

Condição física e desenvolvimento radicular de gramíneas em solo construído após mineração de carvão

Lizete Stumpf⁽¹⁾, Eloy Antonio Pauletto⁽²⁾, Luiz Fernando Spinelli Pinto⁽²⁾, Gabriel Furtado Garcia⁽²⁾, Jordano Vaz Ambus⁽²⁾, Tiago Stumpf da Silva⁽²⁾, Marília Alves Brito Pinto⁽²⁾ e Ivana Kruger Tuchtenhagen⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal do Rio Grande, Campus São Lourenço do Sul, Rua Marechal Floriano Peixoto, 2236, Centro, CEP 96170-000, São Lourenço do Sul, RS, Brasil. E-mail: zete.stumpf@gmail.com ⁽²⁾Universidade Federal de Pelotas, Rua Campus Universitário Capão do Leão, s/nº, CEP 96900-010 Pelotas, RS, Brasil. E-mail: pauletto_sul@yahoo.com.br, lfspin@uol.com.br, gabrielgarciag2@hotmail.com, jv.ambus@gmail.com, tiago.stumpf@hotmail.com, ma.agro@gmail.com, ivanatuchtenhagen@gmail.com

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a condição física e a potencialidade de uso agrícola de um solo construído após mineração com carvão, além do desenvolvimento radicular de gramíneas tropicais nesse solo, tendo-se considerado diferentes períodos de revegetação. O solo foi construído no início de 2003, e o experimento instalado em novembro/dezembro de 2007. A condição física do solo construído foi avaliada nas parcelas ocupadas por gramíneas perenes, como *Urochloa humidicola*, *Panicum maximum* e *U. brizantha*. Em julho de 2012, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada para a determinação dos atributos físico-químicos, nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m. Monólitos de solo foram coletados para caracterização do sistema radicular das diferentes gramíneas. Após 58 meses de revegetação, a condição física do solo construído ainda é inadequada ao uso agrícola que envolva práticas mais intensivas de manejo de solo. Entre as camadas avaliadas, somente a de 0,00–0,10 m fornece condições para que o solo cumpra suas funções no ecossistema. *Urochloa brizantha* mostra-se mais promissora para a recuperação da estrutura do solo na camada de 0,00–0,10 m, e a densidade radicular foi o atributo mais sensível para a diferenciação do desenvolvimento potencial das diferentes espécies nesta camada.

Termos para indexação: *Panicum maximum*, *Urochloa brizantha*, *Urochloa humidicola*, recuperação de áreas degradadas, revegetação, uso agrícola potencial.

Physical condition and root development of grasses in a constructed minesoil after coal mining

Abstract –The objective of this work was to evaluate the root development of the physical condition and the potential of agricultural use of a constructed minesoil after coal mining, besides the root development of tropical grasses in this soil, considering different revegetation periods. The soil was constructed in early 2003, and the experiment was installed in November/December 2007. Soil physical condition was evaluated in plots vegetated with perennial grasses such as *Urochloa humidicola*, *Panicum maximum*, and *U. brizantha*. In July 2012, disturbed and undisturbed soil samples were taken for determining physical and chemical attributes in the 0.00–0.10, 0.10–0.20, and 0.20–0.30-m soil layers. Soil monoliths were collected for characterizing the root system. After 58 months of revegetation, the physical condition of the constructed minesoil is still inadequate to an agricultural use that requires intensive soil management. Among the evaluated layers, only the 0.00–0.10-m layer provides conditions for the soil to function properly in the ecosystem. *Urochloa brizantha* was more promising for the recovery of soil structure in the 0.00–0.10-m soil layer, and root density was the most sensitive attribute to distinguish the potential development of the different species in this layer.

Index terms: *Panicum maximum*, *Urochloa brizantha*, *Urochloa humidicola*, land reclamation, revegetation, potential agricultural use.

Introdução

A maior fonte de energia para produção de eletricidade no mundo advém do carvão mineral, que responde por 41% da produção total (WEC, 2013). O Brasil possui uma das maiores reservas de carvão mineral da América Latina (Roadmap..., 2012) e

seu uso vem reconquistando espaço no mercado de energia em razão da entrada de termoelétricas no sistema interligado nacional. O Rio Grande do Sul apresenta em torno de 28,56 bilhões de toneladas de reservas de carvão mineral, e somente a Jazida de Candiota detém 38% de todo o carvão nacional (CPRM/SGB, 2014).

Se, por um lado, o uso do carvão garante a segurança energética nos estados do Sul do País, por outro a mineração a céu aberto deste recurso mineral provoca impacto negativo na paisagem, ao eliminar a vegetação e alterar permanentemente a topografia, a geologia e o regime hidrológico da área, mediante a movimentação e remoção de grandes volumes de solo e de rochas (Mukhopadhyay et al., 2013; Zhao et al., 2013; Zhang et al., 2015). Além do impacto visual, há problemas associados à drenagem ácida de áreas adjacentes (Daniels & Zipper, 2010) e à erosão e compactação do solo construído (Sheoran et al., 2010; Krümmelbein & Raab, 2012). Além disso, perdas de carbono ocorrem durante a remoção, armazenamento e recolocação do solo na área minerada (Anderson et al., 2008; Wick et al., 2009; Maharana & Patel, 2013).

A implantação de cobertura vegetal sobre superfícies mineradas é uma medida necessária para a recuperação das áreas degradadas (Corrêa & Bento, 2010), e é adotada no Brasil em áreas de mineração de ferro (Silva et al., 2006), em áreas de empréstimo (Alves et al., 2007; Bonini & Alves, 2011), em áreas de mineração de cassiterita (Longo et al., 2011) e em áreas de mineração de carvão (Lunardi Neto et al., 2008; Oliveira Filho et al., 2014; Stumpf et al., 2014c).

A maioria dos trabalhos sobre recuperação de áreas mineradas de carvão no Brasil concentrou-se no problema da geração da drenagem ácida de mina (Quiñones et al., 2008; Campaner & Luiz-Silva, 2009; Costa & Zocche, 2009; Inda et al., 2010; Moura, 2014), que acidifica o meio (Pinto & Kampf, 2002) e libera grandes concentrações de Fe, Mn e Al no solo e nas águas de drenagem (Chen et al., 2013), com implicações negativas no desenvolvimento da vegetação e na recuperação da área degradada (Inda et al., 2010). Entretanto, o alto grau de compactação do solo construído resultante da utilização de máquinas pesadas no processo de extração de carvão e recomposição topográfica da área minerada também é considerado um sério problema para a recuperação de áreas degradadas por mineração, no Brasil e no mundo (Wick et al., 2009; Sheoran et al., 2010; Borůvka et al., 2012; Stumpf et al., 2014c).

Krümmelbein & Raab (2012) observaram que as propriedades físicas de um solo construído na Alemanha ainda eram muito variáveis após quatro anos de revegetação. No Brasil, Stumpf et al. (2014a, 2014c) observaram condições físicas inadequadas (elevada densidade do solo, baixa macroporosidade

e presença de agregados formados por compressão) em solos construídos revegetados com 2 e 6,5 anos. Portanto, o simples aspecto visual da vegetação, na área considerada recuperada após a mineração, pode não expressar uma síntese do restabelecimento das funções do solo no ambiente; ou seja: é necessário que se monitore as condições gerais do solo (física, química e biológica) ao longo dos anos para se chegar a uma indicação mais segura (Almeida & Sánchez, 2005).

Nos Estados Unidos, desde 1977, a legislação requer que a recuperação de solos minerados ocorra dentro de um período razoável de tempo, e que sua produtividade seja igual ou superior ao período anterior à mineração (Dunker & Barnhisel, 2000). No Brasil, o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (Brasil, 1989) prevê o retorno do solo minerado a uma forma com potencial de uso sustentável, não necessariamente agrícola, de acordo com um plano preestabelecido (Sánchez, 2010). No caso da mina de Candiota, RS, o Plano de Controle Ambiental que contempla o Plano de Recuperação das áreas e seus usos futuros atribui que, depois de recuperadas, as áreas mineradas sejam destinadas à formação de pastagens, as quais darão suporte às atividades ligadas à pecuária extensiva, tão logo apresentem condições para tal (Castro, 2012).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a condição física e a potencialidade de uso agrícola de solo construído após mineração com carvão, além do desenvolvimento radicular de gramíneas nesse solo, tendo-se considerado diferentes períodos de revegetação.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em uma área de mineração de carvão, sob concessão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), localizada em Candiota, RS, com as seguintes coordenadas geográficas: 31°33'56"S e 53°43'30"W.

De acordo com a Companhia Riograndense de Mineração (2014), a mineração é realizada a céu aberto na forma de tiras, envolvendo as seguintes etapas: a) remoção dos horizontes A, B e/ou C do solo original, os quais são destinados para cobertura final de uma área minerada topograficamente aplainada; b) remoção das rochas por meio de escavadeira de alta capacidade; c) extração dos bancos de carvão; d) na cava aberta pela extração do carvão na tira anterior, depositam-se os estéreis (mistura de rochas e carvão não aproveitados), que são aplainados por tratores

de esteira para a recomposição topográfica da área; e) finalizando a recomposição do perfil do solo, deposita-se uma camada de solo (horizonte A e/ou B), retirada da frente de lavra do carvão, originando assim o “solo construído” (Stumpf et al., 2014c).

O processo de mineração e de recomposição ambiental é sequencial e concomitante, não se utilizando a armazenagem de solo. A finalização de todo o processo pode durar mais de um ano e a etapa final de deposição e espalhamento do solo depende das condições climáticas e da velocidade de avanço da lavra. Eventualmente, quando ocorre uma falta de sincronia no processo, pode ser utilizada uma parte do horizonte B para a cobertura superficial, como foi o caso ocorrido na área de estudo. A cor do solo (2,5YR 3,5/6) e a classe textural argilosa (Tabela 1) são compatíveis com o horizonte B do Argissolo Vermelho Eutrófico típico predominantemente encontrado na região.

Antes da instalação do experimento, a área estava muito compactada em razão da circulação de máquinas durante a construção do solo (caminhões carregados com aproximadamente 20 toneladas de terra vegetal e tratores de esteira metálica do modelo D8T da Caterpillar com peso de 38 toneladas). Por essa razão, o solo construído foi escarificado com patola a uma profundidade aproximada de 0,15 m, seguido por calagem correspondente a 10,4 Mg ha⁻¹ de calcário com PRNT de 100% e uma adubação de 900 kg ha⁻¹ da fórmula N-P₂O₅-K₂O 5-20-20, com base em resultados obtidos pela análise de solo. Adubações de 250 kg ha⁻¹ da fórmula N-P₂O₅-K₂O 5-30-15 e 250 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio também foram realizadas anualmente em todas as parcelas da área experimental.

O experimento foi instalado entre setembro/outubro de 2007 em parcelas de 20 m², em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. A condição física do solo construído foi avaliada nas parcelas ocupadas por gramíneas perenes de verão em cultivo solteiro como *Urochloa humidicola*, *Panicum maximum* e *U. brizantha*. No intuito de avaliar as mudanças decorrentes da construção do solo e o tempo aproximado de recuperação dos atributos do novo perfil formado, foi utilizado como testemunha um solo construído sem cobertura vegetal, localizada em área adjacente ao experimento.

Em julho de 2012 foram coletadas 48 amostras com estrutura não preservada nas camadas de 0,00–0,10,

0,10–0,20 e 0,20–0,30 m para a caracterização química do solo construído e o teor de carbono orgânico (Tedesco et al., 1995). Também foram coletados 96 amostras com estrutura preservada nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m em cilindros de aço (0,050 m de altura e 0,047 m de diâmetro) para a determinação da densidade do solo (Ds), da porosidade total (PT), da macroporosidade (Ma) e da microporosidade (Mi), segundo Donagema et al. (2011). Foram obtidos dados de resistência do solo à penetração (RP) em três pontos amostrais por parcela, totalizando 48 pontos amostrais. A resistência à penetração no solo foi determinada até a profundidade de 0,30 m utilizando o método do penetrômetro de impacto (Stolf, 1991). Os resultados foram apresentados em valores médios para as camadas avaliadas.

Com a finalidade de avaliar o desenvolvimento do sistema radicular das diferentes espécies vegetais e sua relação com a condição física atual do solo construído, realizou-se a amostragem de raízes em julho de 2012, através do método do monólito (Böhm, 1979), com o auxílio de placas com pregos (0,40 m de comprimento × 0,30 m de altura × 0,035 m de largura). Foi retirada uma placa por parcela totalizando 12 placas de pregos (quatro repetições por tratamento). Após a coleta dos monólitos, estes foram embalados com filme plástico e encaminhados ao laboratório para procedimento de lavagem e separação das raízes. A lavagem consistiu em saturar a placa por 24h em solução de NaOH 0,2 mol L⁻¹ para dispersar o solo e facilitar a lavagem das raízes e, após este período, estas foram lavadas com água corrente ou jatos leves de água para retirada do solo da placa. Os pregos permitiram uma adequada fixação das raízes no momento da lavagem, o que também foi obtido com o uso de uma malha de metal no fundo e na frente da placa. Finalizado o processo de lavagem, as raízes distribuídas no monólito foram separadas por camadas, cortadas e lavadas em uma peneira com abertura de 1mm, armazenadas em sacos plásticos e refrigeradas à temperatura de 2°C. Posteriormente, as raízes foram digitalizadas em scanner HP Scanjet 3570C para determinação de volume e comprimento radicular, através do programa Safira. Após o escaneamento, as raízes foram secadas em estufa a 65°C por um período de 72h, para obtenção da massa seca de raízes. Pela relação dos valores de massa seca de raízes e o volume de solo que estas ocupavam, obteve-se a densidade radicular de cada camada avaliada.

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas por meio do software Sigmaplot version 9.01 (Systat Software, Washington, EUA). Considerando o fato de o solo testemunha – solo construído sem cobertura vegetal – não fazer parte do delineamento experimental, neste tratamento não foram aplicados procedimentos estatísticos em relação aos demais tratamentos.

Resultados e Discussão

A calagem, realizada em 2003, ainda mostrou-se efetiva, principalmente até os 0,10 m de profundidade (Tabela 1), mesmo após 58 meses de revegetação (julho de 2012). De acordo com os valores de referência (VRef) apresentados pela Comissão de química e fertilidade de solos para o Estado do RS (Manual..., 2004), na camada de 0,00–0,10 m, os valores de pH estão acima do VRef para gramíneas perenes de verão ($\text{pH} > 5,5$), bem como os teores de Ca e Mg (respectivamente $> 4,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e $> 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), de K ($61\text{--}121 \text{ mg kg}^{-1}$) e a saturação por bases (V) ($> 80\%$). Em consonância com esses resultados, os valores de saturação por alumínio (m) estiveram muito baixos ($< 1\%$). Na camada de 0,10–0,20 m os valores de pH ficaram próximos ao VRef, os teores de Ca e Mg mostraram-se elevados, o teor de K foi considerado médio ($41\text{--}60 \text{ mg kg}^{-1}$), o V foi baixo ($45\text{--}64\%$) e o m, médio ($10,1\text{--}20\%$). Já a camada de 0,20–0,30 m apresentou baixo pH, baixa V e alto m, em comparação aos valores de VRef, o que evidencia a possível ocorrência de drenagem ácida de mina, devido à presença de estereis em algumas repetições dos monólitos de solo (Tabela 1).

Entre as espécies vegetais, a *Urochloa brizantha* apresentou a maior densidade radicular (DR), assim como maior volume radicular (VR) que *Panicum maximum*, na camada de 0,00–0,10 m (Tabela 2). Todavia, apesar do destaque dos atributos radiculares da *U. brizantha* na camada de 0,00–0,10 m, somente a resistência à penetração (RP) foi sensível a este resultado. Isto é, o solo sob seu cultivo apresentou uma RP de 1,28 MPa, enquanto as demais espécies apresentaram 1,77 e 2,31 MPa (Tabela 3).

A RP é um atributo importante para avaliar a qualidade física do solo por ser sensível às modificações no solo (Silva et al., 2014) e ter relações diretas com o crescimento radicular (Freddi et al., 2007). Na literatura são muitos os trabalhos que abordam o quão restritivo é o desenvolvimento radicular da maioria das culturas agrícolas, com solos acima de 2,0 MPa de RP (Reichert et al., 2009; Otto et al., 2011; Lima et al., 2013; Girardello et al., 2014). No presente estudo, os valores de RP abaixo da camada de 0,10 m oscilaram de 3,72 a 5,24 MPa (Tabela 3), o que indica forte restrição ao desenvolvimento radicular das espécies, em profundidade.

A profundidade de enraizamento é outro importante indicador de qualidade física do solo (Bottega et al., 2011) pois muitas vezes as espécies vegetais, mesmo quando estabelecidas em ambientes estressantes, podem apresentar a alta densidade de raízes na superfície do solo (Fontoura, 2014). Em solos agrícolas, este é um problema relatado com frequência, como, por exemplo, por Gonçalves et al. (2006), que observaram maior concentração de raízes de gramíneas (*Eleusine coracana* e *Pennisetum americanum*) próxima à superfície de um solo com textura muito argilosa,

Tabela 1. Caracterização física e química do solo construído nas camadas de 0,00–0,10 m, 0,10–0,20 m e 0,20–0,30 m após 58 meses de revegetação.

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	pH H ₂ O	Ca	Mg	H+Al	CTC	K (mg kg ⁻¹)	V (%)	m
	----- (g kg ⁻¹) -----										
	----- (cmol _c kg ⁻¹) -----										
	----- (%) -----										
Solo construído com cobertura vegetal											
0,00–0,10	336	211	453	6,37	5,63	3,23	1,64	10,95	155,4	84,64	0,72
0,10–0,20	318	204	478	5,02	4,05	2,54	4,25	11,05	59,78	63,39	17,18
0,20–0,30	259	274	467	4,03	2,73	2,00	8,02	12,92	38,8	42,00	40,85
Solo construído sem cobertura vegetal (testemunha)											
0,00–0,10	305	305	390	7,22	5,00	3,84	0,50	5,05	96,45	70,22	0,20
0,10–0,20	309	272	419	5,94	3,85	2,82	2,21	5,46	38,65	59,75	17,50
0,20–0,30	291	258	451	5,35	3,73	2,01	3,75	6,68	29,50	42,61	21,98

Tabela 2. Valores médios de densidade radicular, volume radicular e comprimento radicular de três gramíneas perenes nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m do solo construído, após 58 meses de revegetação⁽¹⁾.

Tratamentos	Densidade radicular (kg m ⁻³)	Volume radicular (m ³ m ⁻³)	Comprimento radicular (m m ⁻³)
Camada de 0,00–0,10 m			
<i>Urochloa humidicola</i>	5,96±1,80 ^b	0,018±0,006 ^{ab}	56.511±26.345 ^{ns}
<i>Panicum maximum</i>	3,89±2,23 ^b	0,009±0,006 ^b	41.622±18.791 ^{ns}
<i>Urochloa brizantha</i>	10,43±1,87 ^a	0,025±0,003 ^a	43.451±8.277 ^{ns}
Camada de 0,10–0,20 m			
<i>Urochloa humidicola</i>	2,56±0,85 ^{ns}	0,009±0,004 ^a	5.750±8.813 ^a
<i>Panicum maximum</i>	1,39±0,13 ^{ns}	0,003±0,001 ^b	18.329±3.102 ^{ab}
<i>Urochloa brizantha</i>	1,73±0,84 ^{ns}	0,004±0,001 ^b	8.357±1.044 ^b
Camada de 0,20–0,30 m			
<i>Urochloa humidicola</i>	0,51±0,27 ^{ns}	0,002±0,001 ^{ns}	5.750±1.807 ^{ns}
<i>Panicum maximum</i>	0,57±0,22 ^{ns}	0,001±0,001 ^{ns}	9.523±8.745 ^{ns}
<i>Urochloa brizantha</i>	0,75±0,36 ^{ns}	0,002±0,001 ^{ns}	5.424±2.746 ^{ns}

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

devido à compactação da camada subsuperficial. Nunes et al. (2015) observaram maior concentração de raízes de milho (*Zea mays*) (63,8%) na camada 0,00–0,07 m, decorrente da degradação física em subsuperfície de um Latossolo sob plantio direto.

Em geral as gramíneas apresentam 44% de massa radicular concentrada na camada até 0,10 m, e 75% nos primeiros 0,30 m (Peek et al., 2005; Jackson et al., 1996). Em relação às gramíneas avaliadas neste estudo, a concentração de massa de raízes na camada de 0,00–0,10 m variou de 66,0 a 80,8%, tendo diminuído para 13,4 a 28,3%, na camada de 0,10–0,20 m, e para 5,65 a 9,74% na camada de 0,20–0,30 m (Tabela 3). Essa diminuição do desenvolvimento radicular em profundidade, além de ser uma característica da maioria das plantas, deve-se também aos maiores valores de RP verificados nas camadas inferiores a 0,10 m, além dos valores de macroporos (Ma) inferiores a 0,10 m³ m⁻³

Tabela 3. Valores médios de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência do solo à penetração e teor de carbono orgânico nas camadas de 0,00–0,10 m, 0,10–0,20 m e 0,20–0,30 m de um solo construído após 58 meses de revegetação⁽¹⁾.

Tratamento	Densidade do solo (Mg m ⁻³)	Porosidade total	Macroporosidade	Microporosidade	Resistência à penetração (MPa)	C orgânico (g kg ⁻¹)
Camada de 0,00–0,10 m						
<i>Urochloa humidicola</i>	1,35±0,09 ^{ns}	0,459±0,04 ^{ns}	0,126±0,04 ^{ns}	0,333±0,03 ^{ns}	1,77±0,45 ^a	7,92±1,19 ^b
Δtest (%)	-9,40	+24,73	+50,00	+17,25	-55,53	+44,53
<i>Panicum maximum</i>	1,37±0,14 ^{ns}	0,456±0,05 ^{ns}	0,123±0,04 ^{ns}	0,333±0,01 ^{ns}	2,31±1,02 ^a	8,12±2,10 ^b
Δtest (%)	-8,05	+23,91	+46,43	+17,25	-41,96	+48,18
<i>Urochloa brizantha</i>	1,28±0,07 ^{ns}	0,473±0,03 ^{ns}	0,115±0,05 ^{ns}	0,359±0,04 ^{ns}	1,28±0,20 ^b	11,06±1,91 ^a
Δtest (%)	-14,09	+28,53	+36,90	+26,41	-67,84	+101,82
Testemunha	1,49	0,368	0,084	0,284	3,98	5,48
Camada de 0,10–0,20 m						
<i>Urochloa humidicola</i>	1,54±0,12 ^{ns}	0,385±0,04 ^{ns}	0,069±0,04 ^{ns}	0,316±0,03 ^{ns}	4,40±1,14 ^{ns}	5,08±1,78 ^{ns}
Δtest (%)	-2,53	+4,90	+64,29	-2,77	-6,38	+0,59
<i>Panicum maximum</i>	1,55±0,09 ^{ns}	0,396±0,02 ^{ns}	0,055±0,03 ^{ns}	0,341±0,02 ^{ns}	5,24±1,42 ^{ns}	4,76±0,83 ^{ns}
Δtest (%)	-1,90	+7,90	+30,95	+4,92	+11,49	-5,74
<i>Urochloa brizantha</i>	1,52±0,10 ^{ns}	0,398±0,04 ^{ns}	0,048±0,02 ^{ns}	0,349±0,05 ^{ns}	4,43±1,44 ^{ns}	7,18±4,93 ^{ns}
Δtest (%)	-3,80	+8,45	+14,29	+7,38	-5,74	+42,18
Testemunha	1,58	0,367	0,042	0,325	4,70	5,05
Camada de 0,20–0,30 m						
<i>Urochloa humidicola</i>	1,54±0,13 ^{ns}	0,394±0,02 ^{ns}	0,045±0,03 ^{ns}	0,348±0,03 ^{ns}	4,71±1,48 ^{ns}	6,40±2,95 ^{ns}
Δtest (%)	-3,75	+4,79	+21,62	+2,65	+7,05	+59,60
<i>Panicum maximum</i>	1,58±0,06 ^{ns}	0,388±0,01 ^{ns}	0,030±0,01 ^{ns}	0,358±0,01 ^{ns}	4,08±0,90 ^{ns}	6,10±2,37 ^{ns}
Δtest (%)	-1,25	+3,19	-18,92	+5,60	-7,27	+52,12
<i>Urochloa brizantha</i>	1,42±0,14 ^{ns}	0,413±0,02 ^{ns}	0,068±0,05 ^{ns}	0,346±0,05 ^{ns}	3,72±0,97 ^{ns}	7,83±5,35 ^{ns}
Δtest (%)	-11,25	+9,84	+83,78	+2,06	-15,45	+95,26
Testemunha	1,60	0,376	0,037	0,339	4,40	4,01

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo. Testemunha, solo construído sem cobertura vegetal; Δtest (%), aumento (+) ou diminuição (-) em relação ao solo testemunha.

e valores de densidade do solo (Ds) superiores a $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, considerados restritivos ao desenvolvimento radicular da maioria das culturas agrícolas em solos de textura argilosa (Reichert et al., 2003; Girardello et al., 2011; Baquero et al., 2012). Segundo Calonego et al. (2011), o desenvolvimento radicular está diretamente relacionado à condição estrutural do solo, pois o caminho natural de crescimento das raízes é predominantemente pelos macroporos, que é dependente da densidade do solo (Reinert et al., 2008).

Mediante os resultados observados nas Tabelas 2 e 3, evidencia-se a existência de uma zona compactada abaixo da camada de 0,10 m, possivelmente reflexo do excessivo tráfego de máquinas pesadas durante a construção do solo, e da ineficiência do processo de escarificação nessa camada, conforme relatado por Stumpf et al. (2014c).

Para estimar o tempo de recuperação dos atributos físicos do solo, foram comparados dados obtidos aos 58 meses de revegetação com dados obtidos por Stumpf et al. (2014c), aos 24 meses de revegetação (Figuras 1 e 2), no qual se verificaram reduções de 4,46 a 7,91% da Ds (Figura 1 A) e incremento de 30 a 50% nos valores de Ma (Figura 2 A), na camada mais superficial do solo construído; enquanto que a camada mais subsuperficial apresentou uma diminuição de 3,75 a 6,06% da Ds (Figura 1 B) e incremento de 16,6% na Ma sob *Urochloa humidicola* (Figura 2 B). Essa diminuição dos valores de Ds, e incremento nos valores de Ma, principalmente na camada de 0,00–0,10 m (Figuras 1 e 2), pode ser atribuída ao maior desenvolvimento radicular de todos os tratamentos entre os 24 e 58 meses de condução do experimento. Bonini & Alves (2012) avaliaram a qualidade física de um solo de textura média sob adubação verde (mucuna, feijão-de-porco e aveia) e pastagem (*Urochloa* spp.) ao longo de 17 anos, e constataram recuperação mais significativa na camada de 0,00–0,10 m. A alta densidade de raízes de gramíneas pode influenciar na estruturação do solo (Vezzani & Mielniczuk, 2011), pois as raízes, ao crescerem, influenciam na reorganização da rede de poros do solo (Perkons et al., 2014) por meio da formação de bioporos com ampla variação de tamanho (Lima et al., 2013).

Apesar da redução dos atributos radiculares em profundidade, a *Urochloa humidicola* apresentou maior VR em comparação às demais espécies, assim como apresentou maior comprimento radicular (CR) que

U. brizantha, mas não diferiu do *Panicum maximum* na camada de 0,10–0,20 m (Tabela 2). Contudo, todos os tratamentos proporcionaram reduções nos valores de Ds, dos 24 aos 58 meses de revegetação (Figura 1 B). Este resultado concorda com Pereira (2013), que observou em solo de textura argilosa que as *Urochloas* sp. e o *Panicum maximum* são importantes agentes na estruturação do solo até a profundidade de 0,30 m. Bonini & Alves (2012) também observaram uma redução na Ds na camada de 0,10–0,20 m, ao longo de oito anos de revegetação, e atribuíram esse resultado ao desenvolvimento radicular em profundidade da *Urochloa* sp.

A redução nos valores de Ds na camada mais inferior do solo construído pode também estar ligada às modificações provocadas pelos ciclos de umedecimento e secagem, comuns em solos argilosos. Gubiani et al.

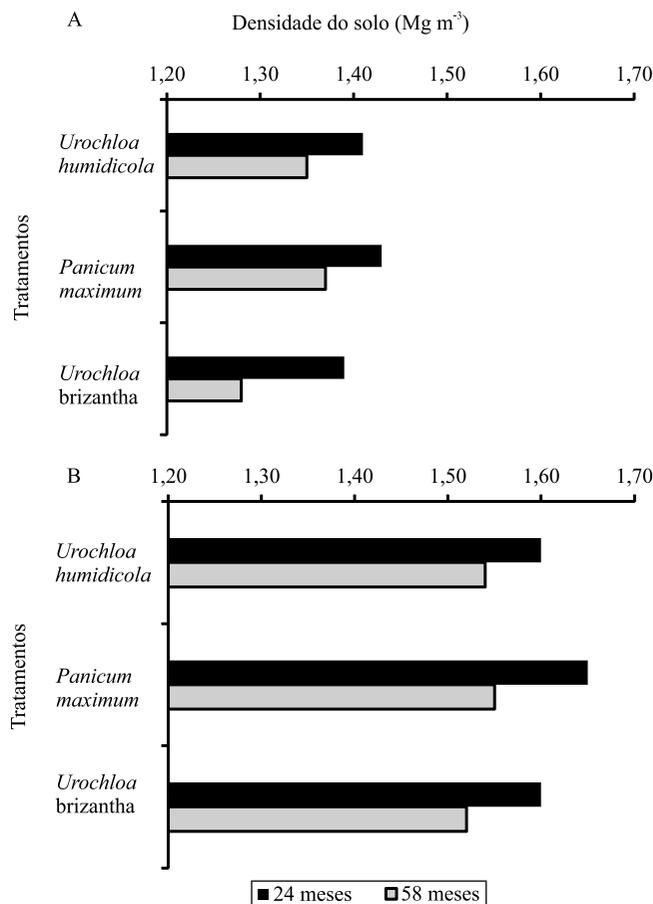


Figura 1. Densidade do solo construído na camada superficial (0,00–0,05 m e 0,00–0,10 m) (A) e na camada subsuperficial (0,10–0,15 m e 0,10–0,20 m) (B), após 24 e 58 meses de revegetação. Adaptado de Stumpf et al. (2014b).

(2015) observaram que repetidos ciclos de contração e expansão diminuem gradativamente a densidade do solo, revertendo o processo de compactação em solos de textura argilosa. Este efeito pode ter permitido o desenvolvimento de raízes nas fendas oriundas desse processo, como foi observado na análise visual dos monólitos. Todavia, o incremento de Ma na camada de 0,10–0,20 m do solo sob *Urochloa humidicola*, dos 24 aos 58 meses de condução do experimento (Figura 2 B), deve-se possivelmente à influência dos ciclos de umedecimento e secagem do solo somado ao maior desenvolvimento radicular desta espécie, conforme já apresentado na Tabela 2.

O efeito positivo das espécies vegetais na recuperação da estrutura do solo construído,

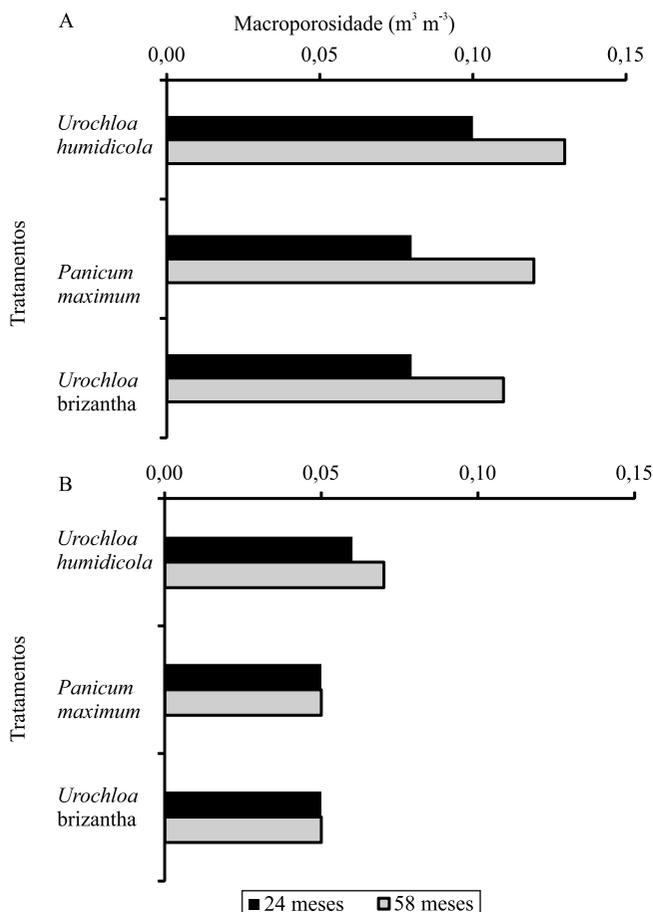


Figura 2. Macroporosidade do solo construído na camada superficial (0,00–0,05 m e 0,00–0,10 m) (A) e na camada subsuperficial (0,10–0,15 m e 0,10–0,20 m) (B), após 24 e 58 meses de revegetação. Adaptado de Stumpf et al. (2014b).

inclusive em profundidade, fica mais evidente quando observadas as diferenças entre os valores dos atributos físico-químicos dos tratamentos e do solo construído sem cobertura vegetal (testemunha). Isto é, na camada de 0,00–0,10 m os solos sob gramíneas proporcionaram 8,05 a 14,09% menor Ds; 23,91 a 28,53% maior porosidade total (PT); 36,90 a 50,00% maior macroporosidade (Ma); 41,96 a 67,84% menor RP e 44,53 a 101,82% maior teor de CO que o solo testemunha. Na camada de 0,10–0,20 m, o efeito foi menos pronunciado devido à permanência de uma zona mais compactada; contudo, o solo sob gramíneas ainda apresentou Ds de 1,90 a 3,80% menor; PT de 4,90 a 8,45% maior; Ma de 14,29 a 64,29% maior; RP de 5,74 a 6,38% menor e CO de 0,59 a 42,17% maior que o solo construído sem cobertura vegetal (Tabela 3). Bonini & Alves (2012) também observaram influência positiva nos atributos físicos de um solo, até a profundidade de 0,20 m, sob diferentes espécies vegetais, quando comparado ao solo sem cobertura vegetal.

Abaixo da camada de 0,20 m, onde a presença de raízes é muito reduzida (Tabela 2), não se pode afirmar que a presença de rejeitos pode ter influenciado essa condição, pois o crescimento foi igualmente reduzido, independentemente da presença de rejeitos nesta camada, conforme observação realizada nos monólitos.

A recuperação de solos impactados pela mineração a céu aberto passa pela mitigação dos problemas físicos que resultam da construção dos solos (Campos et al., 2010; Stumpf et al., 2014a). Os dados observados nesse estudo mostram que, apesar de as espécies terem recoberto a superfície da área avaliada, o maior desenvolvimento radicular e as condições físicas do solo menos restritivas concentraram-se apenas na camada mais superficial do solo, de 0,00–0,10 m, o que indica que a reversão do processo de degradação ainda não ocorreu em profundidade. Todavia, a ocorrência de um perceptível desenvolvimento no comprimento radicular abaixo da camada de 0,10 m (Tabela 2) significa que as gramíneas podem explorar as camadas mais profundas do solo, mesmo em condições físicas adversas. Dessa forma, a produção de biomassa subterrânea pode se constituir uma alternativa eficiente e de baixo custo para minimização da compactação, mas com um longo tempo demandado para que ocorram melhorias na qualidade estrutural do solo. Portanto, o uso agrícola mais intensivo da área minerada em questão requer cautela.

Conclusões

1. Após 58 meses de revegetação, o uso agrícola que envolva práticas mais intensivas de manejo de solo ainda não é recomendável no solo construído, pois somente a camada de 0,00–0,10 m apresenta condições físicas para o solo cumprir suas funções no ecossistema.

2. *Urochloa brizantha* apresenta-se como espécie promissora para a recuperação da estrutura do solo na camada de 0,00–0,10 m.

3. A densidade radicular na camada de 0,00–0,10 m é o atributo mais sensível para evidenciar as diferentes potencialidades de uso das espécies avaliadas.

4. A resistência do solo à penetração é o atributo físico mais sensível à presença de raízes na camada de 0,00–0,10 m.

Agradecimentos

À Companhia Riograndense de Mineração (CRM), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro.

Referências

- ALMEIDA, R.O.P.O.; SÁNCHEZ, L.E. Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. *Revista Árvore*, v.29, p.47-54, 2005. DOI: 10.1590/S0100-67622005000100006.
- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S.; SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.617-662, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000400002.
- ANDERSON, J.D.; INGRAM, L.J.; STAHL, P.D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming. *Applied Soil Ecology*, v.40, p.387-397, 2008. DOI: 10.1016/j.apsoil.2008.06.008.
- BAQUERO, J.E.; RALISCH, R.; MEDINA, C. de C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. de F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a Red Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.63-70, 2012.
- BÖHM, W. *Methods of studying root systems*. New York: Springer, 1979. 188p. (Ecological studies, 33). DOI: 10.1007/978-3-642-67282-8.
- BONINI, C. dos S.B.; ALVES, M.C. Estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho degradado em recuperação com adubos verdes, calcário e gesso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1263-1270, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000400019.
- BONINI, C.S.B.; ALVES, M.C. Qualidade física de um Latossolo Vermelho em recuperação há dezessete anos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.329-336, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000400001.
- BORŮVKA, L.; KOZÁK, J.; MÜHLHANSELOVÁ, M.; DONÁTOVÁ, H.; NIKODEM, A.; NĚMEČEK, K.; DRÁBEK, O. Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites. *Journal of Geochemical Exploration*, v.113, p.118-123, 2012. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.11.004.
- BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M. de; SOUZA, C.M.A. de; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.6, p.331-336, 2011. DOI: 10.5039/agraria.v6i2a882.
- BRASIL. Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. *Diário [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, 12 abr. 1989.
- CALONEGO, J.C.; GOMES, T.C.; SANTOS, C.H. dos; TIRITAN, C.S. Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactado. *Bioscience Journal*, v.27, p.289-296, 2011.
- CAMPANER, V.P.; LUIZ-SILVA, W. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no Sul do Brasil. *Química Nova*, v.32, p.146-152, 2009. DOI: 10.1590/S0100-40422009000100028.
- CAMPOS, M.L.; ALMEIDA, J.A. de; SILVEIRA, C.B. da; GATIBONI, L.C.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, Á.L.; MIQUELLUTI, D.J.; KLAUBERG FILHO, O.; SANTOS, J.C.P. Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v.9, p.198-205, 2010.
- CASTRO, R.C. de. *Avaliação temporal de atributos físicos de um solo construído em área de mineração de carvão recuperado com gramíneas perenes*. 2012. 101p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- CHEN, L.; TIAN, Y.; STEHOUWER, R.; KOST, D.; GUO, X.; BIGHAM, J.M.; BEEGHLY, J.; DICK, W.A. Surface coal mine land reclamation using a dry flue gas desulfurization product: long-term biological response. *Fuel*, v.105, p.258-265, 2013. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.06.081.
- CORRÊA, R.S.; BENTO, M.A.B. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1435-1443, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000400039.
- COSTA, S.; ZOCHE, J.J. Fertilidade de solos construídos em áreas de mineração de carvão na região sul de Santa Catarina. *Revista Árvore*, v.33, p.665-674, 2009. DOI: 10.1590/S0100-67622009000400009.
- CPRM/SGB. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (Brasil)/SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Relatório anual 2014*. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do

- Brasil, 2014. 210p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/rel_anual_2014.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2015.
- CRM. COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO. **Balanco 2014**. Porto Alegre: Companhia Riograndense de Mineração, 2014. 45p. Disponível em: <<http://www.crm.rs.gov.br/conteudo/855/?Balancos#.VkhRZ7erTIU>>. Acesso em: 5 nov. 2015.
- DANIELS, W.L.; ZIPPER, C.E. **Creation and management of productive minesoils**: Powell River Project. Virginia: Virginia State University, 2010. 13p. Disponível em: <http://pubs.ext.vt.edu/460/460-121/460-121_pdf.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2015.
- DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).
- DUNKER, R.E.; BARNHISEL, R.I. Cropland reclamation. In: BARNHISEL, R.I.; DARMODY, R.G.; DANIELS, W.L. (Ed.). **Reclamation of drastically disturbed lands**. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2000. p.323-369.
- FONTOURA, R.C. da. **Varição estacional de atributos funcionais de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de fertilidade do solo**. 2014. 91p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.627-636, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000400003.
- GIRARDELLO, V.C.; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R. da S.; HÖRBE, T. de A.N.; FERREIRA, A. de O.; TABALDI, F.M.; LANZANOVA, M.E. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2115-2126, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000600026.
- GIRARDELLO, V.C.; AMADO, T.J.C.; SANTI, A.L.; CHERUBIN, M.R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. de G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1234-1244, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400020.
- GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V. de; ASSIS, R.L. de; SILVA, G.P.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.67-75, 2006. DOI: 10.1590/S0100-69162006000100008.
- GUBIANI, P.I.; VAN LIER, Q. de J.; DRESCHER, M.S.; MEZZOMO, H.C.; VEIGA, C.M.C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.100-108, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbs20150317.
- INDA, A.V.; QUINONES, O.R.G.; GIASSONI, E.; BISSANI, C.A.; DICK, D.P.; NASCIMENTO, P.C. do. Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. **Ciência Rural**, v.40, p.1060-1067, 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010000500010.
- JACKSON, R.B.; CANADELL, J.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; SALA, O.E.; SCHULZE, E.D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Oecologia**, v.108, p.389-411, 1996. DOI: 10.1007/BF00333714.
- KRÜMMELBEIN, J.; RAAB, T. Development of soil physical parameters in agricultural reclamation after brown coal mining within the first four years. **Soil and Tillage Research**, v.125, p.109-115, 2012. DOI: 10.1016/j.still.2012.06.013.
- LIMA, R.P. de; LEÓN, M.J. de; SILVA, A.R. da. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v.60, p.16-20, 2013. DOI: 10.1590/S0034-737X2013000100003.
- LONGO, R.M.; RIBEIRO, A.I.; MELO, W.J. de. Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica. **Bragantia**, v.70, p.139-146, 2011. DOI: 10.1590/S0006-87052011000100020.
- LUNARDI NETO, A.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A. de; MAFRA, Á.L.; MEDEIROS, J.C.; ALBERTON, A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1379-1388, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400002.
- MAHARANA, J.K.; PATEL, A.K. Characterization of physico-chemical properties and their impact on enzyme activities in a chronosequence coal mine overburden spoil as biomarker for reclamation process. **Journal of Bacteriology and Parasitology**, v.4, p.174-183, 2013.
- MANUAL de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400p.
- MOURA, A.J. **Microrganismos endofíticos associados à planta de ambientes impactados e não impactados pela drenagem ácida de mina de carvão (DAM)**. 2014. 121p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MUKHOPADHYAY, S.; MAITI, S.K.; MASTO, R.E. Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. **Ecological Engineering**, v.57, p.133-142, 2013. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.017.
- NUNES, M.R.; DENARDIN, J.E.; PAULETTO, E.A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L.F.S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, v.259-260, p.149-155, 2015. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.06.003.
- OLIVEIRA FILHO, L.C.I.; BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P. Influência dos processos de recuperação do solo após mineração de carvão sobre a mesofauna edáfica em Lauro Müller, Santa Catarina, Brasil. **Biotemas**, v.27, p.69-77, 2014. DOI: 10.5007/2175-7925.2014v27n2p69.
- OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces

- sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v.117, p.201-210, 2011. DOI: 10.1016/j.still.2011.10.005.
- PEEK, M.S.; LEFFLER, A.J.; IVANS, C.Y.; RYEL, R.J.; CALDWELL, M.M. Fine root distribution and persistence under field conditions of three co-occurring Great Basin species of different life form. **New Phytology**, v.165, p.171-180, 2005. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01186.x.
- PEREIRA, F.C.B.L. **Integração agricultura-pecuária: milho consorciado com forrageiras no outono e soja no verão**. 2013. 67p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira.
- PERKONS, U.; KAUTZ, T.; UTEAU, D.; PETH, S.; GEIER, V.; THOMAS, K.; HOLZ, K.L.; ATHMANN, M.; PUDE, R.; KÖPKE, U. Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems. **Soil and Tillage Research**, v.137, p.50-57, 2014. DOI: 10.1016/j.still.2013.11.005.
- PINTO, L.F.S.; KÄMPF, N. Contaminação dos solos construídos. In: TEIXEIRA, E.C.; PIRES, M.J.R. (Ed.). **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p.69-92.
- QUIÑONES, O.R.G.; INDA JUNIOR, A.V.; GIASSON, E.; BISSANI, C.A.; DICK, D.P. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e a composição do material utilizado. **Ciência Rural**, v.38, p.1564-1571, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000600012.
- REICHERT, J.M.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; RIQUELME, U.F.B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.310-319, 2009. DOI: 10.1590/S0100-204X2009000300013.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.
- REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1805-1816, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000500002.
- ROADMAP tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2012. 132p. (CGEE. Série documentos técnicos, 14).
- SÁNCHEZ, L.E. Planejamento e gestão do processo de recuperação de áreas degradadas. In: ALBA, J.M.F. (Ed.). **Recuperação de áreas mineradas**. 2.ed. rev. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p.103-121.
- SHEORAN, V.; SHEORAN, A.S.; POONIA, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. **International Journal of Soil, Sediment and Water**, v.3, p.2-13, 2010.
- SILVA, F.R. da; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A. da. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1731-1739, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000600008.
- SILVA, G.P.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M. da; VENEGAS, V.H.A. Potencialidade de plantas para revegetação de estereis e rejeito da mineração de ferro da mina de alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.36, p.165-172, 2006. DOI: 10.5216/pat.v36i3.2038.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.229-35, 1991.
- STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; CASTRO, R.C. de; PINTO, L.F.S.; FERNANDES, F.F.; BARBOZA, F. da S.; FRANCO, Â.M.P.; GONCALVES, F.C. Estrutura de um solo construído cultivado com diferentes espécies de poáceas. **Ciência Rural**, v.44, p.2171-2177, 2014a. DOI: 10.1590/0103-8478cr20131514.
- STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; CASTRO, R.C. de; PINTO, L.F.S.; FERNANDES, F.F.; SILVA, T.S. da; AMBUS, J.V.; GARCIA, G.F.; LIMA, C.L.R. de; NUNES, M.R. Capability of grass in recovery of a degraded área after coal mining. **Agrociencia**, v.48, p.477-487, 2014b.
- STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; FERNANDES, F.F.; SUZUKI, L.E.A.S.; SILVA, T.S. da; PINTO, L.F.S.; LIMA, C.L.R. de. Perennial grasses for recovery of the aggregation capacity of a reconstructed soil in a coal mining area in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.327-335, 2014c. DOI: 10.1590/S0100-06832014000100033.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (UFRGS. Boletim técnico, 5).
- VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100020.
- WEC. WORLD ENERGY COUNCIL. **World energy resources: 2013 survey**. London: World Energy Council, 2013. 468p. Available at: <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf>. Accessed on: 4 Nov. 2015.
- WICK, A.F.; INGRAM, L.J.; STAHL, P.D. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, p.201-209, 2009. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.09.012.
- ZHANG, L.; WANG, W.; BAI, Z.; CHUNJUAN, L.V. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. **Catena**, v.128, p.44-53, 2015. DOI: 10.1016/j.catena.2015.01.016.
- ZHAO, Z.; SHAHROUR, I.; BAI, Z.; FAN, W.; FENG, L.; LI, H. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. **European Journal of Soil Biology**, v.55, p.40-46, 2013. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2012.08.006.