

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO
E DA ÁGUA



Dissertação

**AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM SOLO CONSTRUÍDO
EM ÁREAS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO UTILIZANDO UM MÉTODO VISUAL**

Mateus Fonseca Rodrigues

Pelotas, 2019

Mateus Fonseca Rodrigues

**AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM SOLO CONSTRUÍDO
EM ÁREAS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO UTILIZANDO UM MÉTODO VISUAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências

Orientador: Dr. Pablo Miguel
Co-Orientador: Dr Luiz Fernando Spinelli Pinto

Pelotas, 2019

Mateus Fonseca Rodrigues

**AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM SOLO
CONSTRUÍDO EM ÁREAS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO UTILIZANDO UM
MÉTODO VISUAL**


Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 19 de julho de 2019

Banca examinadora:

Prof^a. Dr. Pablo Miguel

Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)



Prof^a. Dra. Rachel Muylbert Locks Guimarães

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UFTPR)

Prof. Dr. Leandro Sanzi Aquino

Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

Dedico este trabalho aos meus pais, Leomar e Darlene.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Leomar e Darlene, por todo apoio e por acreditarem em mim quando tomei a decisão de seguir por mais dois anos na vida acadêmica. Toda minha formação passa pelo esforço e dedicação que ambos tiveram comigo. Aos meus irmãos Igor e Vinícius, por estarem sempre ao meu lado e pela amizade que nos une.

A Thais Palumbo Silva, que durante toda essa caminhada passou de colega, para amiga e depois para companheira. O apoio dela muito contribuiu para que eu chegasse ao fim deste curso. Apesar de o destino ter nos levado para caminhos diferentes, sei que acima de tudo continuaremos amigos e mantendo carinho um pelo outro.

Aos meus orientadores Eloy Antonio Pauletto e Pablo Miguel que me apoiaram na elaboração deste trabalho com seus conhecimentos, e não apenas me auxiliaram a vencer as dificuldades como me motivaram a buscar o melhor resultado

A professora Rachel Muylaert Locks Guimarães, por ter me recebido no campus da UFTPR de Pato Branco/PR e ensinado a metodologia do VESS, principal análise deste trabalho.

Aos professores e funcionários do departamento de solos, por toda ajuda e ensinamentos, em especial a Dona Ana, Paulo Antunes, Rosimeire Trecha e Luiz Fernando Spinelli.

A pós-doutoranda Lizete Stumpf por todo conhecimento passado e por sempre estar à disposição na reta final deste trabalho.

Aos alunos de iniciação, pela ajuda e amizade, em especial ao Lucas Barbosa, Jeferson Diego, Thabata Duarte, Maurício Oliveira e Adão Pagani.

Aos amigos do MACSA, por todos os momentos de companheirismo, estudo e ajuda nos momentos de dificuldades, além dos momentos de descontração. Em especial a Alexssandra, Aline Hipólito, Edenara, Eliana, Gabriel, Ingrid, Margareth, Miguel, Milena, Mussa, Stefan e Thais Antolini.

Aos meus amigos do “Aqui é um Grupo Feliz” Amanda, Anderson, Anita, Camila, Davi e Natália por toda amizade que construímos ao longo destes 8,5 anos em Pelotas.

Por fim, a agência financiadora CAPES.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigado!

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes

Marthin Luther King

RESUMO

RODRIGUES, Mateus Fonseca. **Validação da Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) em Solos Sonstruídos de Áreas de Mineração de Carvão.** Dissertação (Mestrado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas - Brasil, 2019.

Dentre as atividades que mais causam degradação do solo está a mineração, que consiste na extração de minérios do subsolo como carvão, ouro, prata, pedras preciosas, areia, sílica, feldspato, entre outros. Para a indicação da qualidade do solo, muitas vezes são necessárias a realização de análises de parâmetros físicos, químicos e biológicos, sendo necessário tempo e recursos financeiros. Nesse sentido, medidas qualitativas da estrutura do solo obtidas diretamente no campo podem representar avaliações rápidas, seguras e objetivas e de baixo custo para inferir sobre a qualidade do solo. Validar a metodologia de avaliação visual da estrutura do solo (VESS) em solos construídos correlacionando seus resultados com as condições físicas de um solo construído após mineração de carvão é o principal objetivo do presente estudo, verificando as espécies de plantas mais adequadas para promover a recuperação da qualidade dos solos minerados, principalmente no que diz respeito à melhoria da estrutura do solo. A amostragem do solo foi realizada nas camadas de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m. Foram coletadas 2 amostras de solo com estrutura não preservada por tratamento, totalizando 32, que em laboratório foram destorroadas manualmente em seus pontos de fraqueza e secas ao ar, para determinação de atributos físicos e atributos químicos. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, havendo efeito de tratamento, as médias foram avaliadas pelo método de Correlação de Pearson ($p < 0,05$) para verificar se existe uma correlação positiva entre os atributos físicos do solo analisado com os resultados do VESS. As relações da metodologia da avaliação visual da estrutura do solo com atributos físicos do solo apresentaram correlações consideradas fracas ou moderadas, o que sugere que, para a área do experimento com solo construído uma qualidade visual pode ser associada a qualidades quantitativas.

ABSTRACT

RODRIGUES, Mateus Fonseca. **Validation of Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) in Soils Constructed from Coal mining Areas**. Dissertation (Master Degree in Sciences) – Postgraduate program in Management and Conservation of soil and water, Federal University of Pelotas – Brazil, 2019.

Among the activities that most cause soil degradation is mining, which consists of mining underground minerals such as coal, gold, silver, precious stones, sand, silica, feldspar, among others. In this sense, qualitative measures of soil structure obtained directly in the field can represent rapid, safe and objective evaluations and of low cost to infer about the quality of the soil. Validating the methodology of visual evaluation of soil structure (VESS) in soils constructed correlating their results with the physical conditions of a soil built after coal mining is the main objective of the present study, verifying the most suitable plant species to promote the recovery of the quality of the mined soils, mainly with respect to the improvement of the soil structure. Soil sampling was performed in the layers of 0,00 – 0,10 and 0,10 – 0,20m. Two soil samples with non-preserved structure were collected by treatment, totaling 32, which were manually derouted at their weak points and air dried to determine physical attributes and chemical attributes. The data were submitted to analysis of variance and, if there was treatment effect, the means were evaluated by the Pearson Correlation method ($p < 0,05$) to verify if there is a positive correlation between the physical attributes of the soil analyzed with the results of VEE. The relationship of the methodology of the visual evaluation of the soil structure with physical attributes of the soil presented weak or moderate correlations, which suggests that, for the area of the experiment with constructed soil a visual quality can be associated to quantitative qualities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Coluna geológica da formação Rio Bonito em Candiota-RS.....	15
Figura 2: Localização da área de mineração de carvão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM) no município de Candiota-RS.	34
Figura 3: Imagem aérea da área experimental.....	35
Figura 4: Escarificação (a) e calagem (b), do solo construído.....	36
Figura 5 Croqui da área experimental em 2003	36
Figura 6: Croqui e delineamento da área experimental 2.....	38
Figura 7: Tabela de classificação	40
Figura 8: Amostra de agregado do solo mais firme, angular e resistente a quebra ..	44
Figura 9: Amostra de agregados com presença de torrões, sub-angulares com necessidade de esforço para quebra.	45
Figura 10: Repetições e médias dos escores de qualidade estrutural (Vess Sq) do solo construído sob revegetação da <i>U. brizantha</i> (a), <i>H. altissima</i> (b), <i>P. notatum</i> (c) e <i>C. dactylon</i> (d).	47
Figura 11: Médias da porcentagem de resistência tênsil de agregados (KPa) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob <i>U. brizantha</i> , <i>H. altissima</i> , <i>P. notatum</i> e <i>C. dactylon</i>	48
Figura 12: Médias da porcentagem de resistência à penetração (KPa) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob <i>U. brizantha</i> , <i>H. altissima</i> , <i>P. notatum</i> e <i>C. dactylon</i>	49
Figura 13: Médias da densidade do solo (Mg.m^{-3}) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob <i>U. brizantha</i> , <i>H. altissima</i> , <i>P. notatum</i> e <i>C. dactylon</i> . .	50
Figura 14: Médias de Macroporosidade (a) e Microporosidade (b) do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob <i>U. brizantha</i> , <i>H. altissima</i> , <i>P. notatum</i> e <i>C. dactylon</i>	51
Figura 15: Médias de Porosidade Total do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob <i>U. brizantha</i> , <i>H. altissima</i> , <i>P. notatum</i> e <i>C. dactylon</i>	52
Figura 16: Médias de MO do solo (g.kg^{-1}) nas camadas de 0.00-0.10 e 0.10-0.20 m do solo minerado sob <i>U. brizantha</i> , <i>H. altíssima</i> , <i>P. notatum</i> e <i>C. Dactylon</i>	52
Figura 17: Médias da macroagregados (a), microagregados (b) e diâmetro médio ponderado de agregados (c) do solo (%) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob <i>U. brizantha</i> , <i>H. altissima</i> , <i>P. notatum</i> e <i>C. dactylon</i>	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Exemplo de trabalhos realizados na área experimental de Candiota.....	29
Tabela 2: Valores médios de areia, silte e argila nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m de um solo construído em área de mineração de carvão, submetido ao cultivo de quatro gramíneas.	35
Tabela 3: Correlação de Pearson entre o VESS e a porcentagem de Macroagregados, Microagregados, DMP, RT, Ds, Ma, Mi, PT, RP e COT na profundidade de 0,00 a 0,20 m do solo construído. *p<0,05; **p<0,01	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	Extração de Carvão Mineral	14
2.2.	Degradação ambiental em áreas mineradas	17
2.3.	Recuperação de Áreas Mineradas	19
2.4.	Qualidade do Solo	21
2.4.1.	Indicadores de Qualidade Química do Solo	22
2.4.2.	Indicadores de Qualidade Física do Solo	24
2.4.3.	Avaliação Visual da Estrutura do Solo	25
2.5.	Hipóteses	30
2.6.	Objetivos	30
2.6.1.	Objetivo Geral.....	30
2.6.2.	Objetivos específicos.....	30
VALIDAÇÃO DA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS) EM SOLOS CONSTRUÍDOS DE ÁREAS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO.....		31
1.	INTRODUÇÃO	31
2.	MATERIAL E MÉTODOS	34
2.1.	Caracterização da área experimental.....	34
2.2.	Amostragem do solo.....	38
2.3.	Análise Visual da Estrutura do Solo	39
2.4.	Análises Físicas e Química	40
2.4.1.	Análises de Solo com Estrutura não Preservadas	40
2.4.2.	Análise de Solo em Estrutura Preservada.....	42
2.4.3.	Determinação da Resistência à Penetração no solo.....	43
2.5.	Análise Estatística dos Dados	43
3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44

3.1. Análise Visual da Estrutura do Solo	44
3.2. Propriedades Físicas e Química.....	47
3.3. RELAÇÃO VESS E PROPRIEDADES FÍSICAS	55
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	59

1. INTRODUÇÃO GERAL

O estudo da qualidade do solo tem se tornado essencial para um adequado planejamento de recuperação de áreas degradadas, com o intuito de minimizar os efeitos dos processos que deterioram o ambiente. Dentre as atividades que mais causam degradação do solo está a mineração, que consiste na extração de minérios do subsolo como carvão, ouro, prata, pedras preciosas, areia, sílica, feldspato, entre outros.

Entretanto, o processo de extração é altamente impactante, podendo causar danos irreversíveis aos ambientes. Os impactos causados por atividades de mineração, principalmente a extração de carvão a céu aberto, podem resultar em uma área de influência muito maior que a área de lavra, causando a degradação de recursos hídricos, que vão se refletir em escala regional.

Para a indicação da qualidade do solo, muitas vezes são necessárias a realização de análises de parâmetros físicos, químicos e biológicos, sendo necessário tempo e recursos financeiros. Nesse sentido, medidas qualitativas da estrutura do solo obtidas diretamente no campo podem representar avaliações rápidas, seguras e objetivas e de baixo custo para inferir sobre a qualidade do solo. A Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS – Visual Evaluation of Soil Structure) é uma metodologia simples para se examinar a condição do solo e a forma que o mesmo é afetado pelas práticas de manejo, sendo também utilizado para identificar as limitações de um solo, e que pode ser realizada em diferentes épocas do ano, dependendo do objetivo da análise.

O estabelecimento de relações da análise visual da estrutura do solo com atributos físicos e químicos são fundamentais para melhor entendimento da evolução do processo de recuperação destas áreas degradadas com a implantação de diferentes plantas de cobertura. Sendo assim, o presente estudo busca avaliar o comportamento da metodologia da avaliação visual da estrutura do solo frente a atributos físicos do solo, em uma área degradada pela mineração de carvão após 15 anos de revegetação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Extração de Carvão Mineral

O carvão mineral é o combustível fóssil em maior disponibilidade no mundo, com reservas que se aproximam a 860 bilhões de toneladas, de acordo com a World Coal Association, as quais estão distribuídas em 75 países. Todavia, países como os Estados Unidos, Rússia, China, Austrália e Índia concentram 75% das reservas existentes de carvão existentes, sendo que, o Brasil possui 0,6% destas reservas.

Segundo a British Petroleum, BP (2017), as reservas medidas de carvão mineral encontram-se principalmente nos Estados Unidos (22,1%), na Rússia (14,1%) e na China (21,4%). Para Pires & Holtz (2016), a demanda por energia ao nível mundial até 2035 exigirá o crescimento da operação de usinas em cerca de 35%. Apesar disso a produção mundial de carvão mineral em 2016 caiu 6,2%, 231 milhões de toneladas de petróleo equivalente (mtep) em 2016, o maior declínio registrado. A produção da China caiu 7,9%, enquanto que a produção dos Estados Unidos caiu cerca de 19%. O consumo global decaiu 1,7%, o segundo maior declínio sucessivo, onde as maiores reduções foram observadas nos Estados Unidos (8,8%), China (1,6%) e Reino Unido (52,5%).

No Brasil as principais reservas de carvão mineral encontram-se nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, com aproximadamente 28,6 e 3,4 bilhões de toneladas (89,0 e 10,5% do estoque do país), respectivamente para um total das reservas brasileiras de 32,6 bilhões de toneladas (CRM, 2014). No estado do Rio Grande do Sul, a principal e maior jazida de carvão encontra-se na Mina de Candiota, localizada no município de Candiota, distanciado 400 quilômetros ao sudoeste da cidade de Porto Alegre. Na mina de Candiota, as reservas de carvão abrangem cerca de um bilhão de toneladas, representando 38% de todo o carvão nacional, totalmente destinada à geração de energia termoelétrica e em local próximo à jazida (CRM, 2014). O carvão extraído é utilizado como combustível, sendo britado e transportado por correias até a Usina Termoelétrica Presidente Médici (UTPM).

O processo de extração de carvão a céu aberto ocorre na forma de lavra em faixas, e a retirada das camadas sobrejacentes ao carvão é realizada por meio de máquinas de grande porte (walkig-dragline), o que provoca a mistura dos materiais nas pilhas de estéreis. A mineração de carvão na jazida de Candiota é realizada totalmente a céu aberto, devido ao carvão se localizar em profundidades que variam de 10 a 25m da superfície do solo. São conhecidos 23 leitos de carvão, dos quais

somente as camadas Candiota Inferior (CI) e Superior (CS) são economicamente viáveis de exploração, por apresentarem de 2,30 a 6,17 metros de espessura tendo intercalado dois bancos de argilitos e siltitos de coloração cinza-escuro cuja espessura varia em torno de 0,70m (Figura 1).

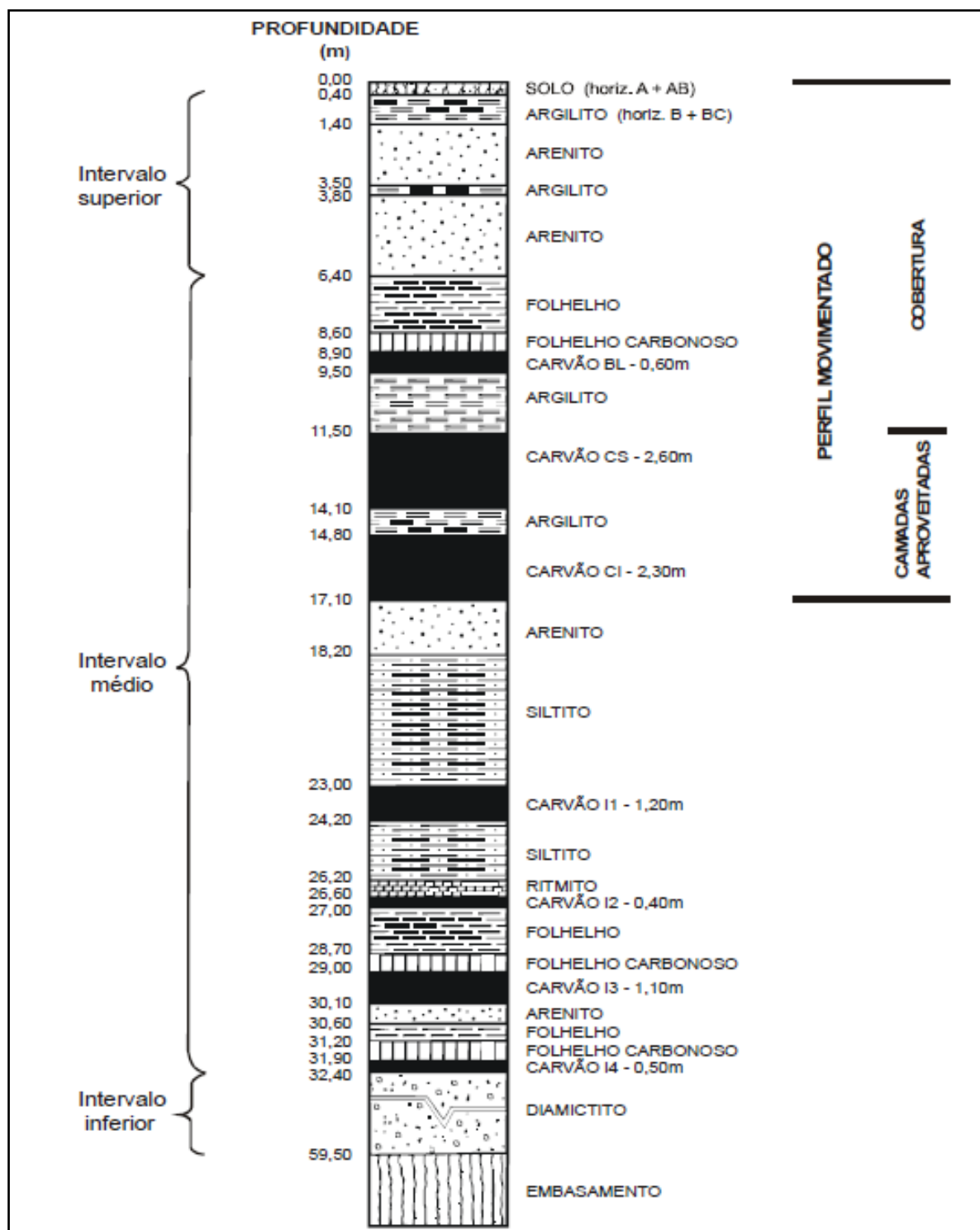


Figura 1: Coluna geológica da formação Rio Bonito em Candiota-RS (PINTO 1999, adaptado de ADE, 1993)

O processo de mineração e de reconstrução do solo segue as seguintes etapas: (a) remoção dos horizontes A, B e/ou C do solo original; (b) remoção das rochas (arenito, siltito e folhelhos) a partir de escavadeira de alta capacidade; (c) detonação e remoção dos bancos de carvão; (d) deposição dos estéreis ou spoils (mistura de rochas e carvão não aproveitados) que são aplainados por tratores de esteira na recomposição topográfica da área; (e) para finalizar a recomposição topográfica, deposita-se uma camada de solo (horizonte A e/ou B) removida durante a etapa (a) denominada de “terra vegetal”, o qual origina assim o “solo construído” ou antropogênico que é posteriormente vegetado.

De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2014) solo construído consiste em material mineral do solo que mostra evidências da alteração intencional das propriedades do solo ou características da superfície da terra pela atividade humana. O material alterado pode ser composto por material mineral do solo e/ou conter estéreis utilizados como emendas agrícolas, mas a maioria não demonstra evidência de que foram transportados de fora do pedon original.

Para fins de classificação de solos, o solo construído, pode ser enquadrado dentro da classe dos Technosols (WRB, 2014). Os Technosols são solos originados tecnicamente e contém uma quantidade significativa de materiais fortemente alterados por humanos, extraído de profundidades maiores ou apresentando camadas consolidadas (material endurecido criado por humanos, com propriedades diferentes da rocha natural). Geralmente são solos provenientes de resíduos (aterros, lamas, cinzas, minas e cinzas) e são frequentemente chamados de solos urbanos ou mineiros.

Os solos construídos são, portanto, considerados solos pedologicamente jovens cuja recuperação dos atributos físico-químico-biológicos depende da intensidade da reposição vegetal na área minerada (STUMPF et al., 2017). Os estéreis originados da extração do carvão retornam a cava aberta pela mineração, onde são nivelados e recobertos pelo solo superficial, retirado da frente de lavra do carvão, e constitui-se o chamado “solo construído”.

2.2. Degradação ambiental em áreas mineradas

Segundo a NBR 10.703 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a degradação do solo é definida como uma “alteração adversa das características do solo em relação aos seus diversos usos possíveis, tanto os estabelecidos em planejamento, como os potenciais”. A degradação de uma área ocorre quando a vegetação nativa e a fauna forem destruídas, removidas ou expulsas; a camada fértil do solo for perdida, removida ou enterrada; e a qualidade e o regime de vazão do sistema hídrico forem alterados. A degradação ambiental ocorre quando há perda de adaptação às características físicas, químicas e biológicas e é inviabilizado o desenvolvimento sócio-econômico (IBAMA, 1990).

O grau de degradação do solo ou modificação exercida pela atividade humana é variável conforme a situação. A fase sólida pode passar a não exercer a função de barreira (substrato com pouca capacidade de troca de cátions ou complexo sortivo pode estar saturado), a percolação pode passar a ser irregular (por meio de fendas) ou o substrato pode estar contaminado por resíduos (por metais). A fase gasosa pode ter a sua troca deteriorada pela compactação, prejudicando a respiração radicular e o desenvolvimento microbiano. A fase líquida, além da composição alterada pela contaminação, pode ter sua quantidade e disponibilidade afetadas pela compactação, aumentando o escoamento superficial e consequentemente erosão. Como resultado final, a biota do solo tende a diminuir a sua bioprodutividade e pode ser alterada sua diversidade. Todas essas consequências devem ser ressaltadas, principalmente em solos minerados, que representam os casos mais extremos de modificação no perfil do solo (STUMPF, 2016).

A atividade de remoção do carvão, principalmente pela mineração superficial ou a céu aberto, ocasiona problemas ambientais em grandes proporções. O solo e o subsolo serem removidos por escavação, o qual proporciona mudanças permanentes na topografia, nas estruturas geológicas e também no regime hidrológico superficial e subsuperficial (SHRESTHA & LAL, 2011), por envolver a movimentação de grandes volumes de solo e de rochas (ZHANG et al., 2015; MUKHOPADHYAY et al., 2013). Além do impacto visual, tendem a ocorrer problemas associados à drenagem ácida de áreas adjacentes (DANIELS & ZIPPER, 2010), afeta os organismos aquáticos e a revegetação do entorno (TIWARY, 2001), torna a área mais suscetível à erosão e à compactação (SHEORAN et al. 2010; KRUMMELBEIN & RAAB, 2012; STUMPF et al., 2014 a; STUMPF et al., 2016) e predispões as perdas de carbono decorrentes da

erosão e da desintegração dos agregados do solo natural expostos à ação dos microrganismos (WICK et al., 2009; MAHARANA & PATEL, 2013; LEAL et al. 2015).

As alterações impostas ao meio ambiente em áreas de mineração de carvão são portanto, de grande monta geradas a partir dos materiais estéréis depositados nas cavas durante a recomposição topográfica geralmente ricos em sulfetos de ferro os quais, com a presença de oxigênio da água e ação de bactérias formam a chamada drenagem ácida de mina (DAM), comprometendo a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, o que pode dificultar o estabelecimento de plantas com potencial para revegetação destas áreas degradadas (BITENCOURT, et al.2015).

Além de alterações químicas, geram-se também alterações biológicas (MENDES FILHO, 2004), pois o solo ao ser removido do local de origem tem como consequência a redução dos teores de matéria orgânica, da biomassa microbiana e da biota edáfica. Consequentemente, os solos construídos após a mineração de carvão apresentam uma redução na decomposição e mineralização da matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes, na produção de substâncias cimentantes (polissacarídeos) ou ligantes (hifas fúngicas) e na agregação do solo (RIGOTTI, 2002).

Juntamente com as alterações químicas e biológicas do solo em áreas impactadas pela mineração, ocorrem alterações físicas causadas pela retirada, movimentação, deposição e preparo do solo durante a recomposição topográfica da área minerada. Esses impactos, entretanto, podem ser minimizados com a adoção de técnicas de controle no processo de extração do carvão bem como na posterior construção do solo de áreas mineradas.

Considerando a dimensão da degradação que abrange a extração do carvão, percebe-se a dificuldade do solo construído retornar ao estado de organização anterior à mineração (PINTO et al., 2010). Solos fisicamente degradados podem ser recuperados com o cultivo de espécies de diferentes sistemas aéreos e radiculares, que possam adicionar matéria orgânica em quantidade e composição variada (WOHLENBERG et al., 2004).

A cobertura de gramíneas é de grande interesse no processo de recuperação dessas áreas, pelo fato de desempenharem importante papel na reconstrução das características físicas e químicas do substrato. As gramíneas, devido à sua capacidade de proteção do solo contra o impacto direto da gota da chuva, do vento e seu papel na promoção de agregação do solo, através do fornecimento de matéria

orgânica e de seu sistema radicular abundante e extensivo em constante renovação no solo, são utilizadas em programas de regeneração de áreas degradadas e consequentemente na qualidade estrutural do solo (STUMPF et al., 2014).

2.3. Recuperação de Áreas Mineradas

Áreas pós mineração são geralmente desfavoráveis para uso agrícola e vulneráveis à erosão ou subsidência, portanto, precisam ser recuperadas e para proporcionar um solo estável é importante que a reabilitação seja bem-sucedida no ecossistema (KOŁODZIEJ et al., 2017). Áreas de minas de carvão recuperadas, apresentam um sistema único para análise detalhada dos processos do solo, como agregação, matéria orgânica e dinâmica microbiana, porque os solos construídos em áreas de mineração se formam diretamente a partir de uma mistura de materiais (WICK et al., 2010).

A recuperação de solos minerados podem levar décadas ou séculos, e não significa necessariamente a restauração das condições edáficas como eram anteriormente. Processo de mineração, recomposição topográfica, reconstrução do perfil do solo e a mobilização dos horizontes superficiais do solo são certamente os principais aspectos que definem as características comuns dos solos minerados, como severa degradação, má estruturação e baixo conteúdo de matéria orgânica (STUMPF et al., 2018).

A remoção da cobertura vegetal, as escavações nas cavas e a disposição de materiais sólidos em corpos de bota-fora, entre outras operações, alteram expressivamente a paisagem. Entretanto é possível desenvolver ações que promovam a efetiva recuperação ambiental da área afetada (EMBRAPA, 2018). Segundo Capeche (2008), a recuperação significa que o ambiente degradado retornará a uma forma e utilização de acordo com um plano pré-estabelecido para o uso do solo, implicando em uma condição em conformidade com os valores ambientais, estéticos e sociais da circunvizinhança, ou seja, o ambiente degradado terá condições mínimas de estabelecer um novo equilíbrio dinâmico, desenvolvendo um novo solo e uma nova paisagem.

Para recuperar uma área degradada é necessário conhecer os impactos causados ao ambiente pela atividade degradante. Especificamente na atividade de exploração mineral podem ocorrer impactos diretos e indiretos de diferentes naturezas

sobre a área mineradas e seu entorno. Os impactos sobre o solo, a vegetação e os recursos hídricos presentes no sistema são observados na forma de alterações estéticas, físicas, químicas e biológicas, dependendo das características da geologia, vegetação, relevo e solo locais, bem como do tipo de lavra e minério a ser extraídos (CASTRO, 2012). Tais locais são recuperados após a mineração e os solos jovens são caracterizados por uma grande proporção de fragmentos de rocha, baixo teor de nutrientes, alta densidade e baixa capacidade de infiltração de água devido à compactação (LI et al., 2018).

Para a recuperação do meio físico no âmbito do encerramento da atividade de mineração podem ser utilizadas técnicas convencionais aplicando-se materiais artificiais ou naturais, ou técnicas de bioengenharia de solos, que caracterizam-se pela utilização de plantas vivas (inteiras ou parte delas), de forma isolada ou combinada com materiais inertes, tais como fragmentos de rocha, madeira, plantas mortas e malhas orgânicas (EMBRAPA, 2018). Para Pereira (2010), o uso de plantas de cobertura torna-se primordial em programas de recuperação de áreas degradadas, pois a cobertura do solo e a adição de fitomassa ao sistema proporcionam, entre outros, a redução da erosão e o aumento gradativo da matéria orgânica do solo. Consequentemente, as plantas desempenham um papel fundamental na ciclagem de nutrientes.

Solos fisicamente degradados podem ser recuperados com o cultivo de espécies de diferentes sistemas aéreos e radiculares que adicionam material orgânico em quantidade e composição variada. A diferença entre espécies pode estar na qualidade do material orgânico sintetizado pelas raízes de diversas culturas ou na configuração das raízes (STUMPF, 2015). O objetivo das plantas de cobertura na recuperação dos solos geralmente tem sido o retorno das folhas (parte aérea) para o solo, tanto como contribuição ao estoque de carbono no solo, como substrato e fonte de energia para os microrganismos. Porém, o retorno de carbono no solo através das raízes pode ser igual ou até maior que o proporcionado pela parte aérea (GREGORY, 2006).

No curto e médio prazo, a consolidação de gramíneas, juntamente com a perturbação inferior do solo, proporciona uma melhoria gradual na capacidade e intensidade do solo é esperada, até que o sistema atinja um novo estado de equilíbrio a longo prazo (REICHERT et al, 2016). O sucesso da recuperação de solos minerados depende das espécies de plantas selecionadas e introduzidas para a sua

revegetação, como também depende dos métodos de mineração, da altura e da inclinação dos cones de resíduos, da natureza dos solos minerados e das condições geoclimáticas (MUKHOPADHYAY et al., 2013).

2.4. Qualidade do Solo

Um solo de boa qualidade pode ser definido como um solo que apresenta atributos químicos, físicos, biológicos, bioquímicos e pedológicos capazes de permitir efetivamente o crescimento e desenvolvimento de plantas. Doran & Parkin (1994) propuseram um conjunto básico de indicadores de ordem biológica, física e química: textura, profundidade de solo e de raízes, densidade do solo, infiltração de água no solo, capacidade de armazenamento e retenção de água, conteúdo de água no solo, temperatura do solo, teores de C e N orgânico total, pH, condutividade elétrica, teores de N mineral, P, K, C e N da biomassa microbiana, N potencialmente mineralizável, respiração do solo, C na biomassa em relação ao C orgânico total e respiração microbiana em relação a biomassa. A proposta é de que esses indicadores sejam relacionados com cinco funções do solo: habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de elementos químicos; promover e sustentar o desenvolvimento de raízes; manter um habitat biológico adequado; e responder ao manejo, resistindo à degradação.

Os conceitos de qualidade do solo mais difundidos são aqueles que ressaltam o seu aspecto funcional, que consideram a capacidade do solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade ambiental e promovendo a saúde das plantas e animais. Essa abordagem leva em consideração não apenas o papel do solo na produção agrícola, mas a participação em funções específicas no ecossistema, das quais depende a sustentabilidade a longo prazo. A restauração da qualidade do solo após a ocorrência de processos de degradação relaciona-se diretamente com o restabelecimento dessas funções (KIMPE & WARKENTIN, 1998).

A maioria do pensamento em relação à qualidade do solo está centrada na identificação de um índice capaz de servir como indicador. Cientistas do solo, agricultores e instituições governamentais têm interesse em obter um indicador de qualidade do solo para avaliar terras, em relação à degradação, estimar necessidades de pesquisa e de financiamentos e julgar práticas de manejo, a fim de monitorar mudanças nas propriedades e nos processos do solo, na sustentabilidade e na

qualidade ambiental, que ocorram no tempo, em resposta ao uso da terra e as práticas de manejo (VENAZZI & MIELNICZUK, 2009).

A qualidade do solo depende da vegetação que melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo de locais perturbados, onde famílias diferentes de plantas influenciam as funções do solo em diversas formas (KOLODZIEJ et al., 2017). A vegetação é influenciada pelas características do solo, como a disponibilidade de nutrientes e, por sua vez, pode influenciar os parâmetros do solo, criando feedbacks positivos (BOHRER et al., 2017).

Duas importantes propriedades de qualidade do solo são agregação e matéria orgânica, onde ambos estão intimamente relacionados um ao outro. Estruturalmente, agregação influencia as propriedades do solo, não se limitando apenas a densidade e distribuição do tamanho dos poros, influenciando diretamente no movimento e na retenção de água no solo e trocas gasosas. Funcionalmente, em solos onde matéria orgânica é um agente de ligação primária para agregados, pode ser feita a ligação entre distribuições de tamanho de agregado com funções biológicas do solo (WICK et al., 2016).

A avaliação da qualidade do solo, portanto, é um processo importante relativamente dinâmico e poderá representar mudanças em respostas à gestão adotada principalmente relacionada a diferentes sistemas de manejo do solo, visando sua sustentabilidade. Por meio da avaliação dinâmica, é possível acompanhar a evolução dos principais indicadores ao longo do tempo e determinar se a qualidade de um solo sob um determinado sistema de manejo está melhorando esta estável ou em declínio (KARLEN et al., 2008; MUELLER et al., 2012; BALL et al., 2007).

2.4.1. Indicadores de Qualidade Química do Solo

A mineração da superfície do solo resulta em condições deficientes de nutrientes como perda de carbono orgânico, levando a uma condição drástica para plantas e microrganismos. Ser deficiente em nutrientes vegetais, representa um sistema geomorfológico desequilibrado, o que gera um problema para processos pedogenéticos, de revegetação e restauração (MAHARANA & PATEL, 2013).

Nos solos construídos, a perda de estrutura decorrente de deficiências nos processos de lavra e recuperação das áreas mineradas implica aumento da densidade do solo e diminuição da taxa de infiltração de água, modificações que ocasionam aumento do escoamento superficial e do transporte de solo pela erosão. Como

consequência da erosão em solos construídos, materiais de camadas subsuperficiais contendo pirita são expostos a condições ambientais favoráveis à sua oxidação, ativando assim o processo de sulforização. A intensa acidificação produzida, caracterizada por valores de pH inferiores a 3,5, determina a dissolução de minerais aluminossilicatados, bem como a formação de novas fases minerais a partir dos produtos dessa dissolução. A evolução desse processo em solos construídos também é representada por decréscimo dos teores de cátions básicos e aumentos de alumínio trocável, sulfato solúvel e da condutividade elétrica, comparativamente às condições do solo natural anteriormente minerado, e tais alterações são dependentes e indicativas do estado de sulforização alcançado pelo solo (INDA et al., 2010).

A matéria orgânica do solo é considerada por muitos, como um indicador ideal para avaliar a qualidade do solo, devido ao fato de que várias funções e processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo estarem relacionados com a presença de matéria orgânica. Além disso a matéria orgânica é eficiente no monitoramento de mudanças na qualidade do solo ao longo do tempo (VENAZZI & MIELNICZUK, 2009). Além de somente a matéria orgânica do solo isoladamente como indicador de qualidade do solo, Franzluebbbers (2002) propõe como indicador a relação dos compartimentos de carbono e nitrogênio na matéria orgânica total e particulada, na biomassa microbiana e na mineralização potencial, determinados em amostras de solo coletadas na superfície e na subsuperfície do solo.

A disponibilidade de nutrientes pelas plantas é um fator para o sucesso da restauração de plantas nativas a uma superfície de um local minerado, fósforo e nitrogênio são dois dos mais importantes nutrientes para uma planta, sendo tipicamente limitados em solos construídos. Embora o fósforo possa estar presente, ele está principalmente ligado em depósitos minerais e, portanto, não sendo biodisponível. O nitrogênio na planta é predominantemente encontrado no solo juntamente com partículas de matéria orgânica, que se encontram ausentes na recuperação inicial destes locais (SENA et al., 2015).

Portanto, os atributos químicos de solos minerados devem ser conhecidos para garantir pleno desenvolvimento das plantas precursoras da recuperação de áreas degradadas, e visando auxiliar no retorno do novo solo recomposto, a uma forma de utilização, não necessariamente agrícola, de acordo com um plano pré-estabelecido pela mineradora (STUMPF et al., 2016).

2.4.2. Indicadores de Qualidade Física do Solo

A seleção de indicadores representativos é fundamental para avaliação da qualidade do solo, devido a esses indicadores abrangerem uma ampla gama de características que afetem diretamente sua qualidade (SOUZA, 2015). A avaliação da qualidade estrutural dos solos submetidos a manejos diferenciados tem sido realizada por meio de atributos como densidade, porosidade, distribuição de tamanho de agregados estáveis em água e diâmetro médio ponderado dos agregados, resistência a penetração (RP), resistência tênsil (RT) e friabilidade (F) (REIS et al., 2014).

Os primeiros efeitos negativos sobre atributos físicos em solos minerados a serem observados são os valores de densidade elevados e a desproporcionalidade entre micro e macroporos. Isso é um reflexo do próprio processo de construção do solo, devido à mistura de horizontes (geralmente horizontes subsuperficiais são usados como camada de reposição) e o uso de máquinas de grande porte na recomposição da área (CASTRO, 2012). A quantidade de macroporos influencia o crescimento das raízes e as trocas gasosas e os microporos na absorção de água e nutrientes pelas plantas (BEUTLER & CENTURION, 2003). De acordo com Sequinatto (2010), sempre que o manejo do solo influenciar nos valores de densidade, a relação micro/macroporos será também alterada.

A densidade do solo influencia inúmeros processos que afetam o desenvolvimento e o crescimento radicular da planta (GROSSMAN & REINSCH, 2002; STOLF et al., 2011). Além de ser considerado um atributo indicador da degradação (BI et al., 2014), principalmente por indicar o estado de compactação de um solo, pode servir de importante balizador na tomada de decisão quanto ao sistema de manejo a ser adotado e ao estabelecimento de práticas agronômicas, visando à conservação do solo e da água.

A estrutura do solo pode ser conceituada como sendo o resultado da agregação ou arranjo espacial das frações granulométricas primárias do solo em agrupamentos secundários, denominados de agregados (BRADY & WEILL, 2008). Segundo Bastos et al. (2005), a matéria orgânica, os óxidos e os hidróxidos são considerados como agentes cimentantes, tanto das partículas primárias quanto das partículas secundárias do solo. Dentre fatores que influenciam a formação e a estabilização dos agregados, destacam-se a textura, a mineralogia da fração argila, o tipo e teor de cátions e a matéria orgânica. O aumento no teor de argila, favorece a formação de agregados

mais estáveis, devido ao número de cargas elétricas entre as partículas minerais (REIS, 2012).

A resistência tênsil de agregados do solo é utilizada como indicadora do impacto do manejo na qualidade do solo, em resposta aos processos físicos e mecânicos que ocorrem com o uso do solo. A resistência tênsil é definida como o estresse ou força por unidade de área requerida para fraturar os agregados do solo, quando submetidos a uma pressão (DEXTER & WATTS, 2000).

O decréscimo da resistência tênsil é causado pela diminuição e/ou destruição das ligações químicas entre as partículas, tanto de natureza orgânica quanto inorgânica, tornando o solo mecanicamente instável (IMHOFF et al., 2002). Por outro lado, o aumento excessivo da resistência tênsil está associado ao incremento da quantidade de argila dispersa em água em solos fisicamente degradados, a qual se deposita nas fissuras existentes entre os agregados e atua como agente agregante (DEXTER & WATTS, 2000).

A friabilidade é outro indicador da qualidade estrutural e física do solo, o qual indica a tendência de uma massa de solo a se desfazer em agregados de tamanhos menores sob aplicação de um estresse ou carga (BAVOSO et al., 2010). De acordo com Watts & Dexter (1998), a friabilidade do solo pode ser estimada por meio do coeficiente de variação da resistência tênsil do solo.

Valores elevados de friabilidade indicam que a resistência dos agregados aumenta com a redução do tamanho, de modo que agregados maiores poderão ser quebrados mais facilmente, produzindo ampla distribuição de tamanho de agregados. De acordo com Tormena et al. (2008), a friabilidade relaciona-se significativamente com a densidade, condutividade hidráulica de solos saturados, estabilidade de agregados, teor de matéria orgânica e granulometria do solo.

Essas variáveis têm sido utilizadas para possibilitar a adoção de práticas de manejo economicamente viáveis e ecologicamente menos degradantes em solos agrícolas, entretanto é necessário analisar as respostas dessas variáveis aos processos de recuperação de solo construídos em áreas de mineração (REIS et al., 2014).

2.4.3. Avaliação Visual da Estrutura do Solo

A literatura destaca outros métodos utilizados para avaliar a qualidade do solo, como por exemplo, os métodos visuais. Estes podem ser utilizados, em substituição

e/ou combinação com métodos laboratoriais, permitindo se obter informações importantes na avaliação do efeito de diferentes sistemas de uso e manejo adotados, na qualidade estrutural do solo (GIAROLA et al., 2010; MURPHY et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2013; ASKARI et al., 2013; BALL et al., 2007; JOHANNES et al., 2017).

Métodos clássicos de avaliação da estrutura do solo são descritos a seguir: o método desenvolvido por Peerkamp (1967), que necessita de uma trincheira ampla e profunda, o que dificulta sua aplicação em larga escala, porém foi adaptado posteriormente por Ball & Douglas (2003) tornando-o mais simples e incluindo mais detalhes sobre observações tais como, cor, forma e orientação de agregados, poros e raízes; o método do perfil cultural de Hénin et al. (1960), que se fundamenta na morfologia do solo, considera a avaliação de raízes, delimitando os volumes antropizados tanto em profundidade como lateralmente, incorporando a proposta de avaliar os efeitos das operações agrícolas, mas também exige abertura de trincheira ampla e profunda; o método de Gautronneau & Manichon (1987) que ampliou o emprego do perfil cultural, sistematizando a nomenclatura e definindo critérios de avaliação e interpretação das estruturas antrópicas, mediante um guia metodológico; o método de Tavares Filho et al., (1999), que adaptaram os critérios e nomenclatura do Perfil Cultural para solos tropicais.

Além das metodologias já descritas, estudos posteriores descreveram métodos como o da Avaliação da Qualidade do Solo (MSQR), desenvolvido por Mueller et al., (2007), que apresenta índices definidos visualmente com base no clima, topografia, estrutura e textura do solo. O VSA (Visual Soil Assessment), desenvolvido por Shepherd (2009), que permite caracterizar quantitativamente grandes áreas da paisagem. O VESS (Visual Evaluation of Soil Structure), que foi proposto para avaliar a qualidade física do solo de forma rápida, confiável e sensível aos efeitos do manejo (BALL et al., 2007).

Os métodos laboratoriais embora sejam bastante precisos, apresentam limitações devido ao custo e ao tempo dispensado para as avaliações (GUIMARÃES et al., 2013). Nesse sentido, medidas qualitativas da estrutura do solo obtidas diretamente no campo, como o VESS (Avaliação visual da estrutura do solo ou Visual Evaluation of Soil Structure) (BALL et al., 2011) e/ou o VSA (Avaliação visual do solo ou Visual Soil Assessment) (SHEPHERD, 2009) podem representar avaliações rápidas, seguras, objetivas e de baixo custo para inferir sobre a qualidade do solo,

podendo ser utilizadas adequadamente por agricultores e/ou qualquer profissional da área específica (EMBRAPA, 2015).

No Brasil o VESS foi aprimorado por Guimarães et al. (2011) obteve bons resultados, apesar que sua concepção original foi apenas para solos de países de clima temperado (BALL et al., 2007). Além de ser considerado rápido e de baixo custo, este método, tem vantagem de ser realizado no campo com amostra retirada com pá de corte reto cujos resultados são prontamente disponíveis tornando-o uma ferramenta prática e sensível às alterações de manejo (GUIMARÃES et al, 2013; GIAROLA et al., 2013; ASKARI et al., 2013; JOHANNES et al., 2017). Originalmente este método foi desenvolvido por Peerlkamp (1967) e posteriormente utilizado por Ball et al (2007) que analisa a aparência do bloco de solo após a quebra com as mãos, onde foi definido o termo qualidade estrutural (Qe) que se relaciona com a matéria orgânica do solo, conteúdo de argila e desempenho das culturas.

A metodologia do VESS apresenta algumas vantagens e desvantagens (GIAROLA et al., 2013). As vantagens são: fácil e rápida avaliação da qualidade dos solos; permite identificar as distintas camadas, principalmente em áreas de plantio direto; auxilia na tomada de decisão em que camada se deve amostrar; produtores rurais conseguem visualizar e entender as diferenças das condições físicas do solo; útil no monitoramento da qualidade do solo e raízes claramente visíveis. E as desvantagens são: dificuldades em extrair as amostras em solos altamente resistentes; requer amostrador forte; dificuldade em padronizar a quebra dos blocos por falta de visibilidade dos planos de fraqueza; necessita de um mínimo conhecimento sobre estrutura do solo; gasta-se muito tempo, devido à dificuldade que se tem em extrair o bloco e utiliza-se uma grande quantidade de solo para realizar a avaliação.

Porém, o método VESS proporcionou a primeira oportunidade no Brasil para avaliações da camada superficial, relevantes para a agronomia. No entanto, um aspecto importante para a aplicação bem-sucedida do método é a habilidade do operador. Necessita de um conhecimento sobre o solo, especialmente sobre a estrutura do solo, o qual aumenta as chances de que os escores sejam mais precisos (GIAROLA et al., 2013)

Segundo Giarola et al. (2013) os métodos baseados em avaliações de campo são úteis e permitem estabelecer estratégias de manejo com a vantagem de exigirem a utilização de poucos equipamentos e a possibilidade de interpretações imediatas.

Permitem examinar em detalhes, através de aspectos visuais da estrutura do solo (abundância e disposição dos agregados e de raízes) a sua qualidade estrutural e identificar camadas modificadas pelos sistemas de gestão adotados (KARLEN et al., 2015; MUELLER et al., 2009). Esses métodos podem variar desde testes facilmente compreendidos e rápidos até avaliações mais complexas, mas todos são projetados para ajudar na tomada de decisões de manejo do solo e ajudar os cientistas na aquisição de dados através de métodos simples, objetivos e de baixo custo, sobretudo em áreas com alta frequência de amostragem.

Apesar de subjetivos, comparados a outros métodos tradicionalmente utilizados (JOHANNES et al., 2017), segundo Ralisch (2017) tais métodos permitem obter informações relevantes para o monitoramento das práticas agrícolas e dos sistemas de produção, auxiliam no processo de transferência de tecnologias relacionadas aos impactos do manejo sobre a qualidade do solo por meio do diagnóstico das relações causa e efeito, a definição de estratégias a serem adotadas em um sistema de produção agropecuárias para melhoria da qualidade estrutural e, portanto, da fertilidade do solo.

Portanto, tanto análises de medidas dos atributos do solo através de métodos tradicionais de campo e de laboratório como avaliações visuais são de extrema importância para verificar o efeito de diferentes sistemas de uso e manejo na qualidade estrutural do solo e futuras recomendações, em áreas impactadas pelo processo de mineração de carvão. O estabelecimento de relações da análise visual da estrutura do solo com atributos físicos e químicos são fundamentais para melhor entendimento da evolução do processo de recuperação destas áreas degradadas (impactadas) com a implantação de diferentes plantas de cobertura.

2.4.4. Histórico da recuperação da área experimental de Candiota

Avaliar o progresso e o sucesso da recuperação de áreas mineradas, identificando diferentes indicadores de qualidade do solo é essencial para determinar quantitativamente a melhoria dos atributos dos solos construídos após a mineração (MUKHOPADHYAY et al. 2014).

O solo construído sob cultivo de *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum* cv. Pensacola, *Cynodon dactylon* cv. Tifton e *Urochloa brizantha*, objeto deste estudo, foi avaliado por Franco (2006) quando as espécies vegetais estavam implantadas a 5 meses, por Gonçalves (2008) quando as espécies vegetais estavam implantadas a 41

meses, por Miola (2010) quando as espécies estavam implantadas a 72 meses, por Castro (2012) quando as espécies vegetais estavam implantadas a 78 meses e por Stumpf (2015) quando as espécies vegetais estavam implantadas a 103 meses. Alguns dos resultados são relatados a seguir (Tabela 1):

Tabela 1: Exemplo de trabalhos realizados na área experimental de Candiota

Autores	Idade Experimento (meses)	Parâmetros	Camada	Valores médios
Franco (2006)	5	Agregados (1,00 - 0,25 mm)	0,0 - 0,10	32,67%
			0,10 - 0,20	26,68%
		Teor médio de Carbono	0,0 - 0,10	5,34 g kg ⁻¹
			0,10 - 0,20	5,18 g kg ⁻¹
Gonçalves (2008)	41	Agregados (1,00 - 0,25 mm)	0,0 - 0,10	40,13%
			0,10 - 0,20	35,73%
		Teor médio de Carbono	0,0 - 0,10	7,38 g kg ⁻¹
			0,10 - 0,20	6,20 g kg ⁻¹
Miola (2010)	72	Densidade	0,00 - 0,05	1,42 Mg m ³
		Tensão de preconsolidação	0,00 - 0,05	95,5 Kpa
Castro (2012)	78	macroagregados	0,0 - 0,10	87,56%
			0,10 - 0,20	81,15%
		Teor médio de Carbono	0,0 - 0,10	8,46 g kg ⁻¹
			0,10 - 0,20	6,39 g kg ⁻¹
Stumpf (2015)	103	macroagregados	0,0 - 0,10	88,15%
			0,10 - 0,20	91,60%
		Resistência Tensil	0,0 - 0,10	193,95 Kpa
			0,10 - 0,20	171,24 Kpa

2.5. Hipóteses

O método de avaliação visual da estrutura do solo é viável para identificar, a campo, a qualidade estrutural de um “solo construído” e vegetado com diferentes espécies vegetais, podendo ser utilizado como indicador da qualidade física de áreas drasticamente degradadas, e possibilita estabelecer correlações com atributos do solo tradicionalmente determinados.

2.6. Objetivos

2.6.1. Objetivo Geral

Validar a metodologia de avaliação visual da estrutura do solo (Visual Evaluation of Soil Structure – VESS) em um solo degradado pela mineração de carvão sob revegetação com diferentes espécies vegetais em experimento de longa duração (15 anos).

2.6.2. Objetivos específicos

- Avaliar e comparar a qualidade estrutural do solo utilizando a metodologia de avaliação visual da estrutura do solo;
- Correlacionar os resultados da avaliação visual com atributos físicos e químico do solo como densidade, porosidade, aeração e matéria orgânica em amostras com estrutura preservada; granulometria, diâmetro médio ponderado de agregados e resistência tênsil em amostras com estrutura não preservada; e resistência mecânica do solo a penetração, medida em campo;
- Verificar se os sistemas de avaliação visual refletem os diferentes efeitos das espécies implantadas na recuperação da estrutura do solo em áreas impactadas pelo processo de mineração de carvão;
- Verificar se as plantas utilizadas até o presente momento foram eficientes ou não na melhoria da qualidade estrutural do solo construído ao longo do tempo.

VALIDAÇÃO DA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS) EM SOLOS CONSTRUÍDOS DE ÁREAS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO

1. INTRODUÇÃO

As atividades de mineração de carvão superficial podem levar à destruição do meio ambiente das áreas de carvão, movimentando uma grande quantidade de vegetação, alterando as propriedades físicas e estruturais do solo, alterando a topografia e perturbando os regimes hidrológicos superficiais e subsuperficiais (ZHOU et al., 2017). Além do impacto visual, existem problemas associados ao desenvolvimento de drenagem ácida de mina nas águas superficiais e subterrâneas, erosão e compactação do solo construído e perdas de carbono durante a remoção, armazenamento e colocação do solo (STUMPF et al., 2016).

Solos construídos, por definição, consiste em material mineral do solo que mostra evidências da alteração antrópica intencional das propriedades do solo ou características da superfície da terra. O material alterado pode ser composto por material mineral do solo e/ou conter estéreis utilizados como emendas agrícolas, mas a maioria não demonstra evidência de que foram transportados de fora do pedon original (USDA, 2014).

Os solos construídos são jovens em termos de processos pedológicos e desenvolvimento de horizonte. Estes solos costumam ter alto nível de degradação e compactação, bem como baixos níveis de matéria orgânica (MO), em decorrência da mineração e recomposição topográfica da paisagem, dificultando drasticamente a recuperação da área. Logo, a utilização dos horizontes superficiais de solo que concentram MO e nutrientes, para cobrir solos construídos seguidos pela revegetação da área, é crucial para acelerar a recuperação da qualidade do solo (STUMPF et al., 2018).

Uma metodologia aplicada para a recuperação das áreas degradadas pela mineração tem sido realizada pela utilização de plantas de cobertura, a fim de minimizar os efeitos da compactação do solo e da erosão, promover o acúmulo de matéria orgânica, o desenvolvimento da fauna do solo e a ciclagem de nutrientes (JOSA et al., 2012). No entanto, é importante mencionar que a distribuição irregular de material superficial na superfície do solo pode agravar o nível de compactação do solo, sendo desfavorável para o estabelecimento das culturas de cobertura utilizadas para a revegetação e aumentar a vulnerabilidade do solo à erosão, retardando assim

a recuperação do ambiente degradado (ZHAO et al., 2016). Assim sendo, é importante monitorar a qualidade do solo para registrar a degradação, identificar uso e gestão inadequados e permitir que práticas sejam implementadas para amenizar o problema (GUIMARÃES et al., 2017).

Propriedades físicas fornecem informações de como a estrutura do solo está trabalhando para fornecer água, ar e nutrientes para as plantas, no entanto, a coleta de tais dados geralmente requerem tempo e equipamentos para as amostras serem transportadas para o laboratório de análises. Técnicas semi-quantitativas, como métodos de avaliação visual do solo, são testes rápidos e simples que oferecem avaliação numérica mais integral e holística da estrutura do solo e de sua qualidade física, uma vez que inclui na avaliação uma vasta gama de aspectos do solo, tais como força de rompimento dos agregados, forma, tamanho e porosidade (GUIMARÃES et al., 2017).

Originalmente, o método de avaliação visual de campo foi desenvolvido por Peerlkamp (1967) e posteriormente aprimorado e utilizado por Ball et al (2007) que analisa a aparência do bloco de solo após a quebra com as mãos, onde foi definido o termo qualidade estrutural (Qe). Métodos de avaliação visual estão sendo utilizados em vários países (BALL et al., 2007; SHEPHERD et al., 2009; MUELLER et al., 2009; MONCADA et al., 2014a; GUIMARÃES et al., 2017) e tem mostrado valor em explicar as diferenças no desempenho das culturas e no rendimento do tipo de gestão do solo (GUIMARÃES et al., 2013), para fornecer informações semelhantes através de outras medidas das condições físicas como carbono orgânico total, resistência tênsil, agregação do solo, porosidade, argila dispersa em água, entre outros requer várias medições e pode ser dispendioso e demorado.

Preocupações atuais sobre a degradação de recursos naturais do solo enfatizam importância da avaliação da estrutura do solo, uma componente chave da qualidade do solo, influenciado pelas propriedades químicas e biológicas. Procedimentos semiquantitativos para avaliação de estrutura utilizando avaliações visuais estão recebendo maior atenção nos dias atuais, notadamente em relação aos impactos de práticas agrícolas (EMMET-BOOTH et al., 2016).

Correlações entre técnicas de avaliações visuais e quantitativas medições do solo têm sido amplamente descritas, incluindo indicadores de qualidade física do solo, comparado com medidas quantitativas, as técnicas de avaliações visuais fornecem resultados rápidos e de fácil interpretação utilizando equipamentos de baixo custo

(GUIMARÃES et al., 2013). Diversos pesquisadores têm trabalhado para relacionar métodos visuais com outros indicadores de qualidade física do solo (SHEPHERD, 2003; MUELLER et al., 2009; MONCADA et al., 2014b; TUCHTENHAGEN et al., 2018

Guimarães et al (2011) demonstrou que o VESS se relaciona bem com a resistência tênsil de agregados quando quebrados pelas mãos. Assim, para encorajar pesquisadores e agricultores a usarem indicadores simples, mas precisos para avaliar e monitorar a qualidade estrutural do solo e da degradação do solo, há uma necessidade de estender a validação de análises visuais (MONCADA et al., 2014b).

Considera-se que o método de avaliação visual da estrutura do solo pode ser viável para identificar, a campo, a qualidade estrutural de um solo construído e vegetado com diferentes espécies vegetais, podendo ser utilizada como indicador da qualidade física de áreas drasticamente degradadas, e possibilita estabelecer correlações com atributos do solo tradicionalmente determinados. Sendo assim, validar a metodologia de avaliação visual da estrutura do solo em solos construídos correlacionando seus resultados com as condições físicas de um solo construído após mineração de carvão é o principal objetivo do presente estudo, verificando as espécies de plantas mais adequadas para promover a recuperação da qualidade dos solos minerados, principalmente no que diz respeito à melhoria da estrutura do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área experimental

A mina de carvão de Candiota, pertence à Companhia Riograndense de Mineração (CRM), que se localiza no município de Candiota, a 140 km de Pelotas, no Estado do Rio Grande do Sul (Figura 2). O clima da região é classificado como sendo do tipo Cfa, ou seja, subtropical úmido de acordo com a classificação de Wilhelm Koppen. As coordenadas geográficas do ponto central são: 31°33'56''S e 53°43'30''W.

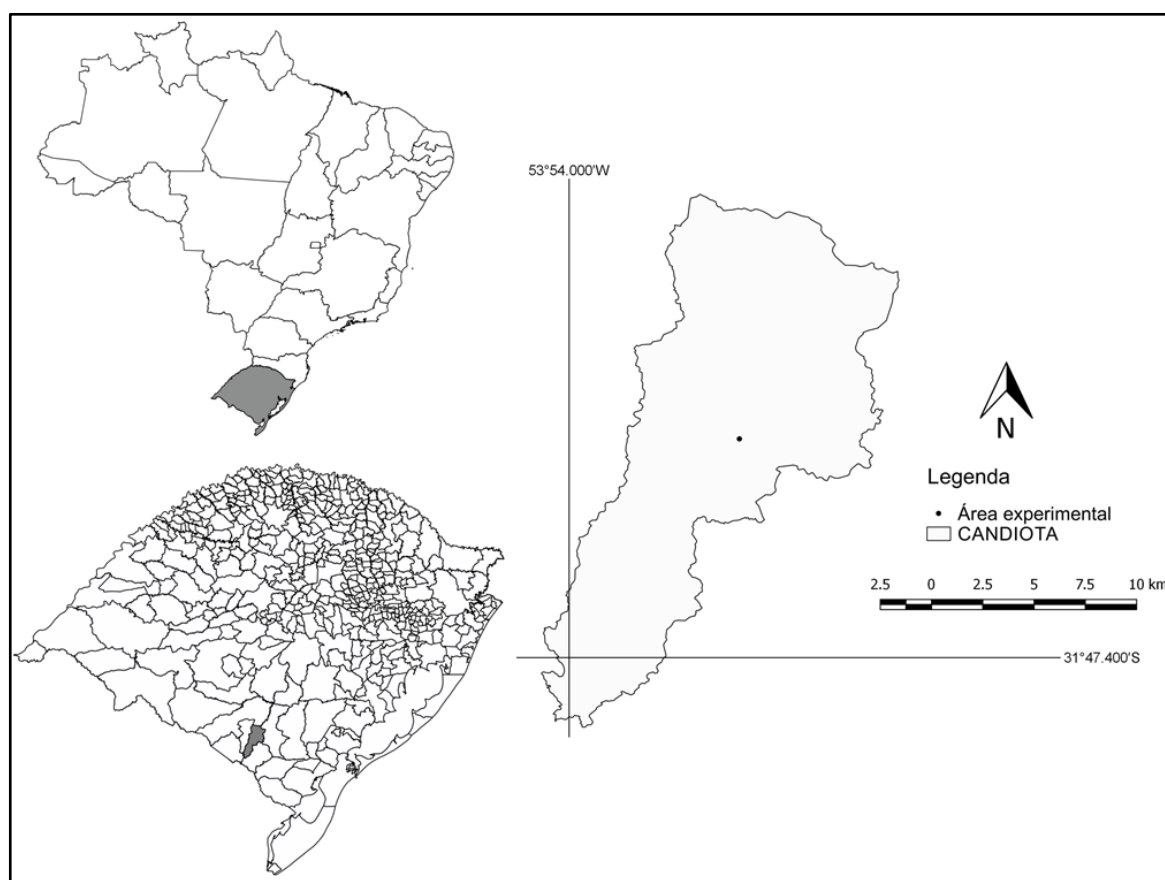


Figura 2: Localização da área de mineração de carvão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM) no município de Candiota-RS.

A seleção da área experimental no interior da Mina foi feita em conjunto com técnicos da CRM, em uma área recém construída, início de 2003 (Figura 3), com as operações de preparo da área iniciada em setembro de 2003.



Figura 3: Imagem aérea da área experimental mantida pelo Departamento de Solos da Ufpel em Candiotá-RS (Google Earth).

O primeiro experimento foi instalado em novembro/dezembro de 2003, em parcelas de 20 m² (5m x 4m) em delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com quatro repetições. A camada de solo reposta na área experimental é procedente do solo natural (original) retirada da área pré-minerada, sendo o solo classificado como um Argissolo Vermelho Eutrófico Típico, de classe textural argilosa (Tabela 2), cor vermelho escura (2,5YR 3,5/6) e com baixo teor de matéria orgânica (1,15%).

Tabela 2: Valores médios de areia, silte e argila nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m de um solo construído em área de mineração de carvão, submetido ao cultivo de quatro gramíneas.

Camada	Areia	Silte	Argila	Classe textural
--- m ---	----- g kg ⁻¹ -----			
0,00-0,10	300,02	249,08	450,90	Argilosa
0,10-0,20	299,57	224,86	475,57	Argilosa

Antes da instalação do experimento, em face da área se encontrar extremamente compactada devido à grande circulação de máquinas durante a construção do solo, o solo construído foi escarificado com patola a uma profundidade aproximada de 0,15m (Figura 4a), seguido por calagem correspondente a 10,4 Mg/há

Nas parcelas foram utilizadas poáceas perenes de verão, com período estival no inverno, solteiras ou consorciadas com Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoï*), compondo os seguintes tratamentos: T1-Hemártria (*Hematria altíssima* (Poiz.) Staff & C. E. Huhh), T2-Tifton (*Cynodon dactylum* (L.) Pers. cv. Tifton 85) + Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoï*), T3-Hemártria (*Hematria altíssima* (Poiz.) Staff & C. E. Huhh) + amendoim Forrageiro (*Arachis pintoï*), T4-Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé Var. *sausae* Pacodi cv. Pensacola), T5-Tifton (*Cynodon dactylum*(L.) Pers. Cv Tifton 85), T6-Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé Var. *Sausae* Pacodi cv. Pensacola) + Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoï*), T7a-Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé Var. *sausae* Pacodi cv. Pensacola), T7b-Urochloa humidícola (*Urochloa humidicola*) + Urochloa brizanta (*Urochloa brizantha*), T7c Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoï*). As espécies de inverno foram estabelecidas por sorteio nas subparcelas, conforme mostra a Figura 4. Cabe ressaltar que o amendoim forrageiro, apesar de se desenvolver inicialmente, ao longo do tempo teve seu crescimento reduzido, desaparecendo por completo no terceiro ano (2006). O mesmo aconteceu, por competição com as espécies, festuca e o cornichão. Com isso, o experimento ficou reduzido apenas com as poáceas solteiras: Hemártria (T1), Grama Tifton (T4), Pensacola (T5) e a Urochloa brizanta, considerado tratamento controle (Cr-T7b).

O segundo experimento (Figura 6) foi instalado em área adjacente/intercalada com o experimento1 no verão 2007 com culturas de verão, propagadas por sementes (Capim vaquero: *Cynodon dactilon*; Urochloa brizanta: *Urochloa brizantha*; Tanzânia: *Panicum maximun*; Urochloa humidícola: *Brachiaria humidicola*; Capim de Rhodes: *Cloris gayana*; Grama batatais: *Paspalum notatum*), em consórcio nas subparcelas com a Hemártria e a Grama Tifton, seguindo delineamento aos moldes do experimento 1 (Figura 6). A Grama Tifton e a Hermatria foram escolhidas como consórcio por terem sido as plantas de cobertura do experimento 1 que melhor se adaptaram ao solo construído, apresentando os melhores resultados na recuperação dos atributos do solo até aquele momento.

Os tratamentos com Capim de Rhodes e com Grama batatais apresentaram um desenvolvimento insatisfatório, provavelmente devido à baixa qualidade das sementes. Os tratamentos consorciados também não se estabeleceram, até o momento, pois as Urochloas e a Tanzânia, devido ao efeito de sombreamento não

permitiram um desenvolvimento satisfatório da Hermatria e da grama Tifton pois ambas têm desenvolvimento rasteiro.

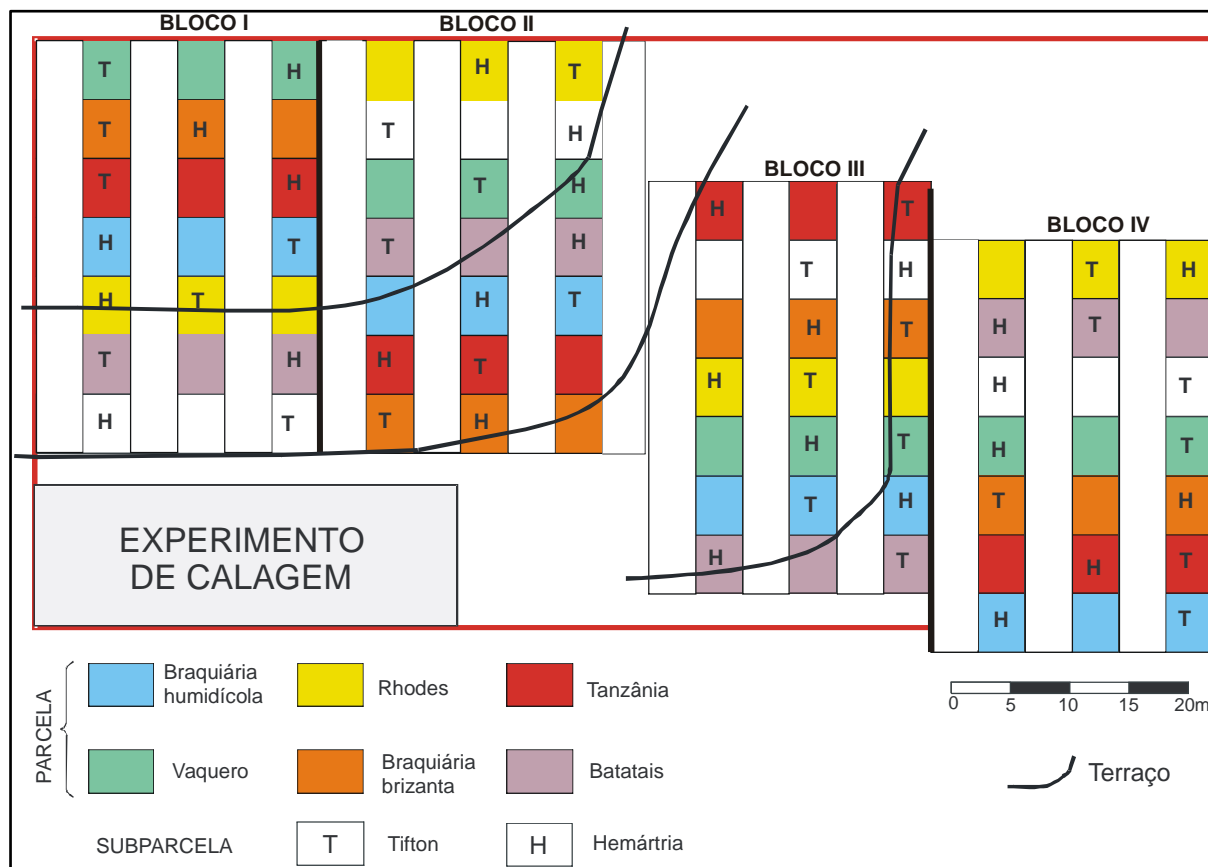


Figura 6: Croqui e delineamento da área experimental 2

2.2. Amostragem do solo

Em abril de 2018, com 175 meses de condução do primeiro experimento, a amostragem do solo foi realizada nas camadas de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m. Foram coletadas 2 amostras de solo com estrutura não preservada por tratamento, totalizando 32 amostras (1 amostra x 2 camadas de solo x 4 blocos x 4 tratamentos), que em laboratório foram destorroadas manualmente em seus pontos de fraqueza e secas ao ar, para determinação de atributos físicos (resistência tênsil de agregados (RT), distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho e diâmetro médio ponderado de agregados) e atributos químicos (matéria orgânica (MO)). As amostras de solo foram mantidas à sombra e secas ao ar, destorroadas com rolo de madeira e passada em peneira com abertura de malha de 2 mm.

Também foram coletadas 128 amostras com estrutura preservada, utilizando cilindros de aço (0,050m de altura e 0,047m de diâmetro) no centro das camadas de

0,00-0,10m e 0,10-0,20m (4 blocos x 4 tratamentos x 4 repetições por parcela x 2 camadas), para a determinação da densidade do solo, da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade.

2.3. Análise Visual da Estrutura do Solo

Para a avaliação visual da estrutura do solo foi utilizada a metodologia descrita por Ball et al. (2011). Em cada ponto de amostragem, uma amostra de solo com profundidade de 0 – 25 cm foi coletada para realização da Análise Visual da Estrutura do Solo (VESS). Utilizando a metodologia do VESS, uma fatia de solo com aproximadamente 10 cm de espessura, 20 cm de largura e 25 cm de profundidade foram coletadas com auxílio de uma pá de corte ao longo das parcelas dos experimentos.

A profundidade do solo e as camadas identificadas com qualidade contrastante do solo, após a separação manual inicial, foram medidos e um escore (Sq) de qualidade do solo atribuído a cada camada usando o gráfico de referência VESS – Sq varia de 1 (boa qualidade do solo) a 5 (baixa qualidade do solo) conforme a tabela de classificação (Figura 7). As características observadas para a atribuição de uma pontuação incluem tamanho e forma dos agregados; porosidade interna dos agregados, dificuldade de romper a tensão entre os agregados; e forma e posição das raízes (GUIMARÃES et al., 2011). A pontuação geral para cada ponto amostral foi obtida ao calcular a média ponderada usando a profundidade de cada camada e o Sq da camada correspondente.





















Qualidade Estrutural	Tamanho e aparência dos agregados	Porosidade visível e raízes	Aparência depois do manuseio: vários solos	Aparência depois do manuseio: mesmo solo diferentes manejos	Característica distintiva	Aparência e descrição de agregados naturais ou fragmento reduzido de ~ 1,5 cm de diâmetro
Qe1 Friável Agregados quebram facilmente com os dedos	Maioria < 6 mm após a quebra	Alta porosidade Raízes por todo solo			 Agregados pequenos	 A ação de quebrar o bloco é suficiente para revelá-los. Agregados grandes são compostos por agregados menores, presos pelas raízes.
Qe2 Intacto Agregados quebram facilmente com uma mão	Uma mistura de agregados porosos e redondos entre 2 mm – 7 cm Sem presença de torrões	Maioria dos agregados são porosos Raízes por todo solo			 Agregados altamente porosos	 Agregados quando obtidos são redondos, muito frágeis, despedaçam muito facilmente e são altamente porosos.
Qe3 Firme Maioria dos agregados quebram com uma mão	Uma mistura de agregados porosos entre 2mm -10 cm; menos de 30% são <1 cm. Alguns torrões angulares não porosos podem estar presentes	Macroporos e fissuras presentes Porosidade e raízes: ambas dentro dos agregados			 Agregados com baixa porosidade	 Fragmentos de agregados são razoavelmente fáceis de serem obtidos. Apresentam poucos poros e são arredondados. Raízes geralmente crescem através dos agregados.
Qe4 Compacto Quebrar agregados com uma mão requer esforço considerável	Maioria > 10 cm e são sub-angulares não porosos; possibilidade de horizontalização; menos que 30% são <7 cm	Poucos macroporos e fissuras Raízes agrupadas em macroporos e ao redor dos agregados			 Macroporos bem distintos	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, em forma de cubo muito angulosos e pontudos e apresentam fissuras internamente.
Qs5 Muito compacto Difícil quebra	Maioria são maiores que > 10 cm, muito poucos < 7 cm, angular e não poroso	Porosidade muito baixa. Macroporos podem estar presentes. Pode conter zonas anaeróbicas Poucas raízes e restritas a fissuras			 Cor azul-acinzentada	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, no entanto, considerável força é necessária. Geralmente não apresentam poros ou fissuras.

Figura 7: Tabela de classificação (Guimarães et al., 2011), que define as características distintivas em cada uma das cinco categorias de qualidade

2.4. Análises Físicas e Química

2.4.1. Análises de Solo com Estrutura não Preservadas

Na avaliação da RT, as amostras foram destorroadas manualmente nos planos de clivagem, para não provocar a compactação ou a ruptura dos agregados. Foram utilizadas 640 amostras (20 agregados x 2 camadas de cada amostra x 4 blocos x 4 tratamentos), que em laboratório foram destorroadas manualmente em seus pontos de fraqueza e secas ao ar, para determinar a resistência de agregados (RT).

Para determinação da RT, utilizou-se um atuador eletrônico linear a uma velocidade constante de 4 mm/s (MA 933 fabricado pela empresa Marconi LTDA). Antes da aplicação da força, cada agregado foi mensurado quanto a massa e aferido com um paquímetro digital, obtendo-se o diâmetro a partir de sua altura, sua largura e seu comprimento. Após os ensaios, os agregados foram secos em estufa a 105°C por 24 h, determinando-se a umidade gravimétrica, conforme Teixeira et al. 2017. Cada agregado foi acomodado na posição mais estável, para a aplicação da carga de 20 kgf. O valor da força aplicada para ruptura tênsil do agregado foi registrado em um

sistema eletrônico de aquisição de dados, sendo RT calculada conforme Dexter & Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (1)$$

Onde:

0,576 = constante de proporcionalidade, refletindo a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado;

P = força aplicada (N);

D = diâmetro efetivo dos agregados (mm), calculado conforme Watts & Dexter (1998):

$$D = Dm \left(\frac{M}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Onde:

Dm = diâmetro médio do agregado (mm);

M = massa do agregado individual (g);

M₀ = massa média dos agregados de cada tratamento (g)

Para as determinações da distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho e do diâmetro médio ponderado (DMP) foram utilizadas amostras secas ao ar, passadas na peneira de 9,52 mm, com base no peneiramento úmido, seguindo o princípio do método descrito por Kemper & Rosenau (1986) e adaptado por Palmeira et al. (1999), que utiliza o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936). Os intervalos das classes foram: C1: 9,52 – 4,76 mm; C2: 4,76 – 2,00 mm; C3: 2,00 – 1,00 mm; C4: 1,00 – 0,25 mm; C5: 0,25 – 0,105 mm e C6: < 0,105 mm.).

Em cada jogo de peneiras, a amostra de agregados foi colocada sobre a peneira de maior malha, contendo um papel de filtro para retenção do solo até que este fosse saturado por capilaridade, durante 10 minutos. Depois do solo saturado o papel foi retirado e, com o auxílio de jatos de água de baixa pressão, lavado de modo a não perder material. Em seguida o aparelho de Yoder foi acionado por 15 minutos, com movimento vertical de 30 oscilações por minuto. Ao final, o solo retido em cada peneira foi transferido para cápsulas de alumínio com auxílio de jatos de água fracos, dirigidos ao fundo da peneira e, em seguida, colocado na estufa para secagem, sendo posteriormente pesado.

Para o cálculo dos agregados nas diferentes classes de tamanho e do DMP, utilizaram-se respectivamente as equações 1 e 2 (PALMEIRA et al., 1999):

$$AGRi = \frac{MAGRi - mi}{\sum_{i=1}^n MAGRi - mi} \quad (3)$$

Onde:

AGRi = proporção de agregados estáveis em água em determinada classe i (g kg⁻¹);

MAGRi = massa de agregados + material inerte na classe i (g);

mi = massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura, etc.) na classe i (g);

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^n DMi (MAGRi - mi)}{\sum_{i=1}^n MAGRi - mi} \quad (4)$$

Onde:

DMi = diâmetro médio da classe i (mm);

MAGRi = massa de agregados + material inerte na classe i (g);

mi = massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura, etc.) na classe i (g).

Os intervalos das classes dos agregados foram: C1: 9,52-4,76mm; C2: 4,75-2,0mm; C3: 1,99-1,00mm; C4: 0,99-0,25mm; C5: 0,24-0,105mm e C6: <0,104mm. A partir dessas classes, os agregados foram separados em macroagregados (agregados maiores ou iguais a 0,25mm) e microagregados (agregados menores que 0,25mm) de acordo com Tisdall & Oades (1982).

Para determinação do carbono orgânico, utilizou-se o método Walkley-Black, em amostras deformadas (TEIXEIRA et al., 2017)

2.4.2. Análise de Solo em Estrutura Preservada

As amostras com estrutura preservada foram utilizadas para a determinação da densidade do solo, da porosidade total, da macroporosidade e da microporosidade. Estas amostras, após toalete no Laboratório de Física do Solo, foram saturadas em água por capilaridade durante 48 h para garantir completa saturação e em seguida pesadas em balança de precisão e colocadas em uma mesa de tensão, onde foram equilibradas a uma tensão de 6kPa. Após o equilíbrio as amostras foram secas em estufa a 105°C até peso constante para a determinação da macroporosidade, microporosidade e da densidade do solo. A porosidade total foi calculada pela soma

da macroporosidade e microporosidade e a densidade do solo pela relação massa de solo seco pelo volume do cilindro (EMBRAPA, 2011).

2.4.3. Determinação da Resistência à Penetração no solo

Foram obtidos dados de resistência do solo à penetração (RP) em 3 pontos amostrais por parcela, totalizando 48 pontos amostrais (4 blocos x 4 tratamentos x 3 repetições por parcela). Dada a influência da umidade na resistência do solo à penetração coletou-se 32 amostras de solo (4 blocos x 4 tratamentos x 2 camadas) para a determinação da umidade gravimétrica.

A resistência do solo à penetração foi determinada até a profundidade de 0,20m utilizando-se um penetrômetro de impacto (STOLF, 1984).

Para o cálculo da resistência à penetração (MPa) utilizou-se a equação de Stolf (1991):

$$RP \text{ (kgf cm}^{-2}\text{)} = 5,6 + 6,89 N \text{ (5)}$$

Onde:

RP= Resistência à penetração no solo

N = número de impactos dm^{-1} .

Para a conversão de RP de kgf cm^{-2} para MPa, multiplicou-se o resultado obtido por 0,098. Os resultados foram apresentados em valores médios para as camadas de 0,00-0,10m, 0,10-0,20m.

2.5. Análise Estatística dos Dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, havendo efeito de tratamento, as médias foram avaliadas pelo método de Correlação de Pearson ($p < 0,05$) para verificar se existe uma correlação positiva entre os atributos físicos do solo analisado com os resultados do VESS. Todas as análises foram realizadas por meio do software estatístico SIGMAPLOT (SIGMAPLOT, 2004).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise Visual da Estrutura do Solo

São apresentados os escores da avaliação visual da estrutura do solo obtidos no solo construído após 175 meses de revegetação cultivado com diferentes gramíneas perenes de verão (Figura 10). Observa-se que tanto nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, o *Cynodon dactylon* (Figura 10d) foi a espécie que proporcionou uma qualidade física inferior em relação às demais espécies, apresentando um escore de qualidade estrutural (Sq) médio de 3,13 e 4,65 respectivamente (Figura 10d), o que significa que os agregados são firmes ou compactados, angulares e sub angulares, variando entre 2mm e > 10 mm de tamanho, com presença de raízes agrupadas em macroporos e fissuras e ao redor dos agregados.

As demais gramíneas apresentaram um Sq médio < 3 na camada de 0,00-0,10 m, o que evidencia a presença de agregados porosos e redondos, entre 2 mm – 7 mm de tamanho e sem a presença de torrões, enquanto que na camada de 0,10-0,20 m o Sq médio variou de 2,75 a 3,43 (Figura 10a,10b e 10c). Apesar das diferenças entre os escores, se verifica que todas as espécies proporcionaram um Sq entre 2 e 3 na maioria das repetições até a profundidade de 0,10 m, embora ainda tenha se observado a presença de alguns agregados mais firmes, angulares e resistentes à quebra (Figura 8).



Figura 8: Amostra de agregado do solo mais firme, angular e resistente a quebra. Fonte: Autor

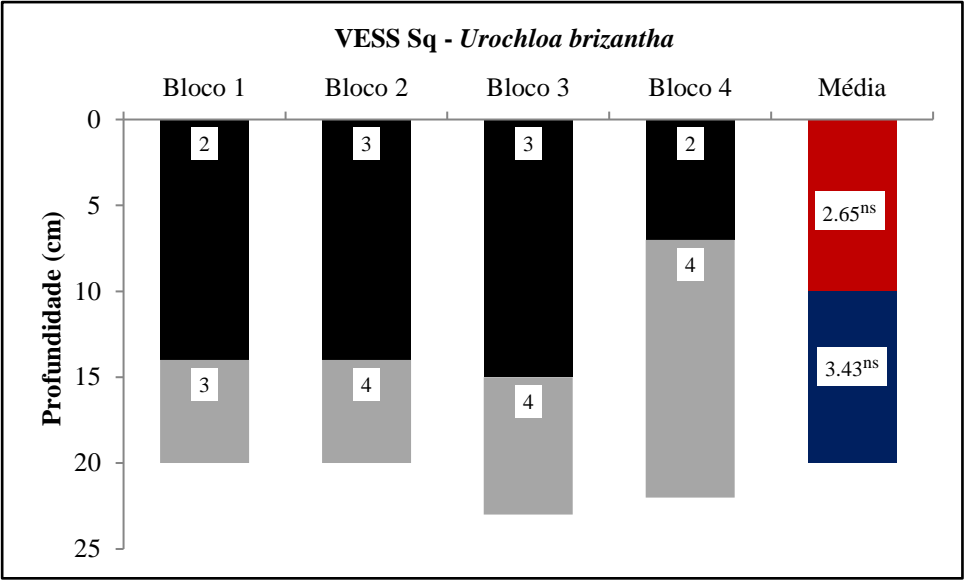
Na camada de 0,10-0,20 m as espécies *U. brizantha*, *P. notatum* e *C. dactylon* apresentaram repetições com S_q entre 4 e 5 (Figura 1a, 1c e 1d), o que caracteriza a presença de grandes torrões sub-angulares, que necessita de um esforço considerável para quebrar os agregados com as mãos (Figura 9).



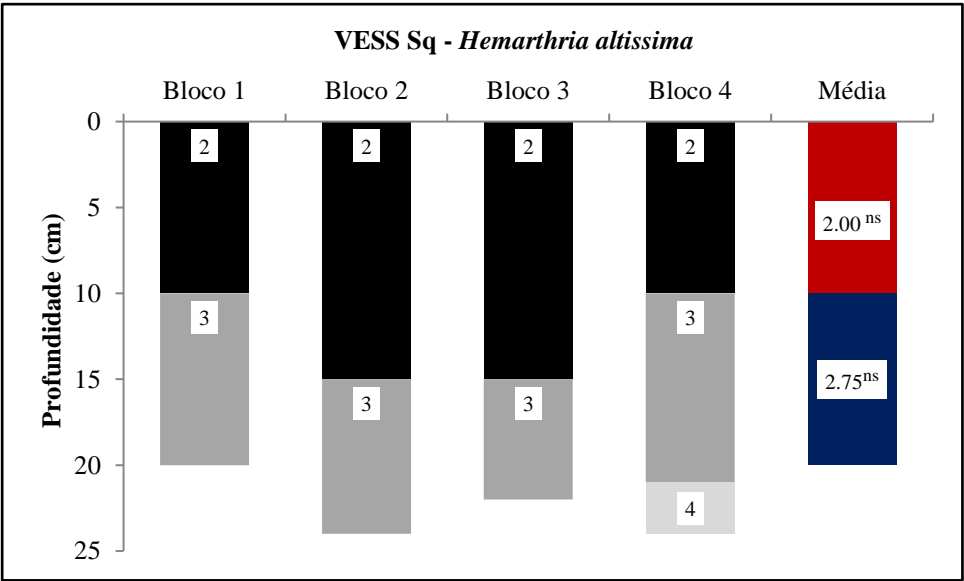
Figura 9: Amostra de agregados com presença de torrões, sub-angulares com necessidade de esforço para quebra. Fonte: Autor

Após 15 anos de recuperação, o destaque entre as espécies foi a *H. altissima* que promoveu na profundidade de 0,20 m os melhores escores de VESS. Importante notar que em todas as repetições na camada de 0,00-0,10 m observou-se um S_q 2, enquanto que na camada de 0,10-0,20 m o S_q variou de 2 a 3 (Figura 10b).

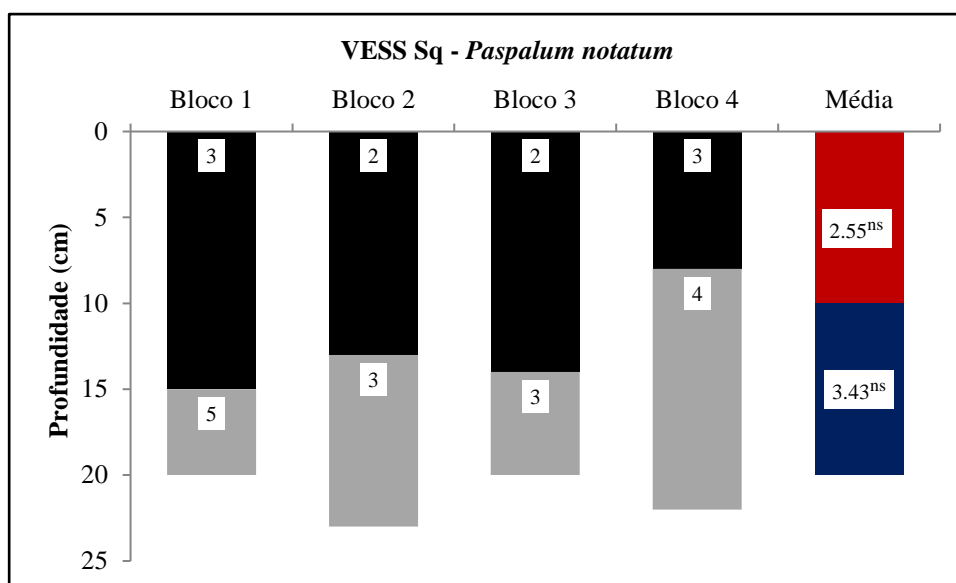
a)



b)



c)



d)

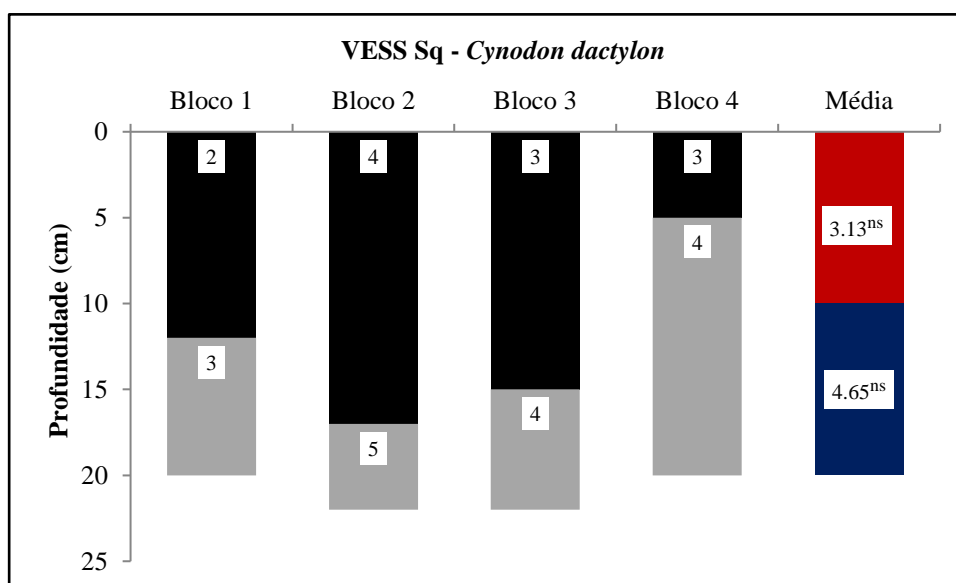


Figura 10: Repetições e médias dos escores de qualidade estrutural (Vess Sq) do solo construído sob revegetação da *U. brizantha* (a), *H. altissima* (b), *P. notatum* (c) e *C. dactylon* (d).

3.2. Propriedades Físicas e Química

Após 15 anos de revegetação verificou-se que os valores de resistência tênsil (Figura 11), de resistência à penetração (Figura 12), de densidade do solo (Figura 13) foram inferiores na camada de 0,00-0,10m em relação às camadas de 0,10-0,20 m. Já os valores de porosidade total (Figura 15) e os teores de matéria orgânica (MO) (Figura 16) foram superiores na camada de 0,00-0,10m em relação às camadas de 0,10-0,20 m. Os resultados acima, convergem com os escores de VESS observados nas mesmas camadas (Figura 10).

Para a RT observa-se que na camada de 0,00 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m do solo construído, os tratamentos com as diferentes gramíneas (*U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *Cynodon dactylon*) não apresentaram diferenças entre si, entretanto, verifica-se que a eficiência das raízes das espécies na camada superior de 0,00 – 0,10 m resultaram em valores próximos entre si. Todas as espécies apresentaram menores valores de RT na camada de 0,00 – 0,10 m (entre 89,77 – 106,14 KPa) em relação a camada subjacente, onde os valores oscilaram entre 112,45 – 151,59 KPa (Figura 11). Apesar de não apresentarem diferenças estatísticas entre si, a espécie *H. altissima* foi a que apresentou o menor valor absoluto de RT tanto na camada de 0,00 – 0,10 m (97,11) quanto na camada de 0,10- 0,20 m (112,45) em relação as demais espécies.

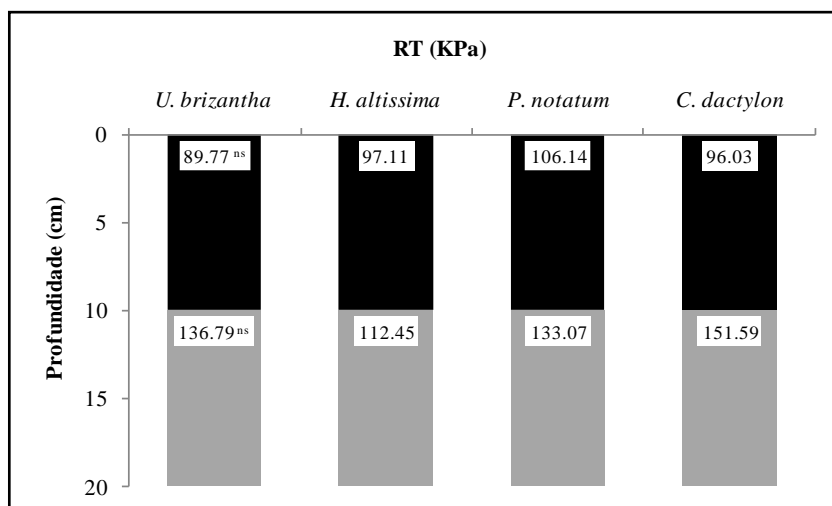


Figura 11: Médias da porcentagem de resistência tênsil de agregados (KPa) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob *U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *C. dactylon*.

Na RP verifica-se que a espécie *H. altissima* apresentou um valor significativamente menor (3,66 MPa) e as demais espécies variaram entre (4,85 e 5,22 MPa) na camada de 0,10 – 0,20 m (Figura 11). Contudo, mesmo não havendo diferença significativa na camada de 0,00 – 0,10 m, a mesma espécie obteve uma RP menor que 2 Mpa. As demais espécies oscilaram seus valores entre 2,20 e 2,60 MPa. O valor de RP crítico ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas tem-se situado entre 1 e 3,5 MPa, pois dependem do tipo de planta, teor de argila no solo e sistema de manejo do solo. Contudo, o valor de 2 MPa tem sido, geralmente, utilizado como um valor de RP limitante (DRESCHER et al., 2012), isto significa que após 175 meses de revegetação, o solo minerado ainda apresenta certo grau de compactação na

camada abaixo de 0,10m para o desenvolvimento radicular, com reflexos negativos quanto ao rendimento das culturas implementadas no experimento.

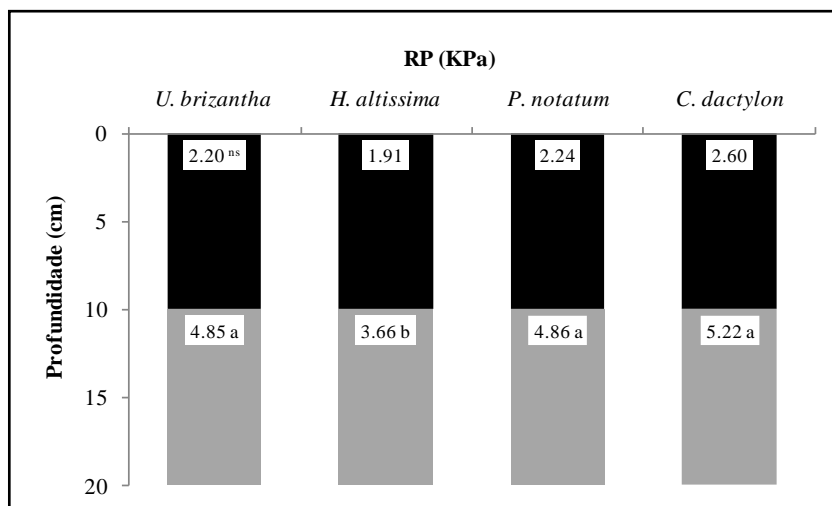


Figura 12: Médias da porcentagem de resistência à penetração (KPa) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob *U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *C. dactylon*.

Comportamento semelhante foi observado em relação a DS, onde na camada de 0,00 – 0,10 m as diferentes gramíneas não apresentaram diferença significativa entre si, com valores que oscilaram entre 1,32 e 1,39 Mg m⁻³ (Figura 13). Entretanto, na camada de 0,10 – 0,20 m, a *U. brizantha*, a *H. altissima* e a *P. notatum* foram as espécies que apresentaram os menores valores de DS (entre 1,39 a 1,45 Mg m⁻³) em relação ao *C. dactylon* que apresentou DS de 1,54 Mg m⁻³. Em solos agrícolas existem indicações de limites críticos de DS ao crescimento radicular, porém esses são variáveis para diferentes tipos de solos e plantas. Para Reichert et al. (2003), para solos com textura argilosa (> 55% de argila) a densidade crítica está entre 1,30 e 1,40 Mg.m⁻³. Portanto todas as espécies na camada de 0,00 – 0,10 m apresentam-se dentro deste limite após 15 anos de condução do experimento. Na camada de 0,10 – 0,20 m a maioria dos valores apresentam-se acima de 1,40 Mg.m⁻³ o que implicaria em impedimento ao desenvolvimento radicular. Contudo, Stumpf et al. (2016) observaram, na mesma área de mineração aos 8 anos de revegetação (46,55% de argila), a presença de raízes, com densidade radicular de 2,78 – 13,29 Mg.m⁻³, na camada de 0,00 – 0,10 m quando esta apresentava uma DS média de 1,34 Mg.m⁻³, bem como observaram uma densidade radicular entre 0,87 – 6 Mg.m⁻³ na camada de 0,10 – 0,20 m quando a DS era superior a 1,50 Mg.m⁻³. Isto reflete no potencial de

recuperação de todas as espécies avaliadas, as quais conseguem se desenvolver acima dos limites estabelecidos para solos agrícolas.

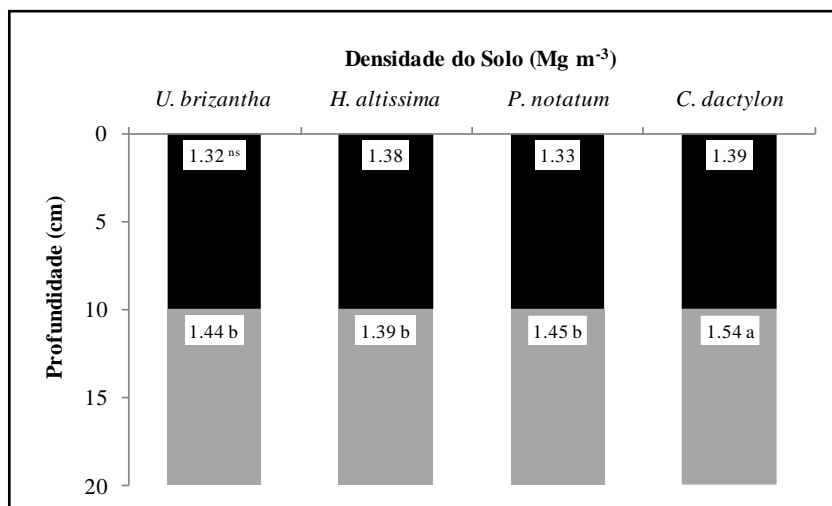


Figura 13: Médias da densidade do solo (Mg.m⁻³) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob *U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *C. dactylon*.

Em relação aos valores de Ma observa-se que na camada de 0,00 – 0,10 m os tratamentos também não apresentaram diferença significativa entre si, com valores oscilando entre 0,13 a 0,16 m³m⁻³ (Figura 14a). Entretanto na camada de 0,10 – 0,20 m verifica-se que a espécie *U. brizantha* proporcionou o maior volume de Ma (0,17 m³m⁻³) em relação ao *C. dactylon* (0,10 m³m⁻³). Verifica-se que a *H. altissima*, juntamente com a *P. notatum* promoveu uma Ma intermediária, no valor de 0,13m³m⁻³. Após 175 meses de revegetação, o solo minerado apresentou até a profundidade de 20 cm um volume de macroporos não restritivo ao desenvolvimento radicular das espécies. Importante ressaltar que a camada de 0,10 – 0,20 ainda apresentava uma Ma restritiva para a maioria das espécies aos 103 meses de revegetação conforme abordado por Stumpf et al (2016).

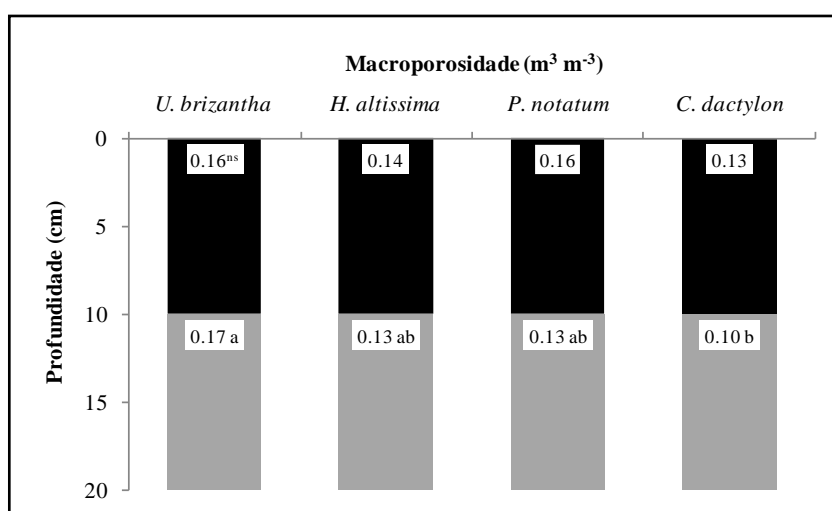
Em relação a Mi (Figura 14b), em ambas as camadas todos os tratamentos obtiveram resultados semelhantes, sem diferenças significativas entre as espécies, com valores que variaram entre 0,35 a 0,36 m³m⁻³ na camada de 0,00 – 0,10 m e entre 0,33 a 0,35 m³m⁻³ na camada de 0,10 – 0,20 m.

Para a variável de PT observa-se que na camada de 0,00 – 0,10 m os tratamentos também não apresentaram diferença significativa entre si, com valores oscilando entre 0,48 a 0,52 m³m⁻³ (Figura 15). Entretanto na camada de 0,10 – 0,20 m verifica-se que a espécies *U. Brizantha* e *H. Altíssima* obtiveram melhores

resultados de PT, $0,50 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,48 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ respectivamente, havendo uma diferença significativa quando comparados com os resultados obtidos com a espécie *C. Dactylon* ($0,42 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$).

Segundo Kiehl (1979), o espaço poroso deve ser ocupado por 33% de Ma e 67% de Mi. Para Genro et al. (2009), essa relação de Ma e Mi em relação à PT indica boa relação entre a capacidade de aeração e a retenção de água no solo. Nesse sentido, se observou no presente estudo que apenas a *U. brizantha* obteve essa proporção resultando 32,7% de Ma e 67,3% de Mi na camada de 0,00 – 0,10 m, enquanto que na camada de 0,10 – 0,20 m apresentou 34% de Ma e 66% de Mi. As demais espécies obtiveram valores inferiores a 30% de Ma e superiores a 70% de Mi em ambas as camadas avaliadas.

a)



b)

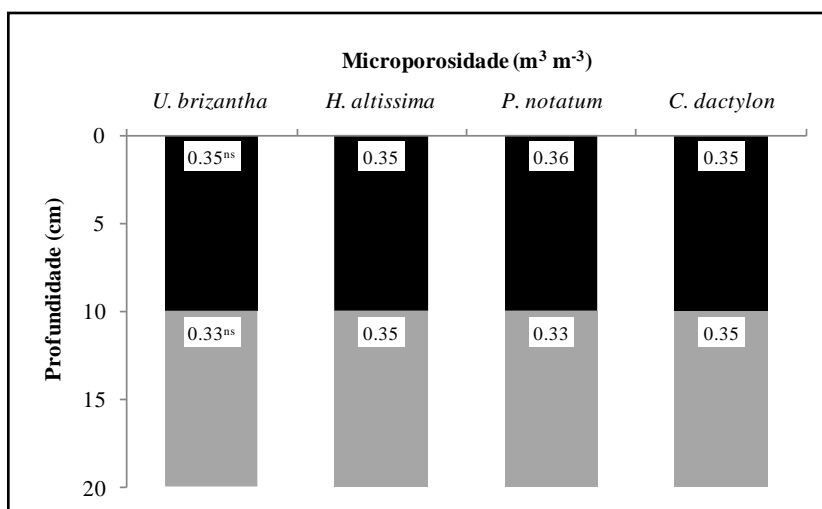


Figura 14: Médias de Macroporosidade (a) e Microporosidade (b) do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob *U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *C. dactylon*.

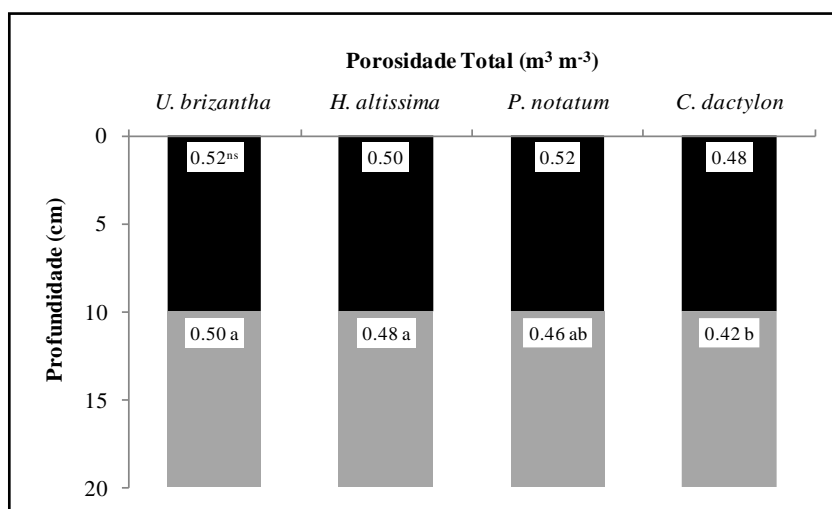


Figura 15: Médias de Porosidade Total do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob *U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *C. dactylon*.

Os valores de MO observados após 175 meses de revegetação (Figura 16) mostram que, não houve diferença significativa entre as gramíneas na camada de 0,00 – 0,10 m, enquanto que na camada de 0,10 – 0,20 m a *P. Notatum* apresentou o maior teor ($18,70 \text{ g kg}^{-1}$) em relação a *U. brizantha* ($10,64 \text{ g kg}^{-1}$). Como esperado, os maiores teores de MO foram observados na camada superficial, reflexo da possível maior concentração de raízes e deposição de serrapilheira. No entanto, estes valores ainda se encontram em níveis muito baixos ($< 2,5\%$) para os solos do Rio Grande do Sul (CQFS/RS/SC, 2016), evidenciando o quão lento é processo de formação de teor de matéria orgânica em solos minerados.

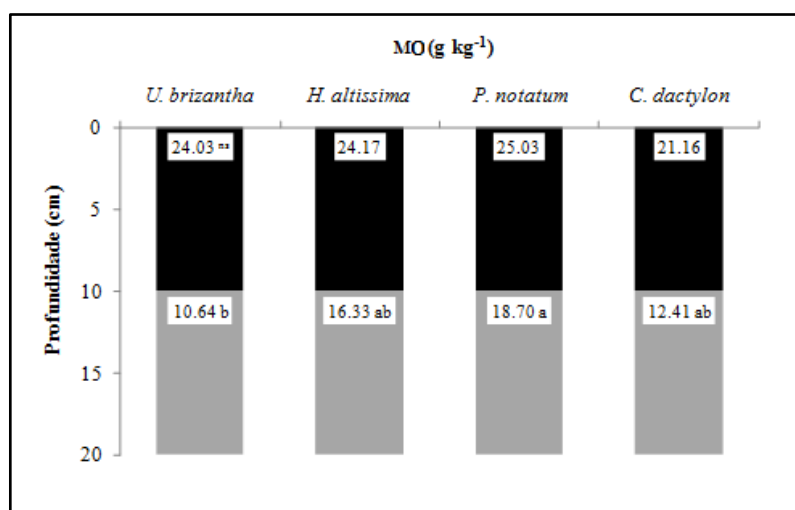
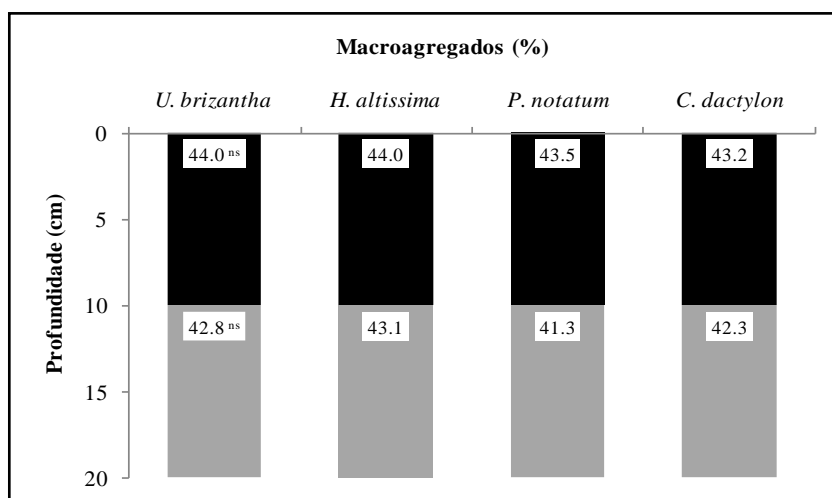


Figura 16: Médias de MO do solo ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob *U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *C. Dactylon*

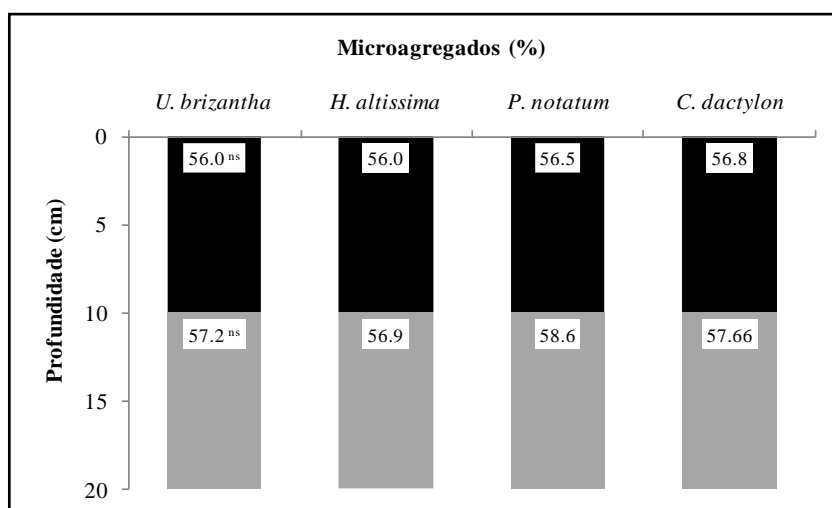
Em relação à agregação do solo construído, as plantas não promoveram diferenças significativas entre si em ambas as camadas avaliadas (Figura 17). Contudo, se observou que em todas as espécies a proporção entre macroagregados foi similar entre as camadas, isto é, enquanto que na camada de 0,00 – 0,10 m a porcentagem variou de 43,2 a 44%, na camada de 0,10 – 0,20 m esta proporção variou de 41,3 a 42,8% (Figura 17a). Comportamento similar foi observado em relação a porcentagem de microagregados, a qual variou de 56 – 56,8% na camada de 0,00 – 0,10 m, enquanto que na camada de 0,10 - 0,20 m variou 56,9 a 58,6% (Figura 17b). Por outro lado, os valores de DMP foram superiores na camada de 0,00 – 0,10 m (1,12 – 1,39 mm) em relação a camada de 0,10 – 0,20 m (0,97 a 1,17 mm) (Figura 17c), refletindo possivelmente a atuação vigorosa do sistema radicular das espécies avaliadas. Este resultado mostra que houve continuidade na desagregação do solo construído ao longo do tempo, pois Stumpf et al. (2016) observaram aos 8 anos de revegetação que as raízes das gramíneas haviam promovido a recuperação da condição física de solo na camada 0,00 – 0,10 m através da formação de novos agregados, com a consequente diminuição da DS e um incremento da Ma do solo em relação a camada subjacente, fatos que também foram observados neste estudo.

A similaridade entre a porcentagem de macroagregados e microagregados nas camadas de 0,00-0,10m e 0.10-0,20 m, e o menor valor de DMP observado na camada de 0,10 – 0,20 m refletem a ação das raízes na desestruturação da camada compactada observada ainda aos 8 anos de condução do experimento, segundo Stumpf et al. (2016) Os autores sugerem que em solos minerados e compactados a hierarquia de agregação do solo ocorre abrangendo primeiramente a desintegração de grandes agregados coesivos, formados por processos de compressão, seguidos pelos processos de re-formação e estabilização de agregados biológicos. Portanto, a redução da porcentagem de macroagregados, do DMP e o incremento da porcentagem de microagregados no intervalo de 7 anos pode estar relacionado a ação agressiva das raízes das gramíneas, que possivelmente já estejam em maior concentração na camada abaixo de 0,10 m, quebrando mecanicamente os agregados coesos, para posteriormente reagregar as partículas através da renovação constante e decomposição dos tecidos vegetais.

a)



b)



c)

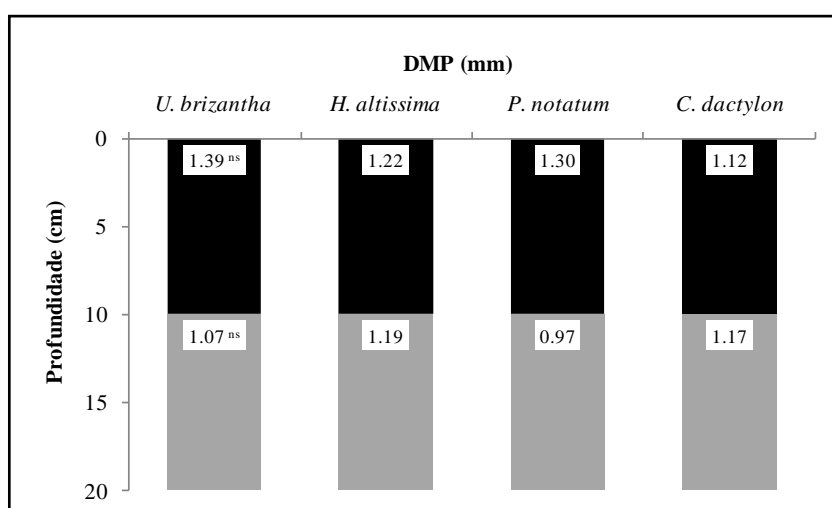


Figura 17: Médias da macroagregados (a), microagregados (b) e diâmetro médio ponderado de agregados (c) do solo (%) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m do solo minerado sob *U. brizantha*, *H. altissima*, *P. notatum* e *C. dactylon*

3.3. RELAÇÃO VESS E PROPRIEDADES FÍSICAS

No geral, as avaliações visuais de campo permitem distinguir as diferentes classes de qualidade estrutural do solo, onde muitos autores utilizaram o VESS para avaliar a estrutura do solo sob diferentes cenários e condições, como por exemplo sistemas de lavouras, contrastes de texturas, rotações de culturas e uso e gestão de terras (Batey et al., 2015; Guimarães et al., 2011; Guimarães et al., 2013; Guimarães et al., 2016; Moncada et al., 2014b). Segundo a Tabela 3, na área minerada as variáveis que correlacionaram positivamente com o VESS foram a RT, a DS e a RP, e a única variável que se correlacionou negativamente foi a PT.

Tabela 3: Correlação de Pearson entre o VESS e a porcentagem de Macroagregados, Microagregados, DMP, RT, Ds, Ma, Mi, PT, RP e COT na profundidade de 0,00 a 0,20 m do solo construído. *p<0,05; **p<0,01

	Macroag	Microag	DMP	RT	Ds	Ma	Mi	PT	RP	COT
VESS	-0,28	0,28	-0,11	0,43*	0,57**	-0,32	-0,33	-0,48*	0,49**	-0,35
Macroag		-1,00**	0,68**	-0,27	-0,39*	0,23	0,33	0,39*	-0,42*	0,26
Microag			-0,68**	0,27	0,39*	-0,23	-0,33	-0,39*	0,42*	-0,26
DMP				-0,23	-0,46*	0,23	0,26	0,35	-0,31	0,23
RT					0,45*	-0,07	-0,34	-0,24	0,63**	-0,50**
Ds						-0,74**	-0,25	-0,84**	0,57**	-0,38*
Ma							-0,21	0,87**	-0,23	0,05
Mi								0,30	-0,48*	0,48*
PT									-0,46*	0,29
RP										-0,62**

Para a variável de RP, ocorreu uma correlação moderada em relação ao VESS para solos construídos. Em estudo conduzido na região amazônica, Guimarães et al. 2016 encontrou resultados semelhantes em amostras de solos para pastagem. Os autores analisaram camadas de 0,00 – 0,20 m encontrando valores de Sq.: 2,8 (VESS) e 2,0 Mpa (RP), em área com *Brachiaria humidicola* e a presença de bovinos e búfalos, o que acarretou em uma maior compactação do solo. Stumpf (2015) pressupõe que a

diminuição da RP na área experimental com solos construídos de Candiota, abaixo da camada 0,10 m, ocorra de forma mais significativa ao longo do tempo, à medida que as raízes das gramíneas avancem na desagregação da camada compactada.

Em relação a RT, os dados mostram uma correlação fraca com o VESS no experimento aplicado em solos construídos. Verifica-se que os valores de RT se encontram alinhados com os níveis de qualidade da estrutura do solo avaliado pelo VESS, uma vez que as espécies que obtiveram valores mais baixos e mais elevados de VESS também possuem os menores e maiores valores de RT (Figuras 1 e 2) respectivamente. Guimarães et al., 2011 em experimento realizado em solos agrícolas encontraram uma correlação positiva entre o VESS e a RT, enfatizando a importância da resistência agregada à ruptura, uma vez que os autores afirmam que a RT possui maiores valores em solos argilosos devido a maior coesão entre os agregados se comparado com solos de textura mais leve.

A DS foi a variável que apresentou maior correlação com o VESS dentre as variáveis analisadas, resultando em uma correlação moderada (0,57). Cherubin et al., 2016, obtiveram correlações moderadas (0,57) entre VESS e a densidade do solo para amostras de solos sob vegetação natural, pastagem e cana de açúcar, e Guimarães et al., 2013 também obtiveram o mesmo resultado de correlação (0,51) para amostras de solos sob uso agrícola. Os autores obtiveram resultados positivos quanto a correlação entre o VESS e a densidade em solos agrícolas, verificando assim, uma característica em comum com solos construídos que é a alta quantidade de argila presente no solo dos experimentos. Essa constatação pode ser melhor confirmada analisando o estudo de Guimarães et al., 2017, onde a densidade do solo não se correlacionou com os escores obtidos com o VESS, sendo assim, os autores atrelaram essa incompatibilidade devido à influência direta da granulometria do solo nessas propriedades quantitativas provocadas pelo alto teor de areia.

Em relação a PT, ocorreu uma correlação negativa moderada com o VESS, ou seja, quanto maior o resultado obtido com o VESS menor a quantidade de poros totais presente no solo, podendo indicar assim o grau de compactação da amostra. Moncada et al., 2014b aplicaram o VESS em solo argiloso e em solo franco-arenoso, associando uma correlação do VESS com propriedades como COT (carbono orgânico total) e porosidade total nas amostras de solo argiloso, enquanto que nas amostras com solo franco-arenoso ocorreu associação do VESS com as propriedades de fluxo de água como, por exemplo, condutividade hidráulica. Tuchtenhagen et al., 2018 em

solos agrícolas também encontraram uma correlação entre o VESS e a PT, atribuindo a semelhança geral da PT com valores do diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados aos efeitos positivos dos sistemas de manejo do solo que garantem o mínimo de perturbação do solo.

Além da correlação do VESS com as propriedades físicas do solo, verifica-se também uma correlação entre elas. Por exemplo, a densidade do solo, obteve correlação com quase todas as demais variáveis analisadas neste estudo, com destaque para uma forte correlação negativa com as variáveis relacionadas a porosidade do solo (Ma e PT) e uma correlação positiva moderada com a resistência a penetração. Os valores de densidade do solo indicam condições críticas ou restritivas ao crescimento ou desenvolvimento de culturas, onde a maioria das propriedades e processos do solo estão mais relacionados com o grau de compactação do que o grau de densidade do solo (Reichert et al., 2009).

Em estudo realizado na mesma área experimental, Pauletto et al., (2016) afirmaram que enquanto houver um aumento na densidade de solos compactados haverá uma diminuição da macroporosidade, consequentemente diminuindo a porosidade total, influenciando assim, diretamente o crescimento das raízes. Para Nambiar & Sands (1992), quando a densidade do solo aumenta, há um incremento na resistência do solo à penetração e uma diminuição na aeração do solo, levando a efeitos adversos sobre o crescimento de raízes.

A metodologia VESS mostrou-se adequada para o monitoramento da degradação do solo e da qualidade estrutural de solos construídos. Após 15 anos, pode ser verificado que a maior degradação do solo continua localizada na camada de 0,10 – 0,20 m. Neste experimento, foi possível observar uma correlação do VESS com variáveis referentes a resistência do solo, sendo um dos principais parâmetros avaliados na aplicação do VESS (Ball et al., 2011), resultado que confirmou uma influência da RP e RT na pontuação do VESS.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia de avaliação visual da estrutura do solo utilizada obteve uma relação com as análises de densidade, resistência a penetração e resistência tênsil, porosidade total do solo construído. As relações da metodologia da avaliação visual da estrutura do solo com atributos físicos do solo apresentaram correlações consideradas fracas ou moderadas, o que sugere que, para a área do experimento com solo construído uma qualidade visual pode ser associada a qualidades quantitativas.

As amostras de solo que obtiveram os melhores resultados quanto a recuperação do solo, foram as mesmas amostras que obtiveram os melhores resultados na avaliação visual da estrutura do solo. Ao longo do tempo, as gramíneas atuaram de forma eficiente na recuperação dos atributos físicos do solo construído com destaque para *Urochloa brizantha* e *Hemarthria altíssima* que apresentaram os melhores resultados quanto as propriedades físicas analisadas e de VESS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.703/89 – Degradação do Solo. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=7609>. Acesso em: 10/01/2019

ASKARI, M.S.; CUI, J.; HOLDEN, N.M. The visual evaluation of soil structure under arable management. **Soil & Tillage Research**, 134: 1-10, 2013

BALL, B.C.; DOUGLAS, J.T. A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. **Soil Use and Management**, 19:50-56, 2003

BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural. Quality: a development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23: 329-337, 2007.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. de S.; ALVAREZ, V. H.; CORREA, M. M.; COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 29. 2005.

BATEY, T.; GUIMARÃES, R. M. L.; PEIGNÉ, J.; BOIZARD, H. Assessing structural quality for crop performance and for agronomy (vess, vsa, soilpak, profil cultural, subvess). **Visual Soil Evaluation: Realising potential crop production with minimum environmental impact**. 2015

BAVOSO, M.A.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A. & PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.227-234, 2010.

BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 38: 849-856. 2003.

BI Y.; ZOU H. & ZHU C. Dynamic monitoring of soil bulk density and infiltration rate during coal mining in sandy land with different vegetation. **International Journal of Coal Science & Technology**, v.1, p.198–206, 2014

BITENCOURT, DG.B.; PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; SILVA, M.T.; GARCIA, G.F. Geração de drenagem ácida e de contaminação por metais pesados em perfis de solos construídos em área de mineração de carvão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:1-14. 2015.

BOHRER, S.L.; LIMB, R.F.; DAIGH, A.L.M.; VOLK, J. M.; Belowground attributes on reclaimed surface mine lands over a 40 year chronosequence. **Land Degradation & Development**. 28: 2290-2297. 2017.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14ed. 2008.

BRITISH PETROLEUM (BP) **Statistical Review of World Energy**. 2017.

CASTRO, R.C. **Avaliação temporal de atributos físicos de um solo construído em área de mineração de carvão recuperado com gramíneas perenes**. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Solos), Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2012

CAPECHE, C. L.; MACEDO, J. R.; MELO, A. S. **Estratégias de recuperação de áreas degradadas**. 2008. Disponível em: http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/pdfs/curso_rad_2008> . Acesso em jan.2018.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under brazilian sugarcane expansion áreas using visual evaluation of soil structure (vess) **Soil & Tillage Research**. 2016.

CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**; SBRS-NRS: Brasil, 10 ed., Porto Alegre, 2016. 400p.

CRM – Companhia Riograndense de Mineração, estatística produtiva. 2014.

DANIELS, W.L.; ZIPPER, C.E. Creation and Management of Productive Mine Soils. Powell River Project Reclamation Guide lines for Surface-Mined Land in Southwest Virginia. 2010. Disponível em <http://www.ext.vt.edu/pubs/mines/460-121/460-121.html>.

DEXTER, A.R. & WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C., eds. **Soil and environmental analysis**: Physical methods. 2ed. New York, Marcel Dekker, p.405-433, 2000

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. **Madison, SSSA**. 35: 1-20. 1994.

DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Resistência à Penetração e Rendimento da Soja Após Intervenção Mecânica em Latossolo Vermelho Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36: 1836-1844, 2012.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Avaliação Visual para o Monitoramento da Qualidade Estrutural do Solo: VESS e VSA**. Pelotas: EMBRAPA CNPS. 2015. 230p

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Recuperação de áreas mineradas**. Brasília. 3ed, 319p. 2018.

EMMET-BOOTH, J. P.; FORRISTAL, P. D.; FENTON, O.; BALL, B. C.; HOLDEN, N. M. A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. **Soil Use and Management**. v. 32: 623-634, 2016

FAO-ISSS-ISRIC, 2014. World Reference Base For Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 2014

FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**. 66: 95-106. 2002.

GAUTRONNEAU, Y.; MANICHON, H. **Guide méthodique du profil cultural**, Lyon: CEREF-GEARA, 1987, 71p

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; BALL, B.; ROSA, J. A. Visual soil structure quality assessment on Oxisols under no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba. 67: 479-482, 2010

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C. On the Visual Evaluation of Soil Structure: The Brazilian experience in Oxisols under no tillage. **Soil & Tillage Research**, 127: 60-64, 2013.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & ALBUQUERQUE, J.A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. *Ciência Rural*, v.39: 65-73.2009.

GREGORY, P. **Plant Roots: Grow, activity and interaction with soils**. Ed. Blackwell Publishing Ltd. Garsington Road, Oxford OX4 2DQ, UK. 2006. 340 p

GROSSMAN, R.B. & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In.: Dane JH, Clarke Topp G, editors. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison: **Soil Science Society of America**, v.4, p.201-228,2002

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**. v. 27: 395-403, 2011.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil & Tillage Research**. v. 127: 92-99, 2013.

GUIMARÃES, R. M. L.; JUNIOR, A. F. N.; SILVA, W. G.; ROGERS, C. D.; BALL, B. C.; MONTES, C. R.; PEREIRA, B. F.F. The merits of the visual evaluation of soil structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil & Tillage Research**. v. 173: 75-82, 2016

HÉNIN, S.; FEODOROFF, A.; GRAS, R.; MONNIER, G. **Le Profil Cultural**: Principes de physique du sol, Paris: Masson, 1960, 320p

IBAMA. Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração. Brasília IBAMA 96p. 1990.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p.1656-1661, 2002.

INDA, A.V.; QUINÕES, O.R.G.; GIASSONI, E.; BISSANI, C.A.; DICK, D.P.; NASCIMENTO, P.C. Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. **Ciência Rural**, v.40, p.1060-1067, 2010.

JOHANNES, A.; WEISSKOPF, P.; SCHULIN, R.; BOIVIN, P. To what extend do physical measurements mac with visual evaluation of soil structure? **Soil & Tillage Research**, 173: 24-32, 2017

JOSA, R.; JORBA, M. & VALLEJO, V. R. Opencast mine restoration in a Mediterranean semiarid environment: Failure of some common practices. **Ecological Engineering**, v. 42:183-191, 2012

KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; WIENHOLD, B. J.; ZOBECK, T. M. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. **Journal of Integrative Bioscience**, 6: 3-14, 2008.

KARLEN, D. L.; RICE, C.W.; Soil degradation: will humankind ever learn. **Sustainability**. 7: 12490-12501. 2015.

KIEHL, E. J. Manual de Edafologia. São Paulo/SP. ed. Agronômica Ceres Ltda, 1979. 262p

KIMPE, C.R. & WARKENTIN, B.P. Soil functions and the future of natural resources. **Advances in GeoEcology**. 31: 3-10. 1998.

KOŁODZIEJ, B.; BRYK, M.; JURKIEWCZ, A. S.; OTREMBA, K.; GILEWSKA, M. Effect of spontaneous Succession on physical state of post-mine technosol. **Acta Agrophysica**, 24: 51-62, 2017.

KRÜMMELBEIN, J.; RAAB, T. Development of soil physical parameters in agricultural reclamation after brown coal mining within the first four years. **Soil & Tillage Research**, 125: 109-115, 2012

LI, J.; XIN, Z.; LI, H.; CHEN, J. DING, G. Physicochemical and microbiological assessment of soil quality on a chronosequence of a mine reclamation site. **European Journal of Soil Science**. 69: 1056-1067, 2018.

LEAL, O. dos A.; CASTILHOS, R.M.V.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S.; PILLON, C.N.; PENNING, L.H.; SANTOS, D.C. dos. Organic matter fractions and quality of the surface layer a constructed and vegetated soil after coal mining. II- Physical compartments and carbon management index. **Revista Brasileira de Ciência do solo**.39: 895-902 2015.

MAHARANA, J.K.; PATEL, A.K. Characterization of physico-chemical properties and their impact on enzyme activities in a chronosequence coalmine overburden spoil as biomarker for reclamation process. **Bacteriology and Parasitology**, 4:174-183, 2013.

MENDES FILHO, P. F. **Potencial de reabilitação do solo de uma área degradada, através da revegetação e do manejo microbiano**. 2004. 89f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MONCADA, M. P.; GABRIELS, D.; LOBO, D.; REY, J. C.; CORNELIS, W. M. Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. *Soil & Tillage Research*. v. 139: 8-18, 2014a.

MONCADA, M. P.; PENNING, L. H.; TIMM, Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. *Soil & Tillage Research*. v. 140: 20-28, 2014b.

MUKHOPADHYAY, S.; MAITI, S.K.; MASTRO, R.E. Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. *Ecological Engineering*, 57: 133-142, 2013.

MUELLER, L.; SCHINDLER, U.; BEHRENDT, A.; EULENSTEIN, F. A.; DANNOWSKI, R. **The Muencheberg Soil Quality Rating (SQR)**. Muencheberg: Leibniz-Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), 2007, 201p

MUELLER, L.; KAY, B. D.; DEEN, B.; HU, C.; ZHANG, Y.; WOLFF, M.; EULENSTEIN, F.; SCHINDLER, U. Visual assessment of soil structure: valuation of methodologies on sites in Canada, China and Germany: Part I: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil & Tillage Research*, 103: 178-187, 2009

MUELLER, L.; SCHINDLER, U.; SHEPHERD, T.G.; BALL, B.C.; SMOLENTSEVA, E.; HU, C.; HENNINGS, V.; SCHAD, P.; ROGASIK, J.; ZEITZ, J.; SCHINDWEIN, L.; BEHRENDT, A.; HELMING, K.; EULENSTEIN, F. A framework for assessing agricultural soil quality on a global scale. *Archives of. Agronomy and. Soil Science*, 58: 876-882, 2012.

MURPHY, B. W.; CRAWFORD, M. H.; DUNCAN, D. A.; MCKENZIE, D. C.; KOEN, T. B. The use of visual soil assessment schemes to evaluate surface structure in a soil monitoring program. *Soil & Tillage Research*, 127: 3-12, 2013

NAMBIAR, E.K.S.; SANDS, R., Effects of compaction and simulated root channels in the subsoil on root development, water uptake and growth of radiata pine. *Tree Physiology*, v.10, p.297-306, 1992

PAULETTO, E. A.; STUMPF, L.; PINTO, L. F. S.; SILVA, T. S.; AMBUS, J. V.; GARCIA, G. F.; DUTRA JUNIOR, L. A.; SCHEUNEMANN, T.; ALBERT, R. P. Reclamation of a degraded coal-mining área with perennial cover crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.40. 2016.

PEREIRA, M.G.; LOSS, A.; BEUTLER, S.J.; TORRES, J.L.R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45:508-514, 2010.

PEERLKAMP, P.K. Visual estimation of soil structure. In: DE BOODT, M.; DE LEENHERR, D.E.; FRESE, H.; LOW, A. J.; PEERLKAMP, P.K. (ed) *West European methods for soil structure determination*. Ghent: State Faculty of Agriculture Sciences, 1967, p. 216-223.

PINTO, L.F.S.; FERNANDES, F.F.; PAULETTO, E.A. Recuperação de solos degradados pela mineração: da teoria termodinâmica à prática nas áreas regeneradas da mina de Candiota-RS. In: ALBA, J.M.F. (Ed.). **Recuperação de áreas mineradas**. Brasília, DF: Embrapa Clima temperado, 2010. P.238-255.

PIRES, A.; HOLTZ, A. **Setor elétrico ante a demanda crescente**. 2016. Disponível em: <http://economia.estado.com.br/noticias/geral>, setor-elétrico-ante-a-demanda-crescente-imp-,829857. Acesso em set.2017.

RALISH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; MELO, A.S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. S.; BONA, F. D.; Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo – DRES, **Embrapa Clima Temperado**, Londrina, PR. 2017

REICHERT, J.M., REINERT, J.D. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree of compactness for no till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**. v. 102: 242-254. 2009.

REICHERT, J.M.; ROSA, V.T.; VOGELMANN, E.S.; ROSA, D.P.; HORN, R.; REINERT, D.J.; SATTTLER, A.; DENARDIN, J.E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no tillage and controlled traffic. **Soil & Tillage Research**. 158: 123-136. 2016.

REIS, D. A. **Resistência tênsil de agregados, friabilidade e compressibilidade de um solo construído sob plantas de cobertura na área de mineração de carvão de Candiota, RS**. Dissertação (Mestrado em Solos), Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2012.

REIS, D. A.; LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A. Resistência tênsil de agregados e compressibilidade de um solo construído com plantas de cobertura em área de mineração de carvão em Candiota, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:669-678, 2014

RIGOTTI, N. **Recuperação de áreas degradadas: estudo de caso**. Porto Alegre, FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/FEPAM, p.99-113, 2002.

SENA, K.; BARTON, C.; HALL, S.; ANGEL, P.; AGOURIDIS, C.; WARNER, R. Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia, United States. **Restoration Ecology**. 23: 131-138. 2015.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num argissolo em processo de recuperação**. 158f. 2010. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SHEORAN, V.; SHEORAN, A.S. & POONIA, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. **International Journal of Soil, Sediment and Water**, 3:2-13, 2010.

SHEPHERD, T.G. Visual Soil Assessment. Vol. 2: Field guide for pastoral grazing and cropping on flat to rolling country. Palmerston North: Horizons.mw & Landcare Research, 2009, 84p

SHRESTHA, R.K.; LAL, R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. **Geoderma**, 161:168–176, 2011.

SOUZA, K. R. **Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores visuais em ambientes da sub-bacia do Ribeirão José Pereira, Itajubá (MG)**. Dissertação (Mestrado em ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Itajubá 2015.

STOLF, R.; THURLER, A.M.; BACCHI, O.O.S. & REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.447-59, 2011.

STUMPF, L., PAULETTO, E.A., FERNANDES, F.F., SUZUKI, L.E.A.S., SILVA, T.S.; PINTO, L.F.S.; LIMA, C.L.R. Perennial grasses for recovery of the aggregation capacity of a reconstructed soil a coal mining in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38: 327-335, 2014.

STUMPF, L. **Desenvolvimento radicular de gramíneas perenes e sua eficiência na recuperação de atributos físicos de um solo construído compactado em área de mineração de carvão**. Tese (Doutorado em Solos), Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2015

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil & Tillage Research**, 161:71-78, 2016.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; FERNANDES, F. F.; DA SIL, T. S.; AMBUS, J. V.; GARCIA, G. F.; JUNIOR, L. A. D.; SCHEUNEMANN, T. Gramíneas perenes e sua relação com a recuperação de atributos físicos de um solo degradado construídos. **Interciência**, 42: 101-107, 2017

STUMPF, L.; LEAL, O. dos A.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S.; REIS, D.A.; PINTO, M.A.B.; TUCHTENHAGEN, I.K. Tensile strength and organic matter fractions in aggregates of a covered mined soil under early stage recovery. **Soil & Tillage Research**. v. 176: 69-76, 2018

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de

solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:393-399, 1999

TIWARY R.K. Environmental Impact of coal mining on water regime and its management. **Water Air and Soil Pollution**, 132: 185-199, 2001.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. & SILVA, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.943-952, 2008

TUCHTENHAGEN, I. K.; LIMA, C. L. R.; BAMBERG, A. L.; GUIMARÃES, R. M. L.; MONCADA, M. P.; Visual evaluation of the soil structure under different management systems in lowlands in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 42, 2018.

USDA - United States Department of Agriculture. Keys to Soil Taxonomy. Natural Resources Conservation Service. 2014.

VEZZANI, F. M. & MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. 33: 743-755. 2009.

WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v.49, p.73-84, 1998

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**, 41: 201-209, 2009.

WICK, A.F.; DANIELS, W.L.; NASH, W.L.; BURGER J.A. Soil aggregate, organic matter and microbial dynamics under different amendments after 27 years of mine soil development. **Bridging Reclamation, Science and the Community**. 1364-1386, 2010.

WICK, A.F.; DANIELS, W.L.; NASH, W.L.; BURGER, J.A. Aggregate recovery in reclaimed coal mine soils of sw virginia. **Land Degradation & Development**. 27:965-972. 2016.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 28: 891-900, 2004.

ZHANG, L.; JINMANWANG, W.; BAI, Z.; CHUNJUAN, LV. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. **Catena**, 128: 44-53. 2015

ZHOU, W.; YANG, K. BAI, Z.; CHENG, H.; LIU, F. The development of topsoil properties under different reclaimed land uses in the Pingshuo opencast coalmine of Loess Plateau of China. *Ecological Engineering*. v. 100: 237-245, 2017.