8,8	9,78	4,1	0,09	0,02	0,03	18,3
C.V. (%)	10	339	16	22	24	157	112	20
Mina Rio do Meio								
Média	3,46	56,34	13	7,4	0,06	0,06	0,03	18,1
Máximo	4,4	160	19,2	11,4	0,07	0,48	0,18	23,3
Mínimo	2,8	12,4	9,2	4,7	0,04	0,01	< 0,01	10,0
C.V. (%)	11	75	21	21	22	176	158	21

Em relação ao pH em água, observou-se que os valores médios na profundidade de 0-0,2 m (Quadro 2) foram de 4,48, para a MJ; 4,07, para a

MA, e de 3,46, para a MRM. Os menores valores de pH na MRM resultaram do intenso processo de oxidação da pirita, decorrente da grande exposição

de resíduos de carvão piritoso, por longo tempo, na camada superficial do solo, conforme também foi constatado por Moses et al. (1987).

O valor médio de pH no solo construído da MA foi similar ao encontrado nos horizontes mais superficiais do perfil representativo das condições anteriores à mineração dessa área (Quadro 1), porém possui pontos onde o pH atingiu valores muito mais baixos (Figura 1b), o que indica que o processo de oxidação da pirita em certos locais também foi intenso, graças à mistura localizada de resíduos piritosos com o material de cobertura. Nas profundidades de 0,2-0,4 e de 0,6-0,8 m (Quadros 3 e 4), a tendência de decréscimo no valor médio de pH foi a mesma, sendo os valores maiores na MJ em relação à MA.

Quando os valores de pH foram comparados em profundidade, para cada mina, constatou-se aumento das médias para a MJ, bem como valores muito semelhantes para a MA. Nesta última, entretanto, constatou-se valor mínimo de 2,66 na profundidade de 0,2-0,4 m (Quadro 3). A oxidação da pirita em camadas mais profundas, segundo Singh et al. (1982), possivelmente deve-se à presença de oxigênio dissolvido na água percolante e a vazios formados entre fragmentos de rocha, os quais favorecem a difusão do oxigênio para o interior do perfil.

Considerando os valores, máximo e mínimo, do pH para as três áreas, nas diferentes profundidades, constatou-se que as maiores amplitudes de variação ocorrem na MRM, conforme é mais bem visualizado

Quadro 3. Parâmetros estatísticos para pH, CE, cátions trocáveis, H + Al e argila na profundidade de 0,2-0,4 m no perfil de solo construído nas áreas das minas: Juliana e do Apertado

Estatística	pH	CE	H + Al	Al	K	Ca	Mg	Argila
		mS m ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹					dag kg ⁻¹
	Mina Juliana							
Média	4,54	10,16	9,05	3,03	0,10	0,69	0,52	29,9
Máximo	4,96	23,29	16,45	3,40	0,36	4,66	1,22	52,0
Mínimo	4,12	4,89	3,38	2,40	0,04	< 0,01	0,04	9,3
C.V. (%)	6	41	30	9	60	176	63	20
	Mina do Apertado							
Média	3,93	894	13,32	9,3	0,21	0,26	0,63	17,2
Máximo	4,70	3.910	20,34	11,9	0,35	2,20	1,44	36,6
Mínimo	2,66	7,9	9,18	7,2	0,07	0,01	0,07	1,1
C.V. (%)	13	158	20	14	31	171	152	86

Quadro 4. Parâmetros estatísticos para pH, CE, cátions trocáveis, H + Al e argila na profundidade de 0,6-0,8 m no perfil de solo construído nas áreas das minas: Juliana e do Apertado

Estatística	pH	CE	H + Al	Al	K	Ca	Mg	Argila
		mS m ⁻¹	cmolc kg ⁻¹					dag kg ⁻¹
			Mina Juliana					
Média	4,65	9,89	8,24	3,05	0,09	0,15	0,29	23,9
Máximo	5,23	45,00	16,04	3,50	0,20	0,39	0,81	50,8
Mínimo	4,11	4,67	2,97	2,40	0,04	< 0,01	< 0,01	8,3
C.V. (%)	6	80	39	9	57	75	84	39
			Mina do Apertado					
Média	4,04	207	11,88	9,5	0,22	0,89	0,89	27,5
Máximo	4,78	3.020	17,00	12,21	0,37	4,95	1,67	37,4
Mínimo	3,44	0,1	5,30	7,08	0,07	0,09	0,05	8,85
C.V. (%)	9	297	21	15	34	151	63	33

na figura 1, onde estão indicados os valores de pH para cada ponto, de acordo com a profundidade.

Os maiores valores de condutividade elétrica (CE) foram constatados na MA, com média de 894 mS m^{-1} e valor máximo de 3.910 mS m^{-1} , na profundidade de 0,2-0,4 m (Quadro 3). Na figura 2b, observou-se

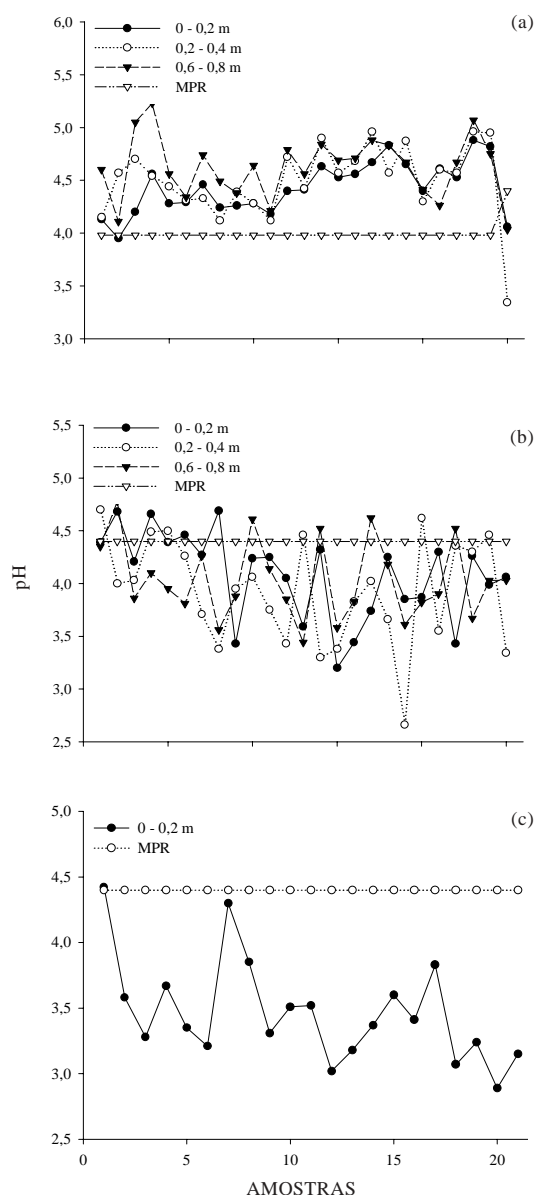


Figura 1. Valores de pH em água nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m, para as minas: Juliana (a) e do Apertado (b), profundidade de 0-0,2 m para mina Rio do Meio (c) e para o perfil representativo do solo pré-mineração (MPR) que representam médias de valores na profundidade de 0-0,8 m.

que em vários pontos dessa área muitos valores foram superiores a 2.000 mS m^{-1} , evidenciando forte salinidade, segundo os limites sugeridos por Daniels (1996). Na camada de 0-0,2 m dessa área, o valor médio de CE foi de 140 mS m^{-1} (Quadro 2). Valores superiores a 100 mS m^{-1} , segundo o autor citado, já podem afetar o desenvolvimento de espécies sensíveis ao excesso de sais. Tais resultados indicam que na MA houve expressiva formação de sulfatos ácidos, resultantes da oxidação da pirita, principalmente na camada de 0,2-0,4 m. Dixon et al. (1982), Breemen (1982) e Karathanasis et al. (1988) fizeram considerações sobre a formação de sulfatos ácidos pela oxidação da pirita, intemperismo de minerais e lixiviação dos sulfatos acompanhados pelos cátions presentes nos sistemas. Neste caso, considerando a construção recente da área, com cerca de quatro anos, provavelmente os sais de sulfato ainda não foram lixiviados.

O valor médio da CE para MRM foi de 56 mS m^{-1} , chegando a um valor máximo de 160 mS m^{-1} na camada de 0-0,2 m (Quadro 2, Figura 2c). Apesar de ter sido constatada a maior quantidade de resíduos de carvão nessa área, o valor médio de CE foi mais baixo do que o da MA (140 mS m^{-1}), o que se deve, provavelmente, ao longo período de exposição desses resíduos na superfície de mais de 15 anos, que favoreceram a oxidação da maior parte da pirita e a lixiviação dos sais em profundidade.

Na MJ, o valor médio da CE nas várias profundidades analisadas (Quadros 2, 3 e 4 e Figura 2a) não diferiu dos valores encontrados no perfil representativo dessa área (Quadro 1), indicando ausência de problemas de salinidade na área.

Os teores médios de Al trocável e de H + Al nas amostras do solo construído da MJ (Quadros 2, 3 e 4) foram menores do que os encontrados no perfil representativo das condições anteriores à mineração dessa área (Quadro 1), em todas as profundidades. Os valores, máximo e mínimo, de Al variaram de 2,4 a 3,5 e de 3,2 a 9,2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ nas duas situações, respectivamente. Além disso, foi observada grande desuniformidade nos valores de H + Al entre os diversos pontos amostrados (Figura 3a). Como os teores de Ca e Mg foram também muito baixos, é improvável que o solo construído tenha sofrido calagem. Acredita-se que essas diferenças se devam à presença de material oriundo de camadas mais profundas, em mistura com solo estocado proveniente de outro local, com níveis mais baixos de acidez. Conforme já foi mencionado, o processo de construção do solo nesse caso foi feito por empresa diferente da que efetuou a mineração da área, não havendo garantia de que tenha sido utilizado apenas o solum do local.

Para os solos construídos das MA e MRM, os valores médios de Al trocável e de H + Al (Quadros 2, 3 e 4) foram superiores aos encontrados nas análises de amostras do perfil pré-mineração dessas áreas

(Quadro 1). Além disso, foi observado que, em muitos pontos das duas áreas, os teores de H + Al situaram-se acima dos valores médios dos horizontes do perfil pré-mineração (Figuras 3b e 3c). Esse aumento da acidez deve ter sido ocasionado pela oxidação da pirita associada aos resíduos de carvão constatados

nessas duas áreas, que, além de reduzir expressivamente o pH, ocasionou maior dissolução de aluminossilicatos, liberando mais alumínio para o meio. O aumento dos teores de Al trocável pela dissolução de minerais em áreas de solos construídos também foi relatado por Breemen (1982) e Dixon et al. (1982).

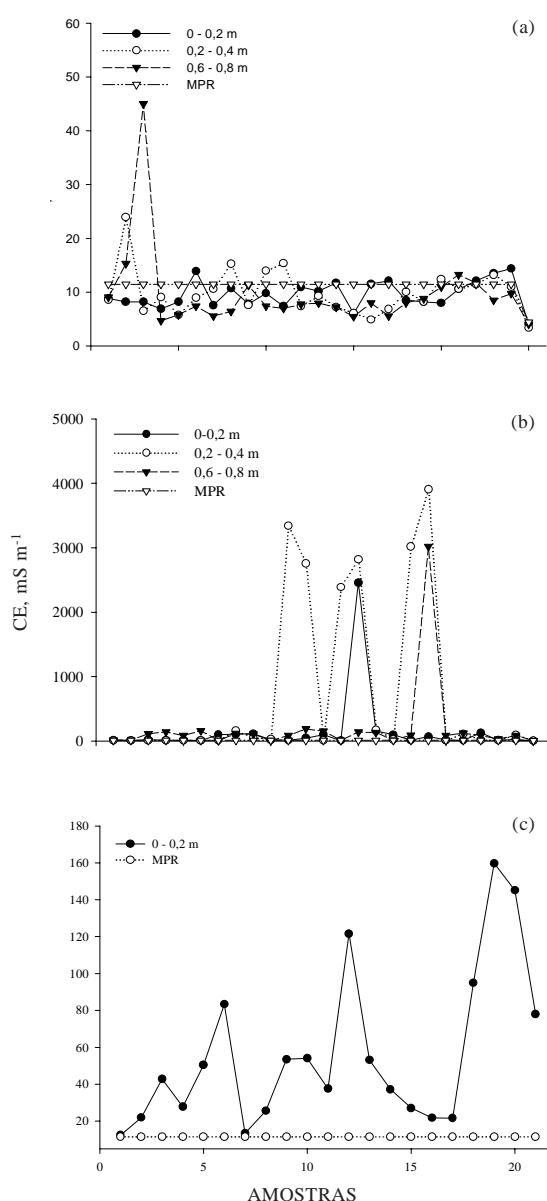


Figura 2. Valores de condutividade elétrica - CE nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m, para as minas: Juliana (a) e do Apertado (b), profundidade de 0-0,2 m para mina Rio do Meio (c) e para o perfil representativo do solo pré-mineração (MPR) que representam médias de valores na profundidade de 0-0,8 m.

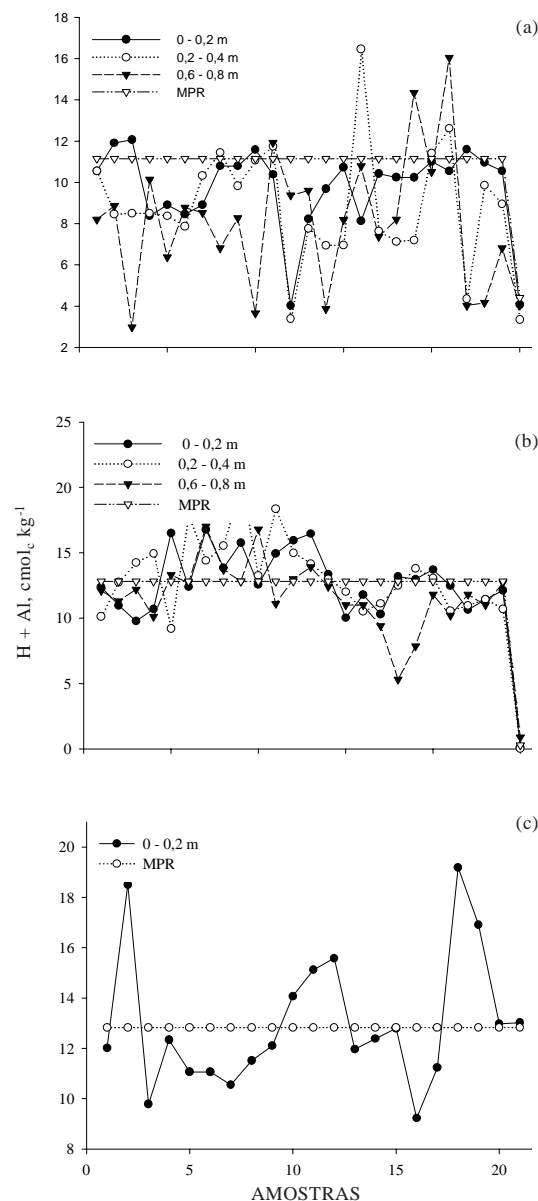


Figura 3. Teores de H + Al nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m, para as minas: Juliana (a) e do Apertado (b), profundidade de 0-0,2 m para mina Rio do Meio (c) e para o perfil representativo do solo pré-mineração (MPR) que representam médias de valores na profundidade de 0-0,8 m.

As concentrações médias de Ca nos materiais dos solos construídos das MJ e MA, coletadas na profundidade de 0-0,2 m (Quadro 2), foram superiores às encontradas nos horizontes dos respectivos perfis de solo pré-mineração (Quadro 1). Considerando todas as profundidades coletadas, os valores de máximo e mínimo foram de 4,66 e $< 0,01 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, na camada de 0,2-0,4 m da MJ e de 5,99 e $0,02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, na camada de 0-0,2 m para a MA, responsáveis pelo alto coeficiente de variação calculado para essa propriedade. Já para as amostras coletadas na profundidade de 0-0,2 m da MRM, os teores de Ca foram baixos, com média de 0,06 e um máximo de $0,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

A variação dos teores de Ca nos vários pontos coletados nas três áreas é mais bem visualizada na figura 4 (a, b, c), onde estão também os teores médios obtidos para os horizontes dos respectivos perfis representativos das condições anteriores à mineração. Na MJ, os maiores teores médios de Ca podem ser justificados pelos mesmos motivos pelos quais as quantidades de Al foram menores no solo construído do que no solo do perfil representativo; na MA, a mistura do regolito com fragmentos de rocha nas várias camadas pode ter contribuído para o aumento localizado nos teores de Ca, advindo da dissolução de minerais com esse elemento. Já na MRM, o longo período de exposição dos resíduos de carvão na superfície favoreceu a oxidação da pirita e a lixiviação do Ca acompanhado do ânion sulfato. Este processo de lixiviação de cátions acompanhado do sulfato ácido, segundo Breemen (1982) não ocorreria apenas com o Ca, mas também com o Mg e o Na.

As quantidades médias de Mg no solo construído da área da MA, nas três profundidades coletadas, foram superiores (Quadros 2, 3 e 4) às encontradas nos horizontes do perfil de solo pré-mineração (Quadro 1), o que poderia indicar uma possível intemperização de minerais que contenham Mg e que sejam instáveis em condições de pH baixo, mas que ainda não foram lixiviados graças à construção recente dessa área. Tais resultados foram semelhantes aos encontrados por Singh et al. (1982) em solos construídos na Virgínia (USA), os quais atribuíram o aumento nos teores desse elemento ao intemperismo de biotitas, que seriam instáveis na presença de ácidos livres. Na MRM, os teores de Mg nas amostras de solo foram muito baixos, confirmando que a lixiviação desse elemento foi intensa, assim como ocorrido para o Ca, devido ao tempo mais longo de construção dessa área.

Os teores médios de K nos solos construídos das áreas da MJ e da MA, em todas as profundidades coletadas, foram baixos (Quadros 2, 3 e 4), sendo similares aos encontrados nos perfis de solo pré-mineração correspondentes (Quadro 1). Já na MRM, os teores foram bastante inferiores aos encontrados nos perfis de solo pré-mineração. Pitchel et al. (1994) afirmaram que os solos de áreas de mineração

tendem a ser deficientes em K, Ca e Mg, graças aos processos de intemperização de minerais e de lixiviação, dentre outros. Segundo Barnhisel et al. (1982), a eventual precipitação de K na forma de jarosita também pode gerar problemas no suprimento de K para as plantas.

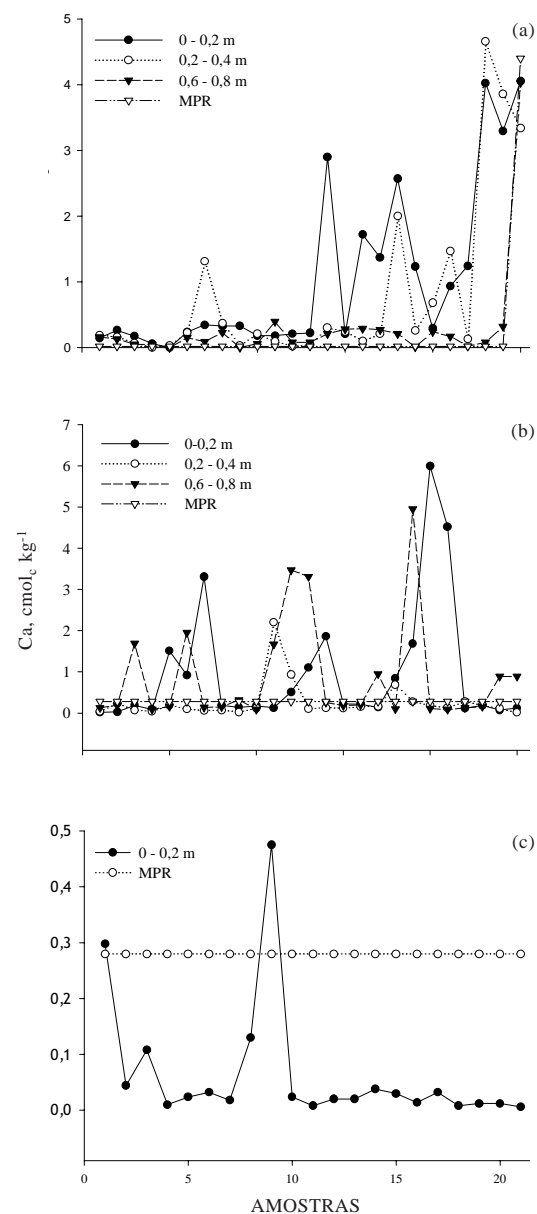


Figura 4. Teores de Ca nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m, para as minas: Juliana (a) e do Apertado (b), profundidade de 0-0,2 m para mina Rio do Meio (c) e para o perfil representativo do solo pré-mineração (MPR) que representam médias de valores na profundidade de 0-0,8 m.

Os teores médios de Cd, Ni, Pb, Cu e Zn na camada de 0-0,2 m das três áreas construídas (Quadro 5) ficaram abaixo dos teores mundialmente propostos, a saber, em mg kg⁻¹: Cd 0,5, Cu 30, Ni 50, Pb 35 e Zn 90 (Sparks, 1995). Segundo Kabata-Pendias & Pendias (1985), a concentração máxima aceitável de elementos traços em solos agrícolas é de 3 mg kg⁻¹ para Cd, de 100 para Cu, de 100 para Pb e de 300 para Zn. Os teores médios de Mn nas três áreas construídas (Quadro 5) estão abaixo do teor mundialmente aceitável de 500 mg kg⁻¹ (Sparks, 1995). Os teores médios de Mn nas três áreas construídas estão próximos ou acima dos constatados nos horizontes superficiais dos perfis pré-mineração correspondentes, com exceção da área construída da MA, que foram cerca de nove vezes maiores do que o do perfil correspondente.

O teor médio de argila no solo da área MJ na profundidade de 0-0,2 m esteve em média próximo ao encontrado nos horizontes B1, B2, B3 e BC do perfil pré-mineração (em torno de 40 dag kg⁻¹), sendo pequena a amplitude dos valores, máximo e mínimo. Nas profundidades de 0,2-0,4 e de 0,6-0,8 m, mesmo tendo a média ficado em torno de 39 e 33 dag kg⁻¹, respectivamente, a amplitude dos valores foi bastante larga, indicando grande variação nos teores de argila entre os pontos amostrados (Quadros 2, 3 e 4). Para a MA, os teores médios de argila nas três profundidades foram semelhantes aos encontrados nos horizontes BC2 e C do perfil pré-mineração (Quadro 1). Não foram observados nessa área valores tão discrepantes de máximo e mínimo como os ocorridos nas camadas mais profundas da MJ, decorrente da mistura de materiais durante a construção do solo. Os teores de argila para a MRM variaram de 23 a 10 dag kg⁻¹, com média de 18 dag kg⁻¹, muito abaixo, portanto, dos valores constatados no perfil pré-mineração. Esse baixo teor de argila resultou do modo inadequado de construção dessa área, onde grande parte do solum e do regolito devem ter sido perdidos, e a construção topográfica foi feita com a utilização dos fragmentos do arenito Barro Branco em mistura com camadas siltosas e resíduos do carvão.

Mineralogia dos solos pré-mineração e dos solos construídos

A mineralogia da fração argila para horizontes selecionados dos dois perfis de solo pré-mineração, conforme exemplo indicado na figura 5a para o perfil representativo das MA e MRM, foi composta predominantemente por caulinita (reflexos a 0,72 e 0,36 nm), seguida por argilominerais 2:1 do grupo da vermiculita (1,38 nm) e illita (1,0 nm) e, em pequenas proporções, por quartzo (0,33 nm) e interestratificados illita-vermiculita ("saia" entre 1,38 e 0,99 nm). Tal mineralogia foi compatível com os valores relativamente altos de CTC da fração argila anteriormente referidos, mas a baixa soma e saturação por bases e a alta saturação por Al constatada no solo sugerem que os argilominerais 2:1 apresentam forte intercalação com polímeros de hidróxi-Al entrecamadas, reduzindo a CTC em relação aos seus correspondentes puros (Barnhisel & Bertsch, 1989).

Nas três áreas construídas, foram selecionados, para cada profundidade, difratogramas que representassem o padrão mineralógico mais comum dentre todas as amostras analisadas, lembrando que estas foram coletadas nos pontos onde o pH foi muito baixo ou a condutividade elétrica foi muito alta. Nos difratogramas para diferentes profundidades da MA (Figura 5b), foi observado que a fração argila é composta por caulinita (reflexos em 0,715 e 0,358 nm), componente dominante, seguida de vermiculita e illita (reflexos em torno de 1,4 e 1,0 nm respectivamente), interestratificados mica-vermiculita (banda entre 1,4 e 1,0 nm) e quartzo (reflexo a 0,33 nm). Tal mineralogia foi similar à observada nos perfis representativos (PR) das condições de pré-mineração (Figura 5a). Observaram-se, entretanto, diferenças peculiares em relação a esses perfis.

No solo construído da área MJ (dados não mostrados) e da área MA (Figura 5b), por exemplo, a proporção de filossilicatos na camada 2:1 é maior do que nos PR correspondentes, havendo também maior expressão do reflexo a 1,0 nm, indicativo de

Quadro 5. Teores médios de Cd, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn para os horizontes superficiais (0-0,2 m) dos perfis representativos das condições pré-mineração e para a camada de 0-0,2 m dos solos construídos das três minas

Local	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹					
Perfil representativo MJ	0,14	0,16	1,42	0,72	0,22	0,18
Perfil representativo MA e MRM	0,17	< 0,01	7,07	0,94	1,14	0,92
Mina Juliana	0,08	0,98	3,35	0,10	2,24	1,46
Mina do Apertado	0,11	0,98	69,8	0,84	1,06	2,71
Mina Rio do Meio	0,15	4,04	3,31	0,89	0,83	0,79

ilita, do que dos de 1,4 nm, bem como maior evidência da participação de interestratificados. Esse comportamento poderia indicar maior contribuição de micas nos solos construídos, as quais no ambiente atual, agora mais acidificado pela oxidação da pirita, estariam se transformando em vermiculitas ou em interestratificados mica-vermiculita, pela perda gradativa de potássio das entrecamadas. Isto foi mais evidente no material de solo da área MRM,

onde a média do reflexo se situou em torno de 1,2 nm, característico de interestratificados regulares do tipo mica-vermiculita (Sawney, 1989).

Há que ser considerada, portanto, a hipótese de que, durante o processo de construção das áreas, a mistura dos fragmentos de rocha do subsolo poderia ter contribuído para o aumento do conteúdo de micas nas camadas superficiais. A jarosita e a natrojarosita, sulfatos de ferro e potássio comumente constatados em solos construídos contaminados por pirita (Barnhisel et al., 1982; Kämpf et al., 1997), não foram identificadas nas amostras analisadas. Tratando de materiais com alta solubilidade (Kämpf et al., 1997), provavelmente foram dissolvidos durante os procedimentos de concentração da fração argila.

Variabilidade espacial

Das características químicas avaliadas para as três áreas, apenas o Al trocável e H + Al (Figura 6, Quadro 6) apresentaram modelo de dependência espacial definido, exceção feita para o Al no material de solo da área Mina do Apertado (Figura 6), onde não se constatou dependência entre os pontos amostrados. O alcance da dependência espacial para os dois atributos, nas três áreas construídas, variou de 50 a 60 m, representando tal alcance a distância em que os pontos amostrais estão espacialmente correlacionados entre si (Davis, 1986). Portanto, o alcance é uma medida importante para planejamento e avaliação experimental, já que pode auxiliar na definição de procedimentos de amostragem, do tamanho e forma da parcela e do bloco (Webster, 1985; Vieira et al., 1998).

O valor do efeito pepita representa uma variância aleatória causada por erros de medida ou por uma microvariabilidade não detectada pela distância de amostragem utilizada e a variabilidade devida ao manejo da área amostrada (Souza, 1992). No entanto,

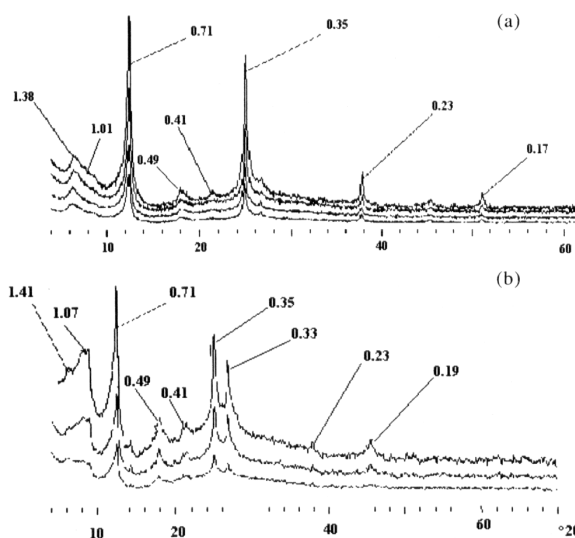


Figura 5. Difrátogramas de raios-X da fração argila de amostras dos horizontes A2, B2, BC2 e C (da base da figura para o topo) do perfil representativo das condições pré-mineração das minas do Apertado e Rio do Meio (a) e para amostras de solo da Mina do Apertado, nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m (da base da figura para o topo) (b). Valor d em nanômetros.

Quadro 6. Modelos e parâmetros dos semivariogramas para Al trocável, H + Al e teor de argila, para os pontos coletados nas três áreas de solo construído

Estatística	Modelo	Alcance (a)	Patamar ($C_0 + C_1$)	Efeito pepita (C_0)
Mina Juliana				
Al	Esférico	50	0,035	0,015
H + Al	Esférico	60	3,6	0,5
Argila	Gaussiano	60	37	3,0
Mina do Apertado				
Al	Aleatório	-	-	-
H + Al	Esférico	60	5	1,7
Argila	Esférico	70	33	2,0
Mina Rio do Meio				
Al	Esférico	55	2,5	0,5
H + Al	Esférico	60	8,0	3,0
Argila	Aleatório	-	-	-

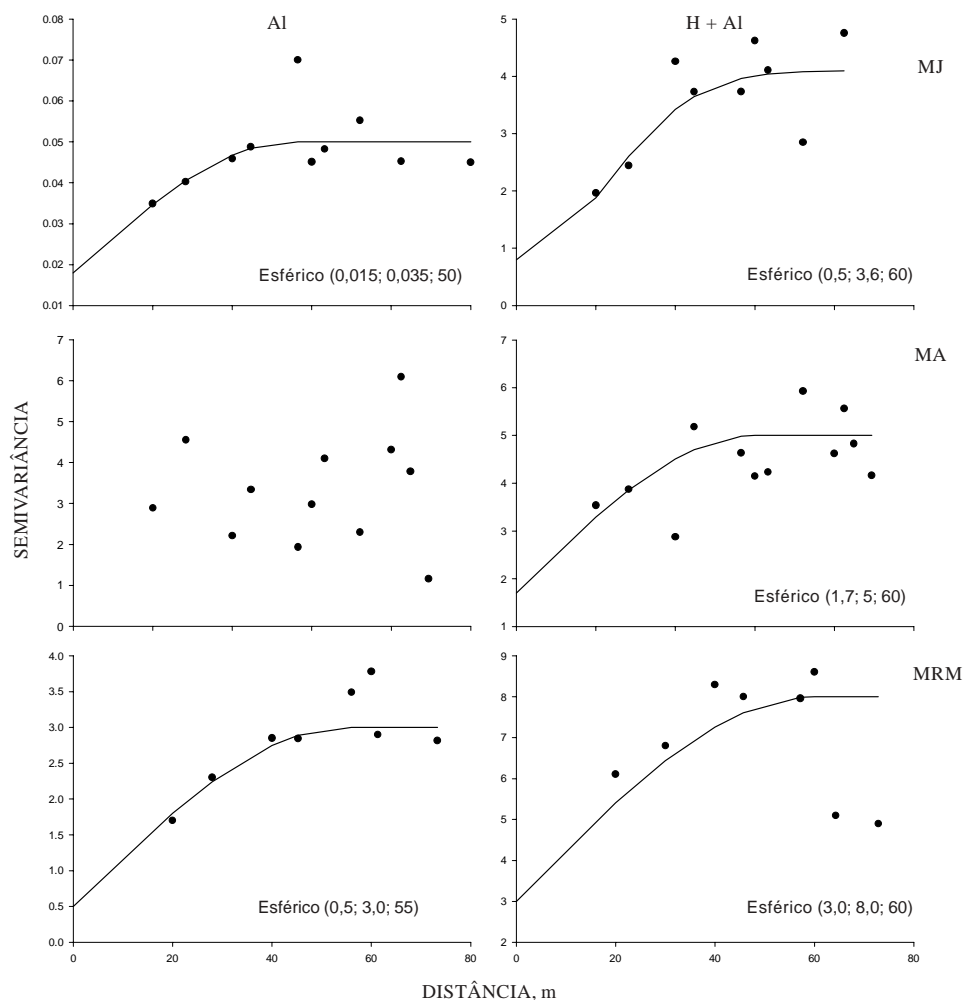


Figura 6. Semivariogramas para Al e H + Al no solo construído nas três minas. A legenda do gráfico indica o modelo ajustado e entre parênteses os valores de C0, C0 + C1 e alcance.

é impossível quantificar a contribuição individual dos erros de medições ou da variabilidade (Arzeno, 1990). O efeito pepita pode ser expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Salviano et al., 1998). Para analisar o grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita ≤ 25 % do patamar, de dependência espacial moderada, quando o efeito pepita está entre 25 e 75 %, e de fraca, quando o efeito pepita é > 75 %.

A análise do efeito pepita para H + Al mostrou que seus semivariogramas são de dependência espacial forte, para MJ (14 %), e moderada, para MA (34 %) e para MRM (38 %), enquanto, para Al, os seus semivariogramas são de dependência espacial forte, para MRM (20 %), e moderada, para MJ

(43 %). Segundo Cambardella et al. (1994), uma variável, que tem fraca dependência espacial, pode apresentar melhor estrutura espacial com a adoção de um espaçamento diferente de amostragem.

A variável teor de argila apresentou dependência espacial forte para MJ (8 %) e MA (6 %), sendo o alcance espacial de 60 m (Quadro 6), para o solo construído da área MJ, e de 70 m, para a área MA. O solo construído da área MRM não apresentou dependência espacial para teor de argila, o que poderia estar ligado ao modo de disposição dos materiais, já que nesta área não houve construção do solo propriamente dito após a mineração, graças à perda da maior parte do sólido e do regolito. Assim, nessa área, a construção topográfica foi realizada com fragmentos do arenito Barro Branco em mistura com materiais siltsos e resíduos do carvão. De acordo com Schafer et al. (1980), as propriedades de solos após mineração refletem o modo de deposição dos resíduos.

A ausência de modelo de semivariogramas para as variáveis pH, CE, Ca, Mg, K e Na foi atribuída à perturbação desordenada que o sistema de mineração a céu aberto proporciona, ou ainda, à presença de microvariabilidade, que a distância de amostragem não conseguiu captar. Maçaneiro (2001) também não encontrou modelo definido para semivariogramas para as mesmas variáveis em solo construído pós-mineração, mesmo quando amostrado a cada 0,5 m.

Para Schafer et al. (1980), os solos reconstruídos pós-mineração são extremamente variáveis na escala de 0-10 m, e este alto grau de variação em pequenas escalas, em relação às encontradas para o solo natural, possivelmente se deva à mistura ao acaso de materiais de várias partes da coluna geológica.

CONCLUSÕES

1. Em todas as áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto avaliadas em Lauro Müller, foram detectadas deficiências no processo de construção, seja pela disposição inadequada dos materiais e resíduos da mineração utilizados, seja pelos impactos negativos ocorridos nas propriedades físicas e químicas dos solos construídos e, ou, nas áreas adjacentes.

2. O modo de construção do solo que resultou em maior uniformidade das características químicas e do teor de argila entre os pontos amostrados, bem como em melhores condições para o estabelecimento de espécies vegetais, foi o da Mina Juliana, onde o plano de reabilitação da área minerada apresentado pela mineradora ao DNPM parece ter sido seguido com mais rigor.

LITERATURA CITADA

- ARZENO, J.L. Avaliação física de diferentes manejos de solo em Latosolo Roxo-Distrófico. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1990. 259p. (Tese de Doutorado)
- BARNHISEL, R.I. & BERTSCH, P.M. Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite and smectite. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, Soil Society of America, 1989. p.729-788. (SSSA Book Series, 1)
- BARNHISEL, R.I.; POWELL, J.L.; AKIN, G.W. & EBELHAR, M.W. Characteristics and reclamation of acid sulfate mine spoil. In: KITTRICK, J.A.; FANNING, D.S. & HOSSNER, L.R., eds. Acid sulfate weathering. Madison, Soil Science Society America, 1982. p.37-56.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional da Produção Mineral. Perfil analítico do carvão. 2.ed. Porto Alegre, 1987. 140p. (Boletim, 6)
- BREEMEN, N. van. Genesis, morphology, and classification of acid sulfate soil in coast plains. In: KITTRICK, J.A.; FANNING, D.S. & HOSSNER, L.R., eds. Acid sulfate weathering. Madison, Soil Science Society America, 1982. p.37-56.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1501-1511, 1994.
- CASTRO, J.P.C. Reabilitação de áreas degradadas – aspectos legais. In: DIAS, L.E. & MELLO, J.W.V., eds. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, Folha de Viçosa, 1998. p.9-15. 251p.
- DANIELS, W.L. Manipulating the chemical properties of soil and mining wastes. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.869-897.
- DAVIS, J.C. Statistics and data analysis in geology. 2.ed. New York, John Wiley, 1986. 646p.
- DIXON, J.B.; HOSSNER, L.R.; SEKAYI, A.L. & EGASHIRA, K. Mineralogical properties of lignite overburden as they relate to mine spoil reclamation. In: KITTRICK, J.A.; FANNING, D.S. & HOSSNER, L.R., eds. Acid sulfate weathering. Madison, Soil Science Society America, 1982. p.169-192.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo, 1979 (Não paginado)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p.
- GOMES, P.C.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M.; COSTA, L.M. & MENDONÇA, E.S. Extração fracionada de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 21:543-551, 1997.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis. Advanced course. 1965. 981p. Não publicado.
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. Trace elements in soil and plants. Boca Raton, CRC Press, 1985. 315p.
- KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P. & GIASSON, E. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na Bacia Carbonífera do Baixo Jacuí. R. Bras. Ci. Solo, 21:79-88, 1997.
- KARATHANASIS, A.D.; EVANGELOU, V.P. & THOMPSON, Y.L. Aluminum and iron equilibria in soil solutions and surface waters of acid mine watersheds. J. Environ. Qual., 17:534-543, 1988.
- MAÇANEIRO, K.C. Efeito da calagem e da adubação orgânica no estabelecimento de gramíneas em áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. Universidade do estado de Santa Catarina. 2001. 66p. (Tese de Mestrado)

- MALLANTS, D.; MOHANTY, P.; JACQUES, D. & FEYEN, J. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci.*, 16:67-180, 1996.
- MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION - MMC. Interim report for the feasibility study on recuperation of mined out areas in south region of Santa Catarina in the Federative Republic Brazil. Japan International Cooperation Agency (JICA), Criciúma, Fundação de Meio Ambiente-FATMA, 1997. 248p.
- MOSES, C.O.; NORDSTROM, D.K.; HERMAN, J.S. & MILLS, A.L. Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 51:1561-1571, 1987.
- NORDSTROM, D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron mineral. In: KITTRICK, J.A.; FANNING, D.S. & HOSSNER, L.R., eds. *Acid sulfate weathering*. Madison, Soil Science Society America, 1982. p.37-56.
- PINTO, L.F.S. Potencial de acidificação e de neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997. 186p. (Tese de Doutorado)
- PITCHEL, J.R.; DICK, W.A. & SUTTON, P. Comparison amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands. *J. Environ. Qual.*, 23:766-772, 1994.
- PUGH, C.E.; HOSSNER, L.R. & DIXON, J.B. Pyrite and marcasite surface area as influenced by morphology and particle diameter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:979-982, 1981.
- SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R. & SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:115-122, 1998.
- SANCHEZ, J.C.D. & FORMOSO, M.L.L. Utilização do carvão e meio ambiente. Porto Alegre: CIENTEC, 1990. 34p.
- SANTA CATARINA. SECRETARIA DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, DAS MINAS E ENERGIA. Diagnóstico do carvão mineral catarinense. Florianópolis, 1990. 77p.
- SAWNEY, B.L. Interstratification in layer silicates. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. Madison, Soil Society of America, 1989. p.789-828. (SSSA Book Series, 1)
- SCHAFER, W.M.; NIELSEN, G.A. & NETTLETON, W.D. Minesoil genesis and morphology in a spoil chronosequence in Montana. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:802-807, 1980.
- SINGH R.N.; GRUBE Jr., W.E.; SMITH, R.M. & KEEFER, R.F. Relation of pyritic sandstone weathering to soil and minesoil properties. In: KITTRICK, J.A.; FANNING, D.S. & HOSSNER, L.R., eds. *Acid sulfate weathering*. Madison, Soil Science Society America, 1982. p.193-208.
- SOUZA, L.S. Variabilidade do solo em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 162p. (Tese de Doutorado)
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade dos teores de nutrientes na folha, entre plantas, em um pomar cítrico. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:373-377, 1997.
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:77-86, 1998.
- SPARKS, D.L. *Environmental soil chemistry*. London, Academic Press, 1995. 265p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C. & BISSANI, C.A. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. ; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*, 1. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-53.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, 3:2-56, 1985.
- WHITTIG, L.D. & ALLARDICE, W.R. X ray diffraction techniques. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. Madison, Soil Science Society of America, 1986. p.331-362.

