

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

Programa de Pós-Graduação em Agronomia



## **Dissertação**

**Atributos microbiológicos de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS**

**Manoel Ribeiro Holanda Neto**

Pelotas, 2011

**Manoel Ribeiro Holanda Neto**

**Atributos microbiológicos de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosa Maria Vargas Castilhos

Co-orientador: Prof. Dr. Danilo Dufech Castilhos

Pelotas, 2011

**Dados de catalogação na fonte:**  
( **Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744** )

H722a Holanda Neto, Manoel Ribeiro

Atributos microbiológicos de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS / Manoel Ribeiro Holanda Neto ; orientador Rosa Maria Vargas Castilhos.- Pelotas,2011.- 95f.: Il. - Dissertação (Mestrado em solos) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel . Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2011.

1.Mineração 2.Carvão 3.Cobertura vegetal 4.Nutrientes 5. Biomassa microbiana 6.Respiração basal 7.Micorrizas I. Castilhos, Rosa Maria Vargas (orientador) II .Título.

CDD 631.432

Banca examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosa Maria Vargas Castilhos

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Giani Mariza Bärwald Böhn

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Flavia Fontana Fernandes

Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl

Prof. Dr. Danilo Dufech Castilhos

## **Epígrafe**

*Toda mente ao se abrir a uma nova idéia nunca volta ao seu estado original.*

*Albert Einstein*

*O papel dos infinitamente pequenos é infinitamente grande.*

*Louis Pasteur*

*Comunidades vegetais regulam e são reguladas por FMAs.*

*(van der Heijden et al., 2006)*

### **Dedico**

Ao meu pai (*in memoriam*) Clementino da Penha Ribeiro, a minha mãe, Maria das Neves Ribeiro de Holanda, aos meus irmãos Ismael Ribeiro Holanda e Cleudeane Ribeiro Holanda.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, que nos concede o dom da vida, um dom inestimável.

A meu pai (*in memoriam*), Clementino da Penha Ribeiro, que embora tenha partido prematuramente desta vida, nos deixou um grande legado de amor ao trabalho e a família.

A minha mãe, Maria das Neves Ribeiro de Holanda, exemplo de mãe e ser humano, que embora com pouco conhecimento das letras sempre me ensina o infinito valor que emana do conhecimento.

A meus irmãos, Ismael Ribeiro Holanda e Cleudeane Ribeiro Holanda, pelo amor, união, incentivo e dedicação que temos uns pelos outros.

A meu primo Aldo Barbosa e seus pais Laide Barbosa Costa e Ribamar Costa, pelo incentivo, exemplo e entusiasmo que demonstram a educação.

A professora Maria do Carmo Araújo, minha primeira educadora, que embora com todas as dificuldades de ensino da época sempre se manteve entusiasmada e motivada a transmitir seus ensinamentos.

A Prof<sup>a</sup>. Rosa Maria Vargas Castilhos pela orientação, respeito, amizade e ensinamentos transmitidos.

Ao Prof. Danilo Dufech Castilhos, pela co-orientação, amizade, ensinamentos, dedicação e contribuição na minha formação científica e profissional.

Ao Prof. Eloy Antonio Pauletto, pelo companheirismo e coordenação do projeto Candiota, “Recuperação de Áreas Degradadas” – RAD.

Aos Pesquisadores Dr. Orivaldo José Saggin-Júnior e a Dr<sup>a</sup>. Eliane Maria Ribeiro da Silva, da Embrapa Agrobiologia, pela orientação no meu treinamento sobre Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs).

Ao Laboratorista Itamar Garcia Ignácio, pelo auxílio nas análises de Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs), na Embrapa Agrobiologia.

Aos colegas e amigos de caminhada científica Marcos Lima Campos do Vale (Pará), Otávio Leal, André Capilheira, Vairton Radmann, Lizete Stümpf, Patricia Dupont e Marília Alves, pela amizade, dedicação e respeito um pelo outro.

A todos os colegas, amigos e professores do Departamento de Solos pelos momentos de descontração, amizade e troca de experiências.

Aos bolsistas de iniciação científica do departamento de solos da FAEM, Douglas Schulz Bergmann da Rosa e Leticia Hellwig, pela ajuda na coleta e análises de Laboratório das amostras.

A Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” pela oportunidade de realização deste curso.

A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

A Companhia Riograndense de Mineração (CRM) pela disposição da área experimental e apoio financeiro.

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

## Resumo

HOLANDA NETO, Manoel Ribeiro. **Atributos microbiológicos de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS.** 2011. 96p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

A cidade de Candiota/RS possui a maior jazida de carvão do Brasil, com 38% de todo o produto nacional extraído a céu aberto. O processo de deposição inadequada dos rejeitos da mineração leva a perdas de solo, à contaminação das águas superficiais e do lençol freático e a alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos. A recuperação destas áreas degradadas envolve um conjunto de ações, que proporcionam o restabelecimento da funcionalidade do solo no ecossistema. A revegetação é uma importante etapa na recuperação destes solos, que visa à recuperação paisagística da área, controle dos processos erosivos e restabelecimento das propriedades físicas, químicas e biológicas. O presente trabalho objetivou avaliar o efeito de diferentes sistemas de cultivo sobre a biomassa microbiana, a respiração basal e a colonização, densidade de esporos e diversidade de fungos micorrízicos de um solo construído e vegetado com gramíneas, após mineração de carvão mineral, em uma área pertencente à Companhia Riograndense de Mineração no município de Candiota – RS. O delineamento experimental foi constituído por casualização por blocos com quatro repetições, com as seguintes espécies implantadas em 2007: T1 - Capim Vaqueiro (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); T2 - Braquiária (*Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf); T3 - Capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq); T4 - Braquiária humidícula (*Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick); T5 - Hemártria (*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard); T6 - Grama Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); T7 - Capim Vaqueiro+Gramas Tifton; T8 - Capim Vaqueiro+Hemártria; T9 - Braquiária brizantha+Gramas Tifton; T10 - Braquiária brizantha+Hemártria; T11 - Capim Tanzânia+Gramas Tifton; T12 - Capim Tanzânia+Hemártria; T13 - Braquiária humidícula+Gramas Tifton; T14 - Braquiária humidícula+Hemártria, e T15 (SC) - solo construído sem vegetação. A coleta de amostras de solos foi realizada em 2009, para as determinações de atributos químicos e microbiológicos, na profundidade de 0 a 0,05m. Os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo a comparação entre tratamentos cultivados feita pelo teste de Tukey a 5% e a comparação de cada tratamento com a testemunha T15 utilizando o teste de Dunnett a 5%. Observou-se que a adição de corretivo e as adubações das culturas aumentaram os valores de pH, condutividade elétrica, cálcio, magnésio, potássio, fósforo, manganês, zinco, cobre e sódio trocável, o carbono orgânico total e a respiração basal do solo quando comparados ao solo construído não vegetado. Os maiores teores de carbono da biomassa microbiana no solo constatados nos cultivos com hemártria e braquiária humidícula+hemártria, indicam possíveis alternativas para a recuperação da área em estudo. A colonização micorrízica do solo construído da área minerada é

aumentada com o cultivo de hemártria e capim vaqueiro + hemártria. Os cultivos de um modo geral, promoveram um aumento da esporulação micorrízica. As espécies de fungos micorrízicos arbusculares encontradas na área de estudo foram: *Acaulospora mellea*, *Entrophospora infrequens*, *Glomus clarum*, *Glomus macrocarpum*, *Glomus tortuosum*, *Glomus sp.*, *Glomus clavisporum*, *Glomus dominikii*, *Glomus etunicatum*, *Glomus lamellosum*, *Gigaspora sp.*, e *Scutellospora sp.* com maior predomínio das espécies *Glomus macrocarpum* e *Glomus tortuosum*, indicando uma possível especificidade das espécies vegetais com a comunidade de FMAs.

Palavras-chave: Mineração, carvão, cobertura vegetal, nutrientes, biomassa microbiana, respiração basal, micorrizas.

## Abstract

HOLANDA NETO, Manoel Ribeiro. **Microbial attributes of a constructed soil vegetated with grasses after coal mining in Candiota/RS.** 2011. 96p. Dissertation. Agronomy Pos-Graduation Program, Area Concentration: Soil. Federal University Pelotas, Pelotas, RS, Brazil.

The city of Candiota/RS has the largest coal mine in Brazil, with 38% of the entire national product extracted from open-pit mines. The inadequate disposal process of tailings from mining leads to loss of soil, surface water and changes in physical, chemical and biological attributes. The restoration degraded areas involves a set of actions that provide the functionality to restore ecosystem. The Revegetation is an important step in recovery of these soils which aims the landscaping the area, erosion control and restoration of physical, chemical and biological soil properties. This work aimed to evaluate the effect of different cropping systems on chemical and microbiological attributes of a constructed soil after the coal extraction. In an area of coal mining of the, located in Candiota, RS. The experimental design was composed by randomized blocks with four replications, with the following treatments of crops: T1 - Capim Vaqueiro (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); T2 - Braquiária (*Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf); T3 - Capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq); T4 - Braquiária humidícula (*Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickt); T5 - Hemártria (*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard); T6 - Grama Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); T7 - Capim Vaqueiro+Gramma Tifton; T8 - Capim Vaqueiro+Hemártria; T9 - Braquiária brizantha+Gramma Tifton; T10 - Braquiária brizantha+Hemártria; T11 - Capim Tanzânia+Gramma Tifton; T12 - Capim Tanzânia+Hemártria; T13 - Braquiária humidícula+Gramma Tifton; T14 - Braquiária humidícula+Hemártria, and T15 (SC) – constructed soil without vegetation. Soil samples (0-0,05m) were collected in september of 2009 to determine chemical and microbiological attributes. The results were compared between treatments using analysis of variance and Tukey Test at 5% significance and a comparison of each treatment with control (T15) was made using the Dunnett Test at 5% of probability. It was observed that the addition of fertilizer and lime for the cultivation of crops increased the pH values, electrical conductivity, calcium, magnesium, potassium, phosphorous, manganese, zinc, copper, and exchangeable sodium, the organic carbon and soil basal respiration for crop cultivation, when compared to non-vegetated constructed soil. These results suggest that all cultures tested may be promising in the recovery area over time. The treatments Hemártria and Braquiária humidícula+Hemártria showed the higher contents of microbial biomass carbon in constructed soil. The crops studied, in general, promoted an increased in mycorrhizal colonization and sporulation and also AMFs species when compared with non-vegetated constructed soil, reducing the impact caused by interference of mining.

**Key words:** mining, coal, covering vegetation, nutrients, microbial biomass, basal respiration, mycorrhizae.

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Perfil geológico da formação Rio Bonito na Jazida de Candiota, RS. Adaptado de Santucci (2009). .....  | 20 |
| <b>Figura 2.</b> Seqüência do processo de mineração de carvão a céu aberto da mina de Candiota – RS, com posterior recuperação da área. Adaptado de Santucci (2009). .....  | 21 |
| <b>Figura 3.</b> Modelo dos processos de degradação e reabilitação de áreas degradadas – ênfase no aspecto cronológico de atributos funcionais determinantes da qualidade do solo (adaptado de Tian et al., 2001, apud Siqueira et al., 2008). .....  | 23 |
| <b>Figura 4.</b> Efeito da exposição da pirita e formação do processo de drenagem ácida (fonte: próprio autor). .....   | 24 |
| <b>Figura 5.</b> Localização e croqui da área experimental. ....  | 40 |
| <b>Figura 6.</b> Porcentual de colonização de raízes por Fungos Micorrizicos Arbusculares - FMAs em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm. T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. .... | 65 |
| <b>Figura 7.</b> Densidade de esporos de Fungos Micorrizicos Arbusculares - FMAs em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm. T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. ....                 | 68 |
| <b>Figura 8.</b> Apêndice 6F - Correlação de manganês (Mn) X pH do solo, de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS. ....   | 94 |
| <b>Figura 9.</b> Apêndice 7G - Correlação de zinco (Zn) X pH do solo, de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS. ....  | 95 |

## Lista de Tabelas

- Tabela 1.** Valores médios de  $pH_{H_2O}$ , condutividade elétrica (CE), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), sódio (Na), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), nitrogênio total (Nt), carbono orgânico total (COT), carbono microbiano ( $C_{mic}$ ) e nitrogênio microbiano ( $N_{mic}$ ), respiração basal (RB), quociente metabólico ( $qCO_2$ ), relações carbono orgânico total/nitrogênio total (COT/Nt), carbono microbiano/nitrogênio microbiano ( $C_{mic}/N_{mic}$ ), carbono microbiano/carbono orgânico total ( $C_{mic}/COT$ ), nitrogênio microbiano/nitrogênio total ( $N_{mic}/Nt$ ), percentual de colonização de raízes por FMAs e número de esporos de FMAs de um solo natural anterior ao processo de extração de carvão mineral, na profundidade de 0 – 5cm.....39
- Tabela 2.** Valores de pH em água, condutividade elétrica (CE) e teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), e fósforo (P) em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.....49
- Tabela 3.** Teores de manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), e de sódio trocável (Na), em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.....54
- Tabela 4.** Teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (Nt), carbono microbiano ( $C_{mic}$ ) e nitrogênio microbiano ( $N_{mic}$ ), em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.....56
- Tabela 5.** Teores de respiração basal (RB), e quociente metabólico ( $qCO_2$ ) em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm. ....61
- Tabela 6.** Relações COT/Ntotal,  $C_{mic}/N_{mic}$ ,  $C_{mic}/COT$  e  $N_{mic}/Nt$  em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.....63
- Tabela 7.** Espécies de fungos micorrízicos arbusculares encontradas e respectivas frequência de ocorrência em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão em Candiota, RS, na profundidade de 0 – 5cm.....70

## Lista de Abreviaturas e Siglas

Biomassa Microbiana do Solo – BMS  
Carbono Microbiano - CM  
Carbono Microbiano/Carbono Orgânico Total - CM/COT  
Carbono Microbiano/Nitrogênio Microbiano - CM/NM  
Carbono Orgânico - CO  
Carbono Orgânico do Solo - COS  
Carbono Orgânico Total/Nitrogênio Total - COT/NT  
Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina – CQFS-RS/SC  
Companhia Riograndense de Mineração - CRM  
Companhia Siderúrgica Nacional - CSN  
Condutividade Elétrica - C.E  
Fixação Biológica de Nitrogênio - FBN  
Fungos Micorrízicos Arbusculares - FMAs  
Matéria Orgânica do Solo - MOS  
Nitrogênio Microbiano - NM  
Nitrogênio Microbiano/Nitrogênio Total - NM/NT  
Nitrogênio Total - NT  
Produto Interno Bruto - PIB  
Quociente metabólico -  $qCO_2$   
Recuperação de Áreas Degradadas - RAD  
Respiração Basal – R.B  
Taxa de Respiração Específica da Biomassa Microbiana - TRBM

# SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 16 |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | 18 |
| 2.1 Mineração de carvão no Brasil.....   | 18 |
| 2.2 Processo de degradação ambiental em área minerada de carvão mineral .....        | 22 |
| 2.3 Recuperação de áreas degradadas .....  | 25 |
| 2.4 Revegetação de áreas degradadas .....  | 26 |
| 2.5 Caracterização das plantas utilizadas na revegetação da área experimental..      | 27 |
| 2.6 Biomassa microbiana do solo e sua importância .....                              | 29 |
| 2.7 Biomassa microbiana em solos construídos .....                                   | 31 |
| 2.8 Atividade microbiana do solo .....   | 33 |
| 2.9 Histórico e características dos Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs) .....    | 34 |
| 2.10 Importância dos Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs) .....                   | 35 |
| 2.11 Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs) em solos construídos .....              | 36 |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | 38 |
| 3.1 Localização e caracterização da área experimental .....                          | 38 |
| 3.2 Coleta e preparo das amostras .....  | 41 |
| 3.3 Análises químicas do solo.....   | 41 |
| 3.4 Análises microbiológicas do solo .....   | 42 |
| 3.4.1 Biomassa microbiana do solo .....  | 42 |
| 3.4.2 Carbono e Nitrogênio Microbiano .....  | 42 |
| 3.4.3 Respiração basal do solo.....  | 43 |
| 3.4.4 Quociente metabólico ( $qCO_2$ ) .....   | 44 |
| 3.4.5 Relação CM/COT.....  | 44 |
| 3.4.6 Relação NM/NT .....  | 45 |
| 3.4.7 Relação CM/NM .....  | 45 |
| 3.4.8 Número de esporos, colonização micorrízica e principais espécies de FMAs ..... | 45 |
| 3.4.9 Análises estatísticas .....  | 47 |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 48 |
| 4.1 Atributos químicos do solo .....   | 48 |
| 4.1.1 pH , condutividade elétrica e teores de Ca , Mg, K e P.....                    | 48 |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1.2 Teores de manganês, zinco, cobre e sódio .....  | 53        |
| 4.1.3 Carbono orgânico total (COT).....   | 55        |
| 4.1.4 Nitrogênio total.....   | 58        |
| 4.2 Atributos microbiológicos .....   | 58        |
| 4.2.1 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana.....                                      | 58        |
| 4.2.2 Respiração Basal e quociente metabólico ( $qCO_2$ ).....                              | 60        |
| 4.3 Relações químicas e biológicas.....   | 62        |
| 4.4 Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs).....  | 64        |
| 4.4.1 Porcentual de colonização de raízes e densidade de esporos de FMAs...                 | 64        |
| 4.4.2 Identificação das principais espécies de Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs)..... | 69        |
| <b>5 CONCLUSÕES .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>72</b> |
| <b>7 APÊNDICES .....</b>  | <b>84</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil dispõe de uma das maiores reservas de carvão mineral da América Latina, e os depósitos de maior importância econômica concentram-se nos Estados do sul do país, na formação Rio Bonito, de idade permiana. Em Candiota, no Rio Grande do Sul, próximo à fronteira com o Uruguai, encontra-se a maior bacia carbonífera do país, com reservas estimadas na ordem de  $12 \times 10^9$ t. Em razão de seu baixo poder calorífico e alto teor de impurezas, esse carvão é utilizado quase que exclusivamente para geração de energia elétrica (SOARES et al., 2006).

Em Candiota, a mineração é feita utilizando o método de lavra a céu aberto, constituindo-se uma fonte altamente poluidora e que causa inúmeros problemas ambientais aos ecossistemas envolvidos e às suas imediações (KOPPE; COSTA, 2002).

Durante as práticas de extração do carvão e de recomposição da paisagem, ocorrem alterações químicas, físicas e microbiológicas no solo provocado pelas freqüentes misturas de horizontes com rejeitos de carvão somados à compactação causada pelo empilhamento das camadas de solo e pelo uso de máquinas e equipamentos pesados que venham a constituir os chamados solos construídos.

O conhecimento das condições biológicas do solo em termos de reabilitação é de grande interesse no contexto ecofuncional de áreas degradadas pela mineração (Nóbrega et al., 2004), uma vez que a diversidade e a atividade microbiana do solo constituem fatores importantes na sustentabilidade dos ecossistemas. A redução da comunidade microbiana do solo pode acarretar não só a perda de importantes funções do solo e de espécies de microrganismos potenciais mitigadoras de efeitos degradativos do solo, mas também reduzir a capacidade dos sistemas naturais de superar as alterações neles impostas.

A biomassa microbiana do solo (BMS) é um componente importante da Matéria Orgânica do Solo (MOS) responsável por regular as transformações microbiológicas e acúmulo de nutrientes (MENDONÇA; MATOS, 2005).

Atualmente a BMS e seus processos bioquímicos são utilizados como indicadores de qualidade do solo, devido a sua capacidade de responder rapidamente a alterações no ambiente do solo. Os conteúdos de C, N e P na biomassa microbiana e a atividade dos microrganismos do solo são de grande importância para o entendimento dos fluxos de nutrientes em ecossistemas naturais,

manejados e/ou com níveis de perturbação e um importante atributo no monitoramento de processos de recuperação ambiental e de áreas degradadas.

O uso de micorrizas na recuperação de áreas degradadas é uma alternativa biotecnológica viável no processo de reabilitação da qualidade do solo. As micorrizas arbusculares (MAs) promovem incrementos significativos da área radicular de absorção das plantas colonizadas, maximizando o aproveitamento de água e nutrientes, como Ca, P, N e K (GONZALEZ et al., 2009).

De acordo com Brown; Lugo (1994); Silva Júnior et al. (1995) a revegetação de áreas degradadas estabiliza a área, protege o solo e garante o aporte de material orgânico ao solo, amenizando os fatores adversos à sucessão vegetal, constituindo-se em um importante processo recuperador. A revegetação pode ser feita pela introdução de espécies exóticas ou nativas, em especial espécies nativas pelo baixo custo de introdução e fácil adaptação à área.

Estudos sobre recuperação de áreas degradadas principalmente em áreas de mineração de carvão em sua maioria estão voltados para avaliação de indicadores químicos e físicos. No entanto, muitos dos atributos indispensáveis ao adequado desenvolvimento vegetal são afetados diretamente por processos microbiológicos.

Atualmente são escassos os estudos relacionados às alterações de atributos microbiológicos do solo, como alteração da biomassa microbiana, presença de fungos micorrizicos arbusculares (FMAs), em *solos construídos* nas áreas utilizadas pela mineração de carvão. No Brasil os poucos trabalhos envolvendo os FMAs em áreas de mineração, estão voltados em sua maioria para áreas de extração de bauxita, em processo de reabilitação. Portanto em nível nacional ainda não se encontram registros de pesquisa científica envolvendo a ocorrência, diversidade e eficiência de FMAs em áreas de mineração de carvão mineral, em processo de restabelecimento funcional. Neste contexto, o presente trabalho objetivou avaliar o efeito de diferentes sistemas de cultivos em um solo construído após a extração de carvão mineral e vegetado com gramíneas, sobre a biomassa microbiana, a respiração basal e a colonização, densidade de esporos e diversidade de fungos micorrízicos arbusculares.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Mineração de carvão no Brasil**

O carvão mineral constitui dois terços dos recursos energéticos não renováveis do Brasil, sendo suas reservas 20 vezes maiores que as reservas de petróleo e 75 maiores que as reservas de gás natural. As reservas de carvão mineral do estado do Rio Grande do Sul (RS) somam 28 bilhões de toneladas, significando 86,5% do total de carvão do Brasil (QUIÑONES, 2004).

O carvão assumiu posição de destaque no cenário nacional, em virtude de suas características metalúrgicas, após a instalação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) no ano de 1945, no estado de Santa Catarina. Em 1980 houve incremento significativo na pesquisa relacionada aos diversos programas de desenvolvimento do Setor Carbonífero (MÜLLER et al., 1987).

No Rio Grande do Sul a principal reserva de carvão mineral foi localizada na região sudoeste, distribuindo-se entre os municípios de Bagé, Hulha Negra, Candiota, Pinheiro Machado e Herval. Data de 1801 a primeira descoberta de carvão mineral nessa região, situando-se na última metade do século XIX a exploração rudimentar, executada nas encostas dos vales. A mineração ocorria a céu aberto e sob a forma subterrânea, objetivando o abastecimento das charqueadas da região (MIOLA, 2010).

Em 1961, o Departamento Autônomo de Carvão Mineral (DACM), que no ano de 1969 foi transformado em Companhia Riograndense de Mineração (CRM), iniciou os trabalhos de lavra a céu aberto na denominada Malha I, iniciando, também o abastecimento da Usina Termelétrica Candiota I, da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), com potência de 20MW. Na mesma década, foi completada a pesquisa na Malha II, sendo posteriormente realizado o planejamento e a caracterização de duas novas áreas denominadas Malhas III e IV (CGTEE, 2010).

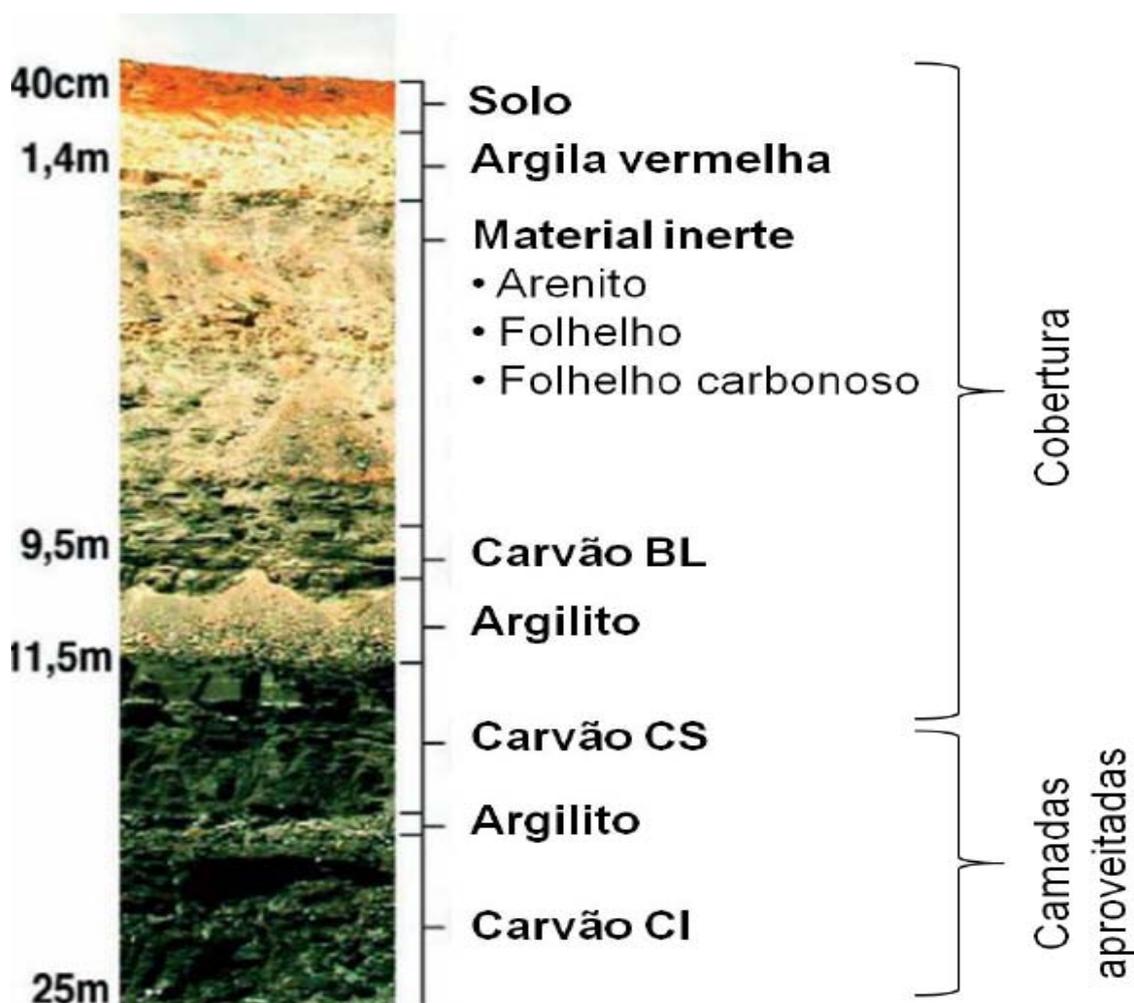
No ano de 1974 foi desativada a Usina Candiota I, entrando em operação a Fase A da nova usina. Em 1986 entrou em operação a segunda etapa dessa nova usina, denominada Fase B com uma previsão estimada de produção de 160MW de energia. Finalmente, em 1989 entrou em operação a última máquina da Usina Candiota II, completando os 446MW de energia previstos inicialmente. Atualmente a Usina Candiota II é denominada “Usina Termelétrica Presidente Médici” e desde a

sua instalação vêm sendo cumprido um rigoroso monitoramento dos indicadores de qualidade sócio-ambiental (CGTEE, 2010).

Os depósitos de carvão fóssil do Brasil estão situados nos estados de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, compostas pelo carvão dos tipos linhito e sub-betuminoso. Distribuem-se em oito grandes jazidas, sete das quais no Rio Grande do Sul e uma em Santa Catarina, além de várias outras de menor porte.

Somente a Jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional. Mas o minério é pobre do ponto de vista energético e não admite beneficiamento nem transporte, em função do elevado teor de impurezas. Isto faz com que sua utilização seja feita sem beneficiamento e próximo a boca da mina (EPE, 2010).

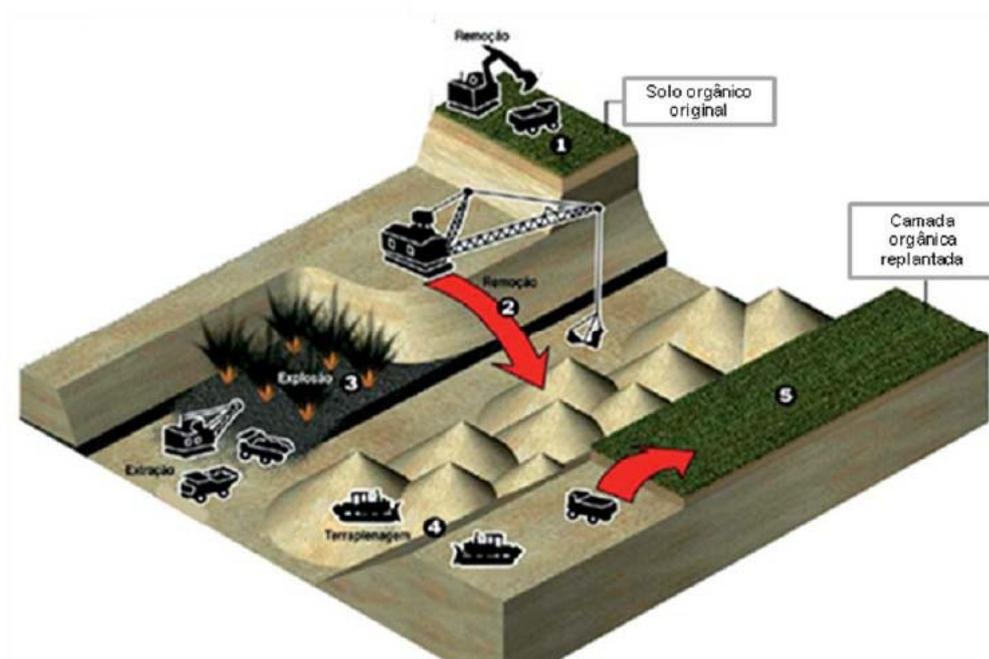
São conhecidos 23 leitos de carvão, dos quais somente a camada superficial, a mais importante tanto em espessura quanto em distribuição, tem sido minerada. Esta camada tem espessura média que varia de 2,30 a 6,17m, sendo constituída por dois bancos de carvão, denominados de Candiota Inferior (CI) e Candiota Superior (CS), de características constantes em termos de espessura e qualidade, intercalados com siltitos e argilitos de coloração cinza-escura. A espessura das camadas de silito e de argilito varia em torno de 0,70m (fig. 1) (SOARES et al., 2006). As litologias se repetem na estratigrafia, e sempre aparecem argilitos confinando os bancos de carvão da formação Rio Bonito, o que garante o ambiente impermeável e redutor propício e necessário para gênese do carvão (SOARES et al., 2006).



**Figura 1.** Perfil geológico da formação Rio Bonito na Jazida de Candiota, RS. Adaptado de Santucci (2009).

Os principais métodos de mineração de carvão no Brasil podem pertencer a dois grandes grupos: métodos de lavra a céu aberto e métodos de lavra subterrânea. A adoção de um dos métodos de lavra depende das condições geológicas locais e da profundidade do carvão mineral (KOPPE; COSTA, 2002). No Rio Grande do Sul e especificamente em Candiota, a mineração é feita utilizando o método a céu aberto (fig. 2).

O primeiro tipo de lavra (subsolo) é feita através de câmaras e pilares (*room and pillar*) e de caimento de teto (*longwall e shortwall*) (QUIÑONES, 2004). O segundo método de lavra é representado pelo método em tiras *stripping mining* e suas variantes de execução, a descobertura com *dragline*, o uso de bancadas com escavadeiras/caminhões ou a lavra em blocos com combinação de trator e *scraper*.



**Figura 2.** Seqüência do processo de mineração de carvão a céu aberto da mina de Candiota – RS, com posterior recuperação da área. Adaptado de Santucci (2009).

A mineração na mina de Candiota é feita pelo método a céu aberto com cortes sucessivos em sistemas de vaivém obedecendo aos seguintes procedimentos técnicos: a) retirada do solo superficial (horizonte A); b) retirada dos horizontes B e C (constituído de argila); c) perfuração e detonação do arenito; d) descobertura do carvão através de uma *walking-drag-line*; e) perfuração, detonação e extração do carvão do banco superior (BS) e do banco inferior (BI), com separação do argilito intermediário; f) recomposição topográfica, constituída pelos materiais de cobertura, com ou sem o aproveitamento de vazios para deposição de cinzas; g) deposição da “terra vegetal” sobre a área recomposta topograficamente; h) estabelecimento de práticas agrônômicas de preparo, conservação e correção do solo; e i) plantio de espécies vegetais (SANTOS, 2006).

O processo de deposição inadequado dos rejeitos de carvão leva a perdas do solo, à contaminação das águas superficiais e do lençol freático e a alterações na atmosfera próximas as minas pela geração de poeira, possibilitando, desta forma, o surgimento de um grande número de problemas ambientais (SANTOS, 2006).

No processo de recuperação de áreas de mineração de carvão a céu aberto são utilizados o solo e as litologias sobrejacentes às camadas de carvão (estéril) para preencher a cava e recompor topograficamente a paisagem. Esse empilhamento e, freqüentemente, mistura de solo e de rochas constitui os solos construídos, que são formados por materiais e procedimentos determinados pela ação humana (PINTO; KÄMPF, 2002).

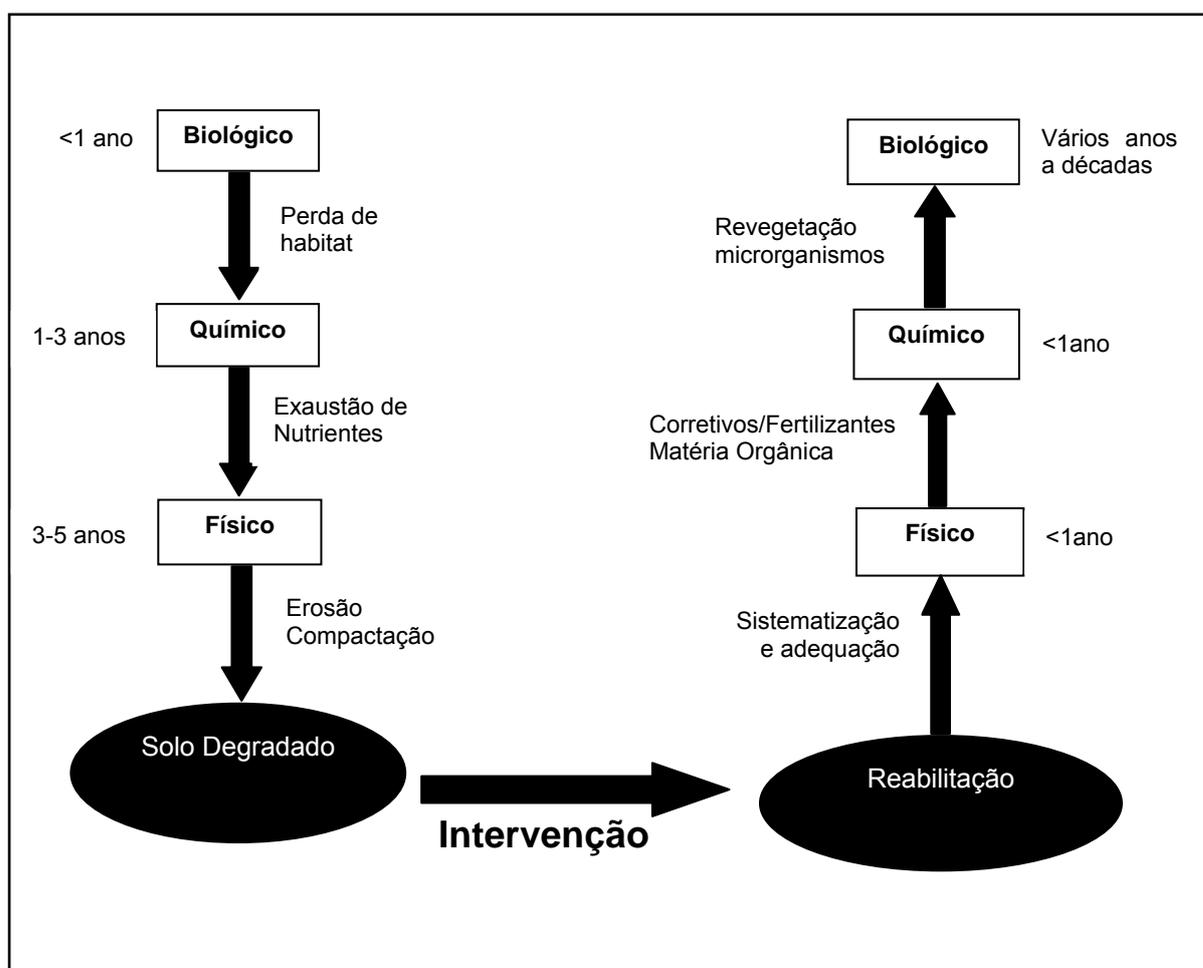
O sucesso na recuperação dessas áreas depende, fundamentalmente, de que a esses solos sejam proporcionadas condições para o desenvolvimento da vegetação (PINTO; KÄMPF, 2002).

## **2.2 Processo de degradação ambiental em área minerada de carvão mineral**

O uso do solo historicamente mostra que a alteração nem sempre dá lugar a um novo sistema ecológicamente sustentável e *equilibrado*, seja de lavouras ou de pastagens. Com isso, solos utilizados intensamente e de forma inadequada são levados à degradação (FORNASARI FILHO et al., 1994)

A degradação do solo é definida como o *declínio da qualidade e da capacidade produtiva do solo causada pelo mau uso do mesmo pelo homem* (SIQUEIRA et al., 1994). A degradação ocorre quando a vegetação nativa e a fauna são destruídas, a camada fértil do solo é perdida, removida ou enterrada e a qualidade e regime de vazão do sistema hídrico são alterados causando profundas mudanças no ecossistema, tornando-se inviável a exploração sócio-econômica e ambiental da área (IBAMA, 1990; BRADSHAW, 1997). A degradação é resultante principalmente de ações antrópicas como o desmatamento, mau uso do solo, construção civil, urbanização, mineração com deposição de rejeitos de carvão, e etc. Os processos degradativos ocasionados pelo uso inadequado do solo afetam primeiramente os atributos biológicos do solo, seguindo com a degradação de natureza física e química, comprometendo a estrutura e funcionamento dos ecossistemas, afetando a qualidade do solo com conseqüências imediatas à produtividade e aos serviços ambientais que este componente da biosfera participa (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). No entanto deve-se destacar que a degradação não é um processo irreversível, mas a recuperação é muito lenta e difícil de ser conseguida. Na recuperação, a seqüência temporal é inversa, pois primeiro faz-se a

correção dos atributos físicos e químicos para, em seguida, recuperar os atributos biológicos funcionais (fig. 3) e o tempo para a recuperação sustentada destes atributos pode variar de poucos anos a várias décadas ou até centenas de anos, dependendo do grau de degradação e do esforço nas ações recuperadoras.



**Figura 3.** Modelo dos processos de degradação e reabilitação de áreas degradadas – ênfase no aspecto cronológico de atributos funcionais determinantes da qualidade do solo (adaptado de Tian et al., 2001, apud Siqueira et al., 2008).

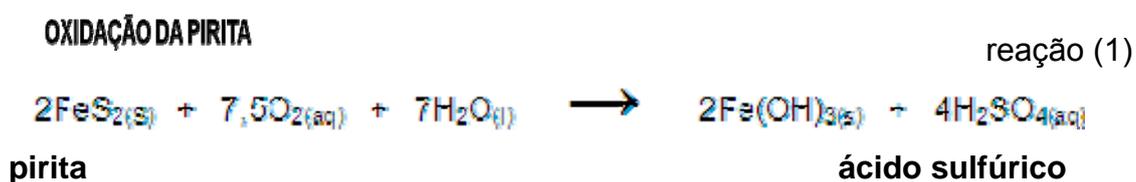
Os impactos ambientais provocados pela mineração de carvão, principalmente a céu aberto, acarretam a contaminação do solo, água e ar, causando impactos temporários ou permanentes (SANCHES; FORMOSO, 1990).

Em um ambiente com características redutoras, ocorre a formação de sulfetos, especialmente o sulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ), presente na forma de pirita, como também na forma de marcassita (MONTEIRO, 1980). Soares et al. (2006)

enfatizaram que durante o processo de mineração, inevitavelmente há exposição desses sulfetos ao oxigênio O<sub>2</sub> atmosférico. A exposição desses materiais ocasiona um processo pedogenético chamado de *sulfurização* (CARSON et al., 1982) (Reação - 1), predominando assim a reação de oxidação com produtos ácidos, sendo o processo conhecido por drenagem ácida (Fig. 4). A ocorrência deste fenômeno pode comprometer grande parte dos recursos hídricos naturais próximos aos locais de mineração, em consequência da solubilização e mobilização de metais pesados (SOARES et al., 2006).

A reversão de um ambiente degradado pelo processo de mineração de carvão, a um ambiente “equilibrado” só será possível com a correção da acidez, controle da erosão das áreas recuperadas através de manejo adequado do solo e com o rápido estabelecimento da vegetação e a manutenção da cobertura do solo ao longo do tempo (PINTO; KÄMPF, 2002).

Ações controladas de manejo do solo e manutenção de uma vegetação na superfície do solo com o aporte de resíduos vegetais contribuirá paulatinamente para a mitigação dos efeitos degradativos do ambiente solo minerado.



**Figura 4.** Efeito da exposição da pirita e formação do processo de drenagem ácida (fonte: próprio autor).

### 2.3 Recuperação de áreas degradadas

A recuperação de áreas degradadas pode ser conceituada como um conjunto de ações, idealizadas e executadas por profissionais de diferentes áreas, que visam proporcionar o restabelecimento da funcionalidade do solo no ecossistema (DIAS; GRIFFITH, 1998). A recuperação dos solos construídos prevê basicamente o surgimento de sucessão vegetal, de modo que essa revegetação promova a inibição do processo erosivo e a presença de indícios de reestruturação das propriedades físicas do solo, início de reciclagem de nutrientes, vegetação e organismos vivos (BUGIN, 2002).

Dentre as atividades antrópicas que intervêm no meio ambiente, a mineração é uma das que causa maior impacto nos ecossistemas (Sengupta, 1993), pois acarreta profundas alterações nas propriedades físicas, químicas e principalmente na redução da atividade biológica do solo (FOX et al., 1991; FRANCO et al., 1994). A recuperação dessas áreas é motivo de esforços por parte das empresas do setor e dos órgãos ambientais, universidades e institutos de pesquisas, que buscam procedimentos eficazes para restabelecer os processos essenciais do solo e dos ecossistemas alterados.

Em áreas degradadas pela remoção da vegetação e do solo ou de parte de suas camadas, levando à exposição do horizonte C ou, ainda, do subsolo, tem-se buscado a recuperação por meio da revegetação, pois é de amplo conhecimento a inter-relação da vegetação com a morfologia, a química e a biologia do solo (ALVES; SOUZA, 2008).

As propriedades dos solos construídos refletem as características dos materiais constituintes do solo natural e do método de construção adotado (PINTO, 1997). A correção posterior dos distúrbios pode ser difícil e onerosa, o que sugere que haja um considerável controle sobre as características do solo construído, obtido através de um manejo adequado e método de construção, com cuidadosa seleção dos materiais mais adequados para a construção e correta disposição destes nas áreas a serem recuperadas. Se os mesmos forem construídos com materiais de alta qualidade e em uma inclinação estável, esses podem superar o potencial de alguns solos naturais (SCHAFER et al., 1980).

A recuperação das áreas mineradas, que proporcione condições adequadas para um melhor desenvolvimento de uma vegetação sobre a área degradada, é um

dos principais objetivos, restabelecendo um ambiente “equilibrado” e sustentável conforme as exigências legais. O processo de remoção das limitações físicas e químicas presente nos solos construídos permite o estabelecimento, crescimento e a manutenção da vegetação sobre a superfície do solo regenerado.

A reversão da degradação do solo pode ser conseguida por meio de vários processos de recomposição (SIQUEIRA et al., 1994). Sims (1989) estudando os efeitos biológicos em solos degradados, enfatizou que a duração do impacto do uso inadequado do solo pode variar de 3 meses para solos impactados pelo uso de agroquímicos em geral, de 50 a 100 anos para aqueles submetidos à mineração e até 300 anos para aqueles de áreas desmatadas e em processo de recuperação espontânea.

#### **2.4 Revegetação de áreas degradadas**

O uso da revegetação, segundo Bugin (2002), é a etapa do processo de recuperação da área em que são adotadas as medidas para a implantação de uma cobertura vegetal, visando não somente a recuperação paisagística, mas também o controle dos processos erosivos e recuperação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

O uso de cobertura vegetal como medida mitigadora dos impactos ambientais é uma opção coerente, prática e econômica, embora apresente dificuldades de adaptação inerentes ao novo sistema ecológico que se desenvolve no local de origem (KITAMURA et al., 2008). Em um planejamento de recuperação de área degradada, o grande desafio a ser alcançado é o estabelecimento de um horizonte A, para que, a partir daí, o processo seja catalisado pela biosfera, podendo surgir outros horizontes, conforme o condicionamento natural. Desse modo, interfere-se em um ou mais fatores de formação do solo, numa tentativa de acelerar sua gênese. Portanto, em trabalho de recuperação, a primeira atividade compreende a identificação e caracterização dos processos de degradação atuantes e a análise de suas conseqüências ambientais. Para isso, é necessário o uso de indicadores que traduzam quantitativa ou qualitativamente o grau da degradação existente e, ainda, permitam estimar a dimensão dos esforços técnicos e econômicos que deverão ser alocados na recuperação (KITAMURA et al., 2008).

O uso de cobertura vegetal contribui para o fornecimento de matéria orgânica, que constitui um reservatório importante de nutrientes para os microrganismos, colabora para o aumento da capacidade de armazenamento de água do solo e diminui as variações térmicas e hídricas do solo, favorecendo o desenvolvimento microbiano e a biodiversidade local do solo (HUNGRIA et al., 1994).

Para auxiliar no controle da erosão em solos construídos, Bugin (2002), enfatizou que as gramíneas e as leguminosas são as espécies que melhor se adaptam, devido à sua capacidade de cobrir rapidamente o solo com um sistema radicular denso e profundo, o qual possui uma maior capacidade na recuperação da estabilidade estrutural do solo. Existem diferenças quanto ao comportamento e ação das plantas utilizadas para cobertura do solo. Santos, (2006) estudando solos construídos em áreas de mineração de carvão mineral na região sudoeste do Rio Grande do Sul, enfatizou que as gramíneas proporcionam condições de proteção do solo. O tapete formado pela parte aérea e o sistema radicular fasciculado garantem proteção da superfície do solo, o que atenua os danos causados por chuvas torrenciais, e impedindo o escoamento superficial das partículas do solo, nutrientes e matéria orgânica, anulando quase que totalmente a erosão do solo. Este mesmo autor caracteriza as leguminosas como plantas boas, recobridoras e de fácil propagação, com estabelecimento inicial mais rápido e denso.

## **2.5 Caracterização das plantas utilizadas na revegetação da área experimental**

A Hemátria é uma espécie nativa em diversos continentes: Sul da Europa (Grécia, Itália, Espanha), África, Oceano Índico, Ásia Ocidental (Turquia, Arábia Saudita, Líbano), Sul da Ásia (Índia), Sudeste Asiático (Indonésia, Tailândia, Mianmar). Esta planta cresce bem em solos com pH entre 5,5 e 6,5, mas tolera acidez até pH 4,5. Além disso, é tolerante a locais com problemas de encharcamento, tolerando também períodos curtos de seca. Por ser encontrada naturalmente entre latitudes 40°N e 34°S, tolera calor (ótimo de desenvolvimento entre 31 e 35°C) e geadas, tolerando frios de até -10°C. Possui alta velocidade de crescimento e alto potencial de adição de biomassa por períodos maiores que outras

gramíneas tropicais. Produz pouca semente, logo sua implantação se dá por mudas (estacas de estolões) (MIOLA, 2010).

A Pensacola é uma gramínea perene original do estado do Rio Grande do Sul que foi melhorada na Flórida (EUA), apresenta estolões curtos e folhas estreitas. Requer índice pluviométrico acima de 800mm anual e tem baixa resistência ao sombreamento. Esta planta é muito rústica, apresenta bom valor nutritivo e é resistente ao pisoteio. Apresenta, entretanto, desenvolvimento lento e incidência alta de sementes dormentes (MIOLA, 2010).

A grama Tifton é, provavelmente, originária do Sudeste da África, sendo esta, uma gramínea de clima subtropical temperado, rizomatosa. É sensível ao sombreamento, e menos tolerante ao frio que as demais, é relativamente exigente em fertilidade. Trata-se de um híbrido pertencente a mesma espécie do capim vaquero, porém de variedades diferentes. Entretanto, apresenta enraizamento a cada nó, lhe conferindo uma vantagem comparativa em termos de estabelecimento (MIOLA, 2010).

A Braquiária brizanta, conforme Cook et al. (2008), é uma gramínea perene tropical, de crescimento rápido em condições de temperatura elevada, estolonífera, adaptada a solos de textura média a argilosa, média tolerância a seca, não tolera fogo e encharcamento, e é adaptada a condições de menor fertilidade, embora prefira solos com pH entre 5 e 7,5. Não suporta sombreamento e frio. Sua propagação se dá via sementes (MIOLA, 2010).

A Braquiária humidícola é uma gramínea originária da África Equatorial. Trata-se de uma espécie de ciclo vegetativo perene e forma de crescimento estolonífero, adaptada muito bem a solos de média a baixa fertilidade e requer uma precipitação anual em torno de 1.500mm. A mesma apresenta uma boa resistência à seca, ao sombreamento e ao pisoteio. Em relação à encharcamento de solo, apresenta boa tolerância, não suportando, porém, áreas que permanecem alagadas por muito tempo.

O Capim Tanzânia, é uma espécie de origem africana, com alta exigência em fertilidade, apresentando alta resposta a fertilização fosfatada (PATÊS et al., 2007).

O capim vaqueiro é uma espécie originária das Ilhas Bermudas e África. Possui ciclo perene, resistente ao pisoteio, com rápido crescimento e regeneração, e indicada para o controle da erosão do solo. É considerada uma excelente pastagem,

tolerante a seca e altas temperaturas, multiplicada por sementes, estolões e rizomas (VICTOR et al., 2007).

## **2.6 Biomassa microbiana do solo e sua importância**

A biomassa microbiana do solo (BMS) pode ser definida como o principal constituinte microbiano vivo da matéria orgânica do solo (MOS), incluindo bactérias, actinomicetos, fungos, protozoários, algas e microfauna, (SANTOS et al., 2008, SILVA; MENDONÇA, 2007). Excluindo-se raízes de plantas e animais do solo maiores do que  $5 \cdot 10^{-3} \text{mm}^3$ , a biomassa microbiana contém, em média, de 2 a 5% do C orgânico do solo (JENKINSON; LADD, 1981) e de 1 a 5% do N total do solo (SMITH; PAUL, 1990).

A BMS atua como agente decompositor e como reserva lábil de C e nutrientes e no fluxo de energia do solo. Há tendência da BMS ser maior em camadas superficiais pela maior disponibilidade de matéria orgânica (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Os microrganismos, destacando-se os heterotróficos, que compõem a BMS possuem função catalítica sobre a MOS. Em decorrência disso, a BMS é a chave que controla os processos de mineralização-imobilização dos nutrientes na MOS. Por essa razão, ela é um dos principais componentes dos modelos de ciclagem de nutrientes (VENZKE FILHO et al., 2008). Os processos biológicos do solo, portanto formam um contínuo indissociável com organismos que nele se proliferam e com as condições ambientais dominantes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Os principais fatores que controlam os processos de transformação da matéria orgânica no solo (MOS) são a quantidade e qualidade do material, o ambiente físico e químico e os organismos decompositores. Entre os organismos, bactérias e fungos apresentam altos valores de biomassa e metabolismo respiratório e têm grande participação no processo de decomposição da MOS (TOLEDO, 2003; LEJON et al., 2005). Uma flora variada de bactérias e fungos pode realizar a degradação completa de material orgânico de restos de plantas e animais, mas, em prática, eles raramente agem sozinhos. É a diversidade microbiana e de espécies da fauna edáfica envolvidas nesse processo que permite decompor estrutural e

quimicamente os tecidos complexos de uma planta ou restos de animais (BEARE et al., 1992).

A contribuição da microbiota do solo na ciclagem de nutrientes, imobilizados em sua biomassa, pode ser predita por meio de suas proporções em relação às formas totais desses nutrientes (SILVA; MENDONÇA, 2007).

O C associado à BMS (C-BM) representa um dos compartimentos da MOS com menor tempo de ciclagem. A BMS responde rapidamente às práticas que levam ao decréscimo ou acréscimo da MOS (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Gama-Rodrigues et al. (2008), enfatizaram que a BMS representa o compartimento no qual a ciclagem de C orgânico é mais rápida, e tem sido usada em estudos de fluxos de C e de nutrientes em vários ecossistemas terrestres. Mele e Carter (1993), ressaltaram que para o estudo de qualidade do solo em decorrência de alterações no estado natural, a biomassa e a atividade microbiana têm sido pesquisadas como bioindicadores dos níveis de matéria orgânica e da qualidade do solo, auxiliando na orientação de mudanças das técnicas de manejo do solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Gama-Rodrigues et al. (1997), estudando solo e serrapilheira com diferentes coberturas, enfatizaram que os valores de C da BMS indicam o potencial de reserva de carbono no solo que participa do processo de humificação. Nesse sentido, permite estimar o acúmulo ou perda de carbono em função de determinado manejo ou condição edáfica. Quanto maior o C da biomassa microbiana, maior será a reserva de C no solo. Quando a biomassa microbiana exerce função de reserva, a quantidade de nutrientes fornecida via ciclagem microbiana é menor do que a que entra no sistema, maior será o carbono no solo, expressando menor potencial de decomposição da matéria orgânica. Na função catalisadora, as quantidades de entrada e saída são semelhantes, ou seja, o balanço é nulo. Do mesmo modo, se comporta o Nitrogênio da biomassa microbiana, constitui uma parte significativa do elemento potencialmente mineralizável que estará disponível para as plantas (GALLARDO; SCHLESINGER, 1990; GAMA-RODRIGUES, et al., 1997). Em um ambiente com baixos níveis de N, o elemento contido na biomassa microbiana será preferencialmente utilizado pelos microrganismos no processo de decomposição da matéria orgânica, ao invés de ser absorvido pelas plantas (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RDRIGUES, 2008).

No que se refere à quantificação da biomassa microbiana do solo são utilizados os seguintes métodos: observação direta; fumigação-incubação (JENKINSON; POWLSON, 1976); taxa de respiração em resposta à adição de glicose (ANDERSON; DOMSCH, 1978); índice ATP (OADES; JENKINSON, 1979); fumigação-extração (BROOKES et al., 1985; VENCE et al., 1987; TATE et al., 1988); irradiação-extração (FERREIRA et al., 1999). O uso desses métodos para aferir na estimativa da biomassa microbiana, tem sido objeto de muitos questionamentos quanto a sua confiabilidade, por parte de pesquisadores envolvidos no processo, visto a sua estimativa ser muito influenciada por fatores edafoclimáticos (GRISI, 1988). Portanto o ideal e mais seguro é a utilização de mais de um método para estudos envolvendo a biomassa microbiana do solo.

A presença de biomassa sobre o solo depende da quantidade de carbono adicionado. Sendo assim em solos naturais, os teores elevados de argila ou sob cultivo mínimo, torna-se beneficiada, porém é baixa nos solos com um mínimo de perturbação e principalmente em solos degradados por processos de mineração, ou contaminados com substâncias orgânicas tóxicas ou metais pesados (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002).

## **2.7 Biomassa microbiana em solos construídos**

Em áreas em processo de degradação, os níveis de MOS são geralmente baixos e isso representa uma perda das funções vitais do solo, comprometendo sua qualidade e capacidade de produzir alimentos e biomassa. A eliminação da vegetação que protege o solo também aumenta o impacto da força erosiva da chuva e, por consequência, aumenta a erosão. Alterações no estado de equilíbrio da terra podem causar perdas do estoque de COS, que em sua grande maioria se perde para a atmosfera. Podem ocorrer reduções de 60 a 75% do estoque original de MOS em poucos anos de atividade agrícola (Lal, 2004) e valores de até 67% em áreas degradadas pela mineração de carvão mineral (SIQUEIRA et al., 2008). Do mesmo modo que a mistura de horizontes impacta a matéria orgânica, a mineração reduz sensivelmente a biomassa microbiana (SIQUEIRA et al., 2008).

Há áreas de mineração carvão na Índia que, mesmo após 20 anos de recuperação espontânea, apresentam reduções de 50% nas concentrações do C e

do N da biomassa microbiana, em relação aos teores encontrados em solo sob floresta sem interferência antrópicas (CARNEIRO et al., 2008)

Santos (2006) estudando solos construídos em área de mineração de carvão mineral no sudoeste do RS ressaltou que os cultivos de Hemária, Tifton, Pensacola e Tifton + Amendoim forrageiro, aumentaram os teores de carbono da biomassa microbiana no solo construído, após aproximadamente um (01) ano de cultivo.

Entre os processos vitais à funcionalidade do ecossistema, destacam-se as formas e os ciclos dos elementos no sistema solo-planta, em especial do C, que exerce função reguladora sobre as transformações e ciclagem dos demais elementos no solo. As transformações dos materiais orgânicos são catalisadas pela atividade microbiana do solo, que, por isso, desempenha papel essencial na reabilitação de solos degradados (CARNEIRO et al., 2008). Interferências antrópicas drásticas, como a mineração, causam grandes perdas da matéria orgânica, o que ocasiona diminuição da atividade microbiana, pois a matéria orgânica é fonte de nutrientes e energia para a população microbiana do solo e de nutrientes para esta e para as plantas, sendo por isso considerada um atributo-chave para o sucesso da reabilitação de solos minerados (CARNEIRO et al., 2008).

Estudos realizados em solos de mineração de bauxita na Austrália mostraram perdas de 90% do CO e N total do solo, sendo necessários em torno de 33 anos para que esses elementos atinjam teores equivalentes aos de áreas adjacentes não mineradas (SCHWENKE et al., 2000a,b,c).

Santos (2006) avaliando solo regenerado após mineração de carvão ressaltou que a atividade microbiana se restabeleceu com o tempo de cultivo, sendo que após 1,5 anos de cultivo de Tifton + Amendoim forrageiro os valores foram semelhantes ao observados no solo natural.

A ausência de cobertura adequada no solo resulta em baixa disponibilidade de nutrientes para os microrganismos e predispõe o solo a erosão, perda da fertilidade do solo, e da capacidade regenerativa do solo, etc., (SIQUEIRA et al., 2008). Atualmente, se emprega a determinação da BMS para avaliar estes efeitos na recuperação de áreas degradadas pela mineração (CARNEIRO et al., 2008). Portanto, o conhecimento da ecologia microbiana de solos degradados e seu monitoramento cronológico seguido o processo de reabilitação, tornam-se de grande importância.

As maneiras de se adicionar MO ao solo degradado são bastante distintas, podendo ocorrer diretamente pela adição de material orgânico exógeno e serrapilheira, ou indiretamente pela revegetação da área. O uso de gramíneas e de leguminosas fixadoras de nitrogênio (FBN), associadas ou solteiras, aliado a correção do solo, são estratégias que aceleram a recuperação de áreas mineradas (CARNEIRO et al., 2003).

## 2.8 Atividade microbiana do solo

A atividade microbiana do solo é geralmente mensurada em termos metabólicos, através de indicadores como CO<sub>2</sub> liberado, O<sub>2</sub> absorvido, atividade enzimática e calóricas, N, P, e S mineralizados (Grisi, 1995; Santos et al., 2008), análise da respiração basal; quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>); relações C microbiano: N microbiano; C microbiano: C total; N microbiano: N total; C total: N total (FILHO, 1999). O termo respiração do solo se define pela absorção de O<sub>2</sub> livre e/ou liberação de CO<sub>2</sub> pelas bactérias, fungos, algas e protozoários no solo, com trocas gasosas em ambiente aeróbio e anaeróbio (ANDERSON, 1982). A importância em mensurar o CO<sub>2</sub> ao invés de O<sub>2</sub>, está relacionada ao CO<sub>2</sub> refletir a atividade tanto de microrganismos aeróbios quanto de anaeróbios, além de ser um indicador sensível de perturbação dos ecossistemas manejados.

A taxa de respiração específica da biomassa microbiana (TRBM), trata-se de uma ferramenta que pode ser usada para definir e quantificar mais claramente a atividade microbiana do solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RDRIGUES, 2008) e para caracterizar os riscos de degradação dos solos quanto aos compartimentos de matéria orgânica. Sendo assim, quando a TRBM é nula, indica que, à medida que uma determinada biomassa microbiana é mais eficiente, menor C é perdido como CO<sub>2</sub> para a atmosfera pela respiração e assim incorporando uma maior fatia de C ao tecido microbiano vivo do solo. Portanto, solos com TRBM baixa, caracterizam um ambiente próximo do estado de equilíbrio.

Conforme Anderson e Domsch (1993) e Wardle (1993), recomendam a utilização da TRBM como um índice metabólico para avaliar os efeitos das condições de estresse (diminuição da quantidade de matéria orgânica, diminuição

do pH do solo, redução nos níveis de nutrientes e aumento nos teores de C orgânico recalitrante) sobre a atividade e biomassa microbiana do solo.

As relações C microbiano: C orgânico e N microbiano: N total expressam índices de qualidade nutricional da matéria orgânica e a eficiência da biomassa microbiana em imobilizar C ou N. Solos com teores de matéria orgânica de baixa qualidade nutricional, expressam um ambiente microbiano relativamente perturbado (GAMA-RODRIGUES, 1992).

## **2.9 Histórico e características dos Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs)**

Frank (1885), estudando as relações microbianas do solo vegetal, deduziu que fungos micorrizicos formam relações simbióticas com as raízes das plantas de maneira semelhante à nódulos de raízes associadas a bactérias do gênero *Rhizobium* em leguminosas.

Há mais de três décadas J.L. Harley enfatizou que “plantas não têm raízes, elas têm micorrizas”, alertando os pesquisadores, que em condições naturais, a maioria das espécies de plantas se encontra associada a determinados fungos de solo numa simbiose mutualística do tipo micorrizico (BERBARA et al., 2007).

Atualmente, foram descritos sete tipos diferentes de micorrizas (Arbuscular-, Ecto-, Ectendo-, Arbutoid-, Monotropoid, Ericoid e Orchidaceous Mycorrhizae), (SMITH; READ, 1997). As espécies de fungos micorrizicos arbusculares (FMAs) e ectomicorrizicos (ECMs), são as que predominam na maioria das espécies de plantas vasculares. Os fungos micorrizicos arbusculares (FMAs) são os mais comuns, e representam mais de 80% das associações micorrizicas e mutualistas, presentes nas plantas vasculares. Os FMAs são mutualistas obrigatórios pertencentes ao filo Glomeromycota e têm uma distribuição ubíqua global em ecossistemas terrestres e mesmo em áreas com elevado grau de degradação (REDECKER, et al., 2000; STÜRMER; SIQUEIRA, 2008). São encontrados em quase todas as famílias de espécies herbáceas e arbóreas de interesse na recuperação de áreas degradadas especialmente de espécies tropicais.

## 2.10 Importância dos Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs)

A contribuição dos FMAs na recuperação de áreas degradadas está relacionada com a capacidade das plantas micorrizadas de aumentar a produção de massa seca e conseqüente atividade fotossintética que se relaciona diretamente com a produção de massa vegetal, fundamental para melhoria da cobertura de solos degradados (redução do impacto da chuva) e possibilita maior taxa fotossintética por área (aumento na fixação de CO<sub>2</sub>) e maior fluxo de nutrientes entre o solo e a vegetação. As micorrizas arbusculares desempenham ainda papel importante no crescimento de espécies herbáceas em solos degradados (SAGGIN-JÚNIOR, 1997; CARNEIRO et al., 1999). De acordo com Macedo et al. (2008), o uso combinado de espécies de leguminosas com bactérias fixadoras de N e FMAs propiciou taxas de seqüestro de C e N de 1,73 e 0,13t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente, em um período de 13 anos de recuperação de áreas degradadas.

A associação simbiótica ocorre pelo fato de os organismos co-existirem em um mesmo ambiente físico, raiz e solo, e mutualística, quando ambos os simbioses se beneficiam da associação. Ela é considerada como mutualística nutricional, em que a planta supre o fungo com energia para crescimento, como compostos com C (fixado via processos fotossintéticos pelo simbiote autotrófico), enquanto os fungos provêm as plantas com nutrientes (especialmente o P, e em menores quantidades, Cu, Mg e Zn), e água, graças ao fungo produzir hifas intra e extra-radiculares capazes de absorver elementos minerais do solo e transferi-los ao ambiente radicular, onde são absorvidos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Os FMAs só completam seu ciclo e a resposta em crescimento da planta inoculada depende da compatibilidade genética e funcional entre a espécie de planta hospedeira e a estirpe do fungo utilizada, bem como das condições ambientais vigentes, como tipo de solo, pH e disponibilidade de nutrientes, em especial o P. Em condições naturais, os benefícios da simbiose micorrizica dependerão da comunidade de fungos presentes e da competição estabelecida entre ambas Heijden et al., (1998a apud BERBARA et al., 2007). Os FMAs são importantes na absorção de nutrientes, com comunidades vegetais, influenciando a diversidade vegetal e abundância, estabilidade de ecossistemas, ao participarem de forma ativa e significativa na dinâmica do C e agregação do solo. É notório não apenas na perspectiva da planta, mas do solo em suas múltiplas relações, que FMAs são atualmente reconhecidos

como um componente integral e fundamental na construção e estabilidade de ecossistemas de todo o planeta van der Heijden et al. (1998 a,b; 2003 apud Berbara et al., 2007). De acordo com Bago et al. (2000 apud BERBARA et al., 2007), estimaram que globalmente, FMAs possam ser responsáveis pelo dreno anual de cinco bilhões de toneladas (5Gt) de C aos solos.

As avaliações dos índices de colonização das raízes normalmente baseiam-se na presença de arbúsculos, hifas e vesículas (BALOTA; LOPES, 1996).

Em se tratando da nutrição mineral de plantas e otimização das funções de ecossistemas, visando aos aumentos em sua estabilidade e resiliência, são considerados alguns atributos biológicos como centrais: (a) quantidade e qualidade de raízes (finas, terminais, não-lignificadas e metabolicamente ativas); (b) riqueza e abundância de organismos como FMAs; (c) bactérias promotoras de crescimento de plantas (incluindo bactérias fixadoras de fosfato); e (d) minhocas (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

As simbioses radiculares, particularmente as fixadoras de N<sub>2</sub> atmosférico e as micorrizas, têm grande contribuição na revegetação de áreas degradadas pelos processos de mineração por facilitar o estabelecimento das plantas e assim os processos advindos da presença destas, como a proteção ao solo e estabelecimento das interações tróficas positivas.

## **2.11 Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs) em solos construídos**

Melloni et al. (2003), estudando fungos micorrizicos arbusculares em áreas de mineração de bauxita, enfatizaram que a atividade de mineração exerce grande impacto adverso sobre os organismos e processos do solo, inclusive sobre os FMAs. Por serem biotróficos obrigatórios, portanto dependentes da presença de plantas hospedeiras para completarem seu ciclo de vida, os fungos MAs sofrem grande redução quando os ecossistemas são submetidos a interferências antrópicas intensas que destroem a vegetação, como ocorre em áreas de mineração. Diversos estudos realizados em solos dessas áreas, como de mineração de carvão, nos EUA e de magnesita e carvão, na Índia, mostraram redução do número de propágulos desses fungos e baixa colonização das plantas locais. A substituição da camada superficial do solo original por outra com baixo número de propágulos, o longo tempo de armazenamento desta camada superficial antes da reabilitação (Melloni et

al., 2003), a destruição física da rede micelial Jasper et al. (1992 apud Melloni et al., 2003), a retirada da vegetação, a exposição dos propágulos a extremos de umidade e temperatura (Melloni et al., 2003) e baixos valores de pH, reduzem a densidade e diversidade das espécies de fungos micorrizicos arbusculares. A implantação da vegetação e conseqüente sucessão decorrente da reabilitação podem reverter, pelo menos em parte, os impactos da mineração sobre esses fungos. A diversidade dos fungos MAs se relaciona com a diversidade da vegetação, pois “comunidades vegetais regulam e são reguladas por FMAs” (van der HEIJDEN et al., 1998a). No entanto são de grande importância à estruturação, adaptação trófica, expansão da área radicular que corresponde com uma maior área foliar e produção de massa vegetal, acúmulo de nutrientes, desenvolvimento e sustentabilidade da comunidade vegetal e reabilitação dos solos minerados (SIQUEIRA et al., 2008).

O uso potencial dos FMAs utilizados na recuperação de áreas degradadas já está bem descrito e registrado na literatura científica (Siqueira et al., 2008), e estratégias utilizadas para aplicação dos mesmos em solos de áreas mineradas se encontram bem estabelecida. No entanto, o uso destes simbioses como agentes biorrecuperadores é ainda muito limitado, necessitando assim incorporar esse componente fungico às inúmeras funções realizadas pelo solo, relacionando à estabilidade e resiliência de ecossistemas (BERBARA, et al., 2007).

Embora a pesquisa envolvendo FMAs tenha começado a muitos anos atrás, com descrições e hipóteses documentadas sobre a funcionalidade das associações micorrizicas, sugere-se que o impacto mais profundo dessa simbiose ainda está por ser descoberto com a ampliação das pesquisas e envolvendo ações multidisciplinares, na busca de uma maior dimensão na compreensão dessa simbiose.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização da área experimental

O presente estudo foi desenvolvido em uma área de mineração de carvão mineral, pertencente à Companhia Riograndense de Mineração (CRM), localizada no município de Candiota – RS.

A área de mineração da CRM, no município de Candiota, cujas Coordenadas geográficas são 31° 33' 55,5"S, 53° 43' 30,6"W, e altitude de 230m, está situado a 400km da cidade de Porto Alegre e 140km de Pelotas. A região caracteriza-se por apresentar um clima subtropical úmido, tipo Cfa, segundo a classificação de Wilhelm Köppen. A temperatura média anual é de 17,2°C, sendo a média do mês mais quente 24,2°C em fevereiro e a média do mês mais frio 12,2°C em julho. A temperatura máxima absoluta registrada foi de 45°C e a mínima -2,0°C (ALVES, 2006).

O solo natural da frente de mineração é classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico típico (Embrapa, 2006) e uma caracterização química e microbiológica (tab. 1):

A área experimental é de um solo construído em 2003, após mineração do carvão e caracteriza-se por uma camada inferior formada de materiais fragmentados de argilitos, folhelhos, folhelhos carbonosos e arenitos removidos por detonação da cobertura da camada de carvão. A camada superior (aproximadamente 15 – 20cm) é formada predominantemente de horizonte B misturado com o horizonte A, retirados da área, anteriormente à extração do carvão e novamente recolocado.

Em setembro de 2003 o solo foi escarificado a uma profundidade de 0,10 a 0,15m e, em outubro/novembro do mesmo ano, realizou-se uma calagem com aplicação correspondente a 10,4t ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 100% e uma adubação a lanço equivalente a 900kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 5-20-20. Foi feito plantio de mudas e semeadura de diferentes espécies de plantas de cobertura (anuais e perenes), as quais não se estabeleceram devido à seca ocorrida no período. Nos anos seguintes (2004, 2005 e 2006) a área foi cultivada com aveia preta (*Avena stringosa*) no inverno e, em todos os verões, novamente tentou-se implantar os tratamentos com diversas espécies de plantas de cobertura solteiras e/ou consociadas. Destas, somente o Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) estabeleceu-se satisfatoriamente, desde 2004. Em maio de 2007, por ocasião do plantio da aveia, a

área foi novamente adubada com dose equivalente a 750kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 5-20-20. Durante todo período, ocasionalmente também foram efetuadas adubações de cobertura nitrogenada com uréia ou sulfato de amônio.

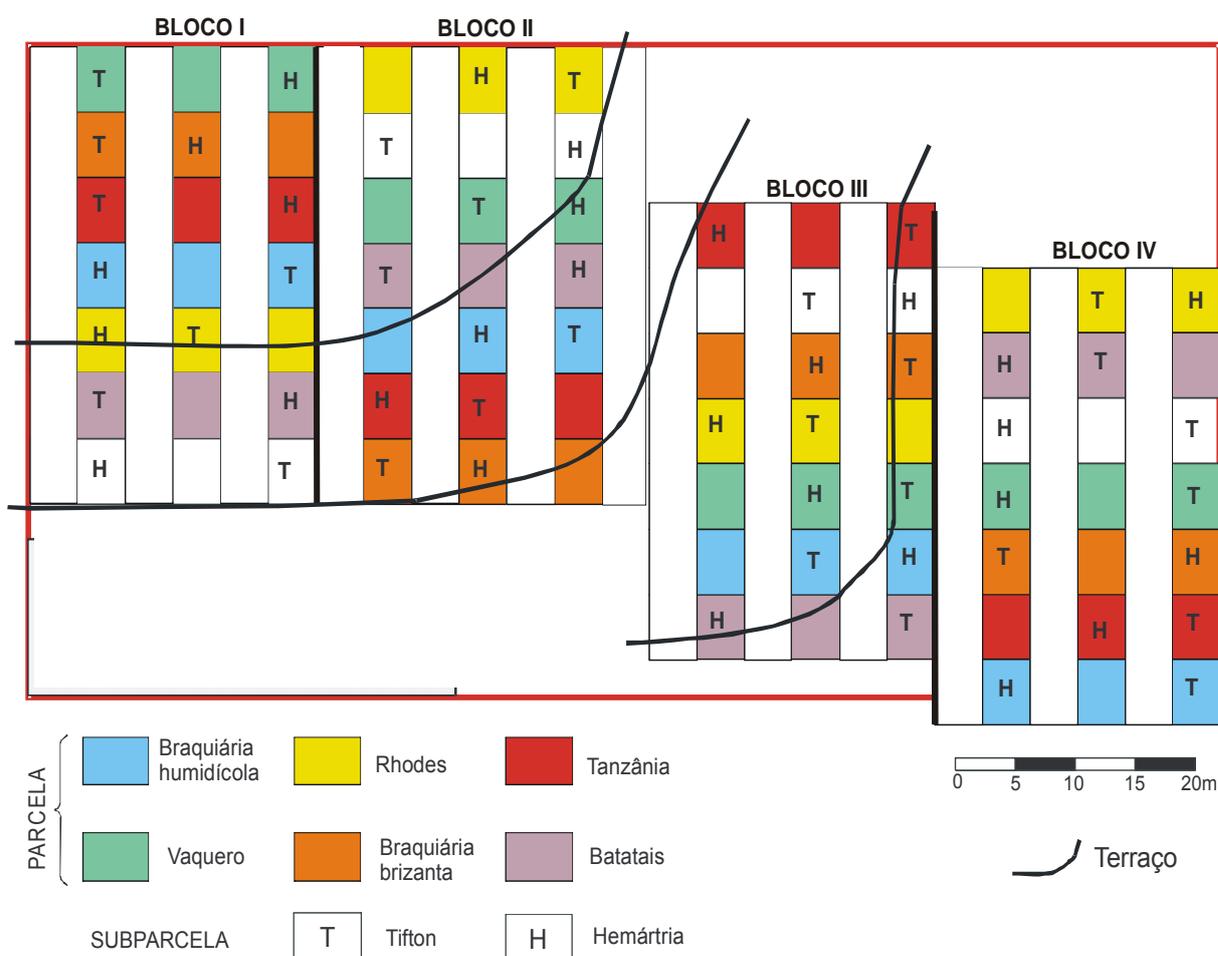
**Tabela 1.** Valores médios de pH<sub>H2O</sub>, condutividade elétrica (CE), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), sódio (Na), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), nitrogênio total (Nt), carbono orgânico total (COT), carbono microbiano (Cmic) e nitrogênio microbiano (Nmic), respiração basal (RB), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>), relações carbono orgânico total/nitrogênio total (COT/Nt), carbono microbiano/nitrogênio microbiano (Cmic/Nmic), carbono microbiano/carbono orgânico total (Cmic/COT), nitrogênio microbiano/nitrogênio total (Nmic/Nt), percentual de colonização de raízes por FMAs e número de esporos de FMAs de um solo natural anterior ao processo de extração de carvão mineral, na profundidade de 0 – 5cm.

| <b>pH<sub>H2O</sub></b>        | <b>CE</b><br>mS cm <sup>-1</sup> | <b>Ca</b><br>-----cmolc dm <sup>-3</sup> ----- | <b>Mg</b>                          | <b>K</b>      | <b>P</b><br>mg kg <sup>-1</sup> |
|--------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|---------------|---------------------------------|
| 4,7                            | 0,068                            | 2,28   | 1,11                               | 0,17          | 57,8                            |
| <b>Na</b>                      | <b>Mn</b>                        | <b>Zn</b>                                      | <b>Cu</b>                          | <b>Nt</b>     | <b>COT</b>                      |
| -----mg kg <sup>-1</sup> ----- |                                  |  | -----g Kg <sup>-1</sup> -----      |               |                                 |
| 6,87                           | 87,9                             | 2,48   | 0,92                               | 1,92          | 27,42                           |
| <b>Cmic</b>                    | <b>Nmic</b>                      | <b>RB</b>                                      | <b>qCO<sub>2</sub></b>             | <b>COT/Nt</b> | <b>Cmic/Nmic</b>                |
| -----mg Kg <sup>-1</sup> ----- |                                  | µg C-CO <sub>2</sub> /h/g                      | qCO <sub>2</sub> x10 <sup>-3</sup> |               |                                 |
| 500                            | 65,62                            | 1,31   | 2,83                               | 14,3          | 7,85                            |
| <b>Cmic/COT</b>                | <b>Nmic/Nt</b>                   | <b>% colonização raízes</b>                    | <b>Nº esporos FMAs</b>             |               |                                 |
| -----%-----                    |                                  |  |                                    |               |                                 |
| 1,83                           | 3,42                             | 40   | 193                                |               |                                 |

Em novembro/dezembro de 2007, após aplicação de herbicida dessecante (Glifosato) e adubação com 750 kg há<sup>-1</sup>(5-20-20) foram semeadas e/ou plantadas mudas de espécies de gramíneas perenes solteiras e consorciadas, as quais finalmente se estabeleceram e constituíram os tratamentos avaliados neste estudo: T1 – Capim Vaqueiro (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); T2 - Braquiária (*Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf); T3 - Capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq); T4 – Braquiária humidícola (*Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickt); T5 - Hemátria (*Hemarthria*

*altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard); T6 - Grama Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); T7 – Capim Vaqueiro+Grama Tifton; T8 – Capim Vaqueiro+Hemártria; T9 – Braquiária brizantha+Grama Tifton; T10 – Braquiária brizantha+Hemártria; T11 - Capim Tanzânia+ Grama Tifton; T12 - Capim Tanzânia+Hemártria; T13 - Braquiária humidícola+Grama Tifton; T14 – Braquiária humidícola+Hemártria. O delineamento experimental foi constituído de casualização por blocos com quatro repetições e as unidades experimentais por parcelas de 20m<sup>2</sup> (4m x 5m) (fig. 5).

Em fevereiro de 2008 aplicou-se uréia (100kg ha<sup>-1</sup>) em todas as parcelas e, em dezembro, efetuou-se adubação NPK (200kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 5-20-20), seguida de cobertura com uréia (250 kg ha<sup>-1</sup>). Em 19/09/2009, foi aplicado 250kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 5-30-15 e mais 100kg ha<sup>-1</sup> de uréia em todos os tratamentos. Capinas manual com enxada foram realizadas, sempre que surgissem plantas invasoras na área.



**Figura 5.** Localização e croqui da área experimental.

### 3.2 Coleta e preparo das amostras

Em 25/09/2009 foram coletadas na profundidade de 0-0,05m amostras de solo de cada tratamento (unidade experimental), compostas de cinco sub-amostras, com o auxílio de uma pá de jardijagem. Para as análises de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) foi retirada em cada parcela uma amostra simples do solo rizosférico e das raízes das plantas. Para efeito de comparação foram retiradas quatro amostras de uma área adjacente ao experimento (ao lado do experimento), denominado de T15 (SC) solo construído, sem a implantação de plantas de cobertura.

As amostras foram conduzidas para o Laboratório de Microbiologia do solo, Departamentos de solos da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”- UFPel, sendo uma parte armazenada em sacos de polietileno sob refrigeração ( $\pm 4^{\circ}\text{C}$ ) para posterior análises dos atributos microbiológicos do solos. Outra parte foi seca em estufa ( $60^{\circ}\text{C}$ ) e moídas a 2mm (TFSE) para análises dos atributos químicos.

### 3.3 Análises químicas do solo

As análises químicas efetuadas no solo foram: condutividade elétrica, pH em água, potássio, fósforo, cálcio, magnésio, sódio, manganês, cobre e zinco segundo métodos descritos em TEDESCO et al., (1995).

O nitrogênio total foi determinado pelo método Kjeldahl e os teores de carbono orgânico total pelo método Walkley - Black modificado (sem aquecimento externo), conforme descrito em TEDESCO et al., (1995).

Determinou-se a relação  $C_{\text{total}}:N_{\text{total}}$  pela equação 1:

$$C_{\text{total}}/N_{\text{total}} = \frac{COT(\text{gkg}^{-2})}{NT(\text{gkg}^{-2})} \quad \text{equação 1}$$

### 3.4 Análises microbiológicas do solo

#### 3.4.1 Biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana do solo foi determinada pelo método descrito por Vance, et al., (1987), usando-se, entretanto, o forno de microondas (2.450MHz, Panasonic®, Modelo EM 9003B) por quatro minutos para eliminar os microrganismos. Este procedimento (irradiação - extração) foi sugerido em um estudo preliminar realizado por Ferreira, et al., (1999). Amostras equivalentes a 40g, a base de solo seco, foram retiradas de cada tratamento, em duplicata. Um grupo destas amostras, sem tratamento de irradiação foi colocado em frascos "snap-cap" de 100mL contendo 50mL de solução  $K_2SO_4$   $0,5mol L^{-1}$ . O outro grupo, destinado a irradiação da microbiota, foi colocado em placas de Petri esterilizadas e irradiadas por quatro minutos (2 x 2min). Após, estas amostras foram transferidas para frascos "snap-cap" contendo a mesma solução  $K_2SO_4$   $0,5mol L^{-1}$  anterior. Todas as amostras foram agitadas por trinta minutos em agitador horizontal com 60 oscilações por minuto. Após a decantação, o sobrenadante foi pipetado para outro frasco de erlenmeyer. Da solução pipetada foi retirada uma alíquota de 25mL para a determinação do carbono microbiano e outra de 5mL para a determinação de nitrogênio microbiano.

#### 3.4.2 Carbono e Nitrogênio Microbiano

A determinação do carbono e nitrogênio presente nos extratos de solo foram feitas de acordo com metodologia descrita em Tedesco, et al., (1995).

Para quantificação dos valores de carbono e nitrogênio microbiano foram utilizadas as equações 2 e 3.

$$C_{\text{microbiano}} = \frac{C_i - C_{nl}}{K_c} \quad \text{equação (2)}$$

Onde:

$C_{\text{microbiano}}$  = Teor de carbono da biomassa microbiana do solo ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$C_i$  = Teor de carbono da amostra irradiada ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$C_{ni}$  = Teor de carbono da amostra não irradiada ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$K_c$  = 0,45 fator de correção proposto por Sparling e West (1988).

$$N_{\text{microbiano}} = \frac{N_i - N_{ni}}{K_n} \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

$N_{\text{microbiano}}$  = Teor de nitrogênio da biomassa microbiana do solo ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$N_i$  = Teor de nitrogênio da amostra irradiada ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$N_{ni}$  = Teor de nitrogênio da amostra não irradiada ( $\text{mg kg}^{-1}$ );  $K_n$  = 0,54 fator de correção proposto por BROOKES et al. (1985).

### 3.4.3 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo foi determinada pela quantificação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) liberado no processo de respiração microbiana, durante um período de 50 dias, com a primeira leitura aos 24 dias de incubação e a segunda com 26 dias após a primeira leitura, totalizando 50 dias de avaliação, conforme metodologia proposta por Stotzky (1965). Amostras equivalentes a 100g de solo seco, foram retiradas de cada tratamento e acondicionadas em frascos de vidro com capacidade de 0,8 L hermeticamente fechados. Cada frasco recebeu um copo de polietileno de 50mL contendo 20mL de NaOH  $1 \text{ mol L}^{-1}$  para captar o  $\text{CO}_2$  liberado pela microbiota do solo. O  $\text{CO}_2$  foi determinado aos 24 e 26 dias, adicionando 5mL de uma solução de  $\text{BaCl}_2$  (25%) e 3 gotas de fenolftaleína (1%) em cada copo, titulando-se o excesso de NaOH com uma solução de HCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$  padronizada.

Após cada determinação, as soluções de NaOH foram trocadas por soluções recém-preparada. Como prova em branco, necessárias a esta análise, foram instalados dois frascos contendo apenas a solução de NaOH.

O cálculo do C-CO<sub>2</sub> desprendido do solo foi calculado segundo a equação 4.

$$\text{mg C} - \text{CO}_2 \text{ } 100 \text{ g}^{-1} \text{ solo} = (VPB - VA) \times M \text{ ácido} \times \text{Eq. C} - \text{CO}_2 \times FC \quad \text{equação (4)}$$

Onde:

VPB = volume de HCl gasto na prova em branco (mL);

VA = volume de HCl gasto na titulação do NaOH que recebeu o CO<sub>2</sub> desprendido do solo (mL);

M ácido = concentração de HCl 1 mol L<sup>-1</sup>;

Eq. C-CO<sub>2</sub> = Equivalente grama do C-CO<sub>2</sub> = 6g;

FC = Fator de correção (concentração do ácido/concentração da base) = 1,0.

#### 3.4.4 Quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>)

O quociente metabólico foi calculado pela razão entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana (PIRT, 1975; ANDERSON & DOMSCH, 1978), segundo a equação 5.

Cálculo:

$$(qCO_2) = \frac{\text{mgCO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ de solo}}{\text{mgC}_{\text{micro}} \text{ g}^{-1} \text{ de solo}} \quad \text{equação (5)}$$

#### 3.4.5 Relação CM/COT

A relação CM/COT expressa em porcentagem, foi obtida pela razão entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total do solo, Segundo a equação 6.

Cálculo:

$$C_{\text{micro}}: C_{\text{total}} (\%) = \frac{\text{mgC}_{\text{micro}} \text{ g}^{-1} \text{ de solo}}{\text{mgC}_{\text{total}} \text{ kg}^{-1}} \times 100 \quad \text{equação (6)}$$

### 3.4.6 Relação NM/NT

A relação NM/NT expressa em porcentagem, foi obtida pela razão entre o nitrogênio da biomassa microbiana e o nitrogênio total do solo, Segundo a equação 7.

Cálculo:

$$N_{\text{mic}}:N_{\text{total}} (\%) = \frac{\mu\text{g}N_{\text{mic}}\text{g}^{-1}\text{ de solo}}{\text{mg}N_{\text{total}}\text{kg}^{-1}} \times 100 \quad \text{equação (7)}$$

### 3.4.7 Relação CM/NM

A relação CM/NM foi obtida pela razão entre o carbono da biomassa microbiana e o nitrogênio da biomassa microbiana, Segundo a equação 8.

Cálculo:

$$C_{\text{mic}}:N_{\text{mic}} = \frac{\mu\text{g}C_{\text{mic}}\text{g}^{-1}\text{ de solo}}{\text{mg}N_{\text{mic}}\text{g}^{-1}\text{ de solo}} \quad \text{equação (8)}$$

### 3.4.8 Número de esporos, colonização micorrízica e principais espécies de FMAs

As amostras de solo foram secas à sombra, ao ar livre e à temperatura ambiente. Em seguida as amostras de solo e raízes foram conduzidas ao laboratório de “Micorrizas” - Centro Nacional de Pesquisa em Agrobiologia – CNPAB - Embrapa Agrobiologia, em Seropédica - RJ. As raízes foram lavadas e armazenadas em álcool 50% e o solo foi armazenado em sacos plásticos e conservado em geladeira a 4°C. Para a determinação da colonização micorrízica utilizou-se o método de clareamento de raízes e coloração para visualizar fungos micorrízicos, num microscópio estereoscópico (40x) observou-se 0,5g de segmentos de raízes finas, clarificadas com KOH 25g L<sup>-1</sup> (Koske; Gemma 1989) e as estruturas fúngicas, coloridas com azul de metila 0,05% (Grace; Stribley 1991), e em seguida,

examinados pelo método da lâmina para microscopia, para avaliação de hifas, vesículas e arbúsculos (MCGONIGLE et al, 1990). A percentagem de raízes colonizadas foi obtida através da relação: número de segmentos infectados/total analisado.

A densidade de esporos no solo foi obtida separando-os de  $50\text{dm}^{-3}$  de solo por peneiramento úmido em malhas de 0,710mm e 0,053mm (Gerdemann; Nicolson 1963) e centrifugações a 3.000rpm, em água e em sacarose ( $450\text{g L}^{-1}$ ), por três e dois minutos, respectivamente. Os esporos separados foram, então, contados com o auxílio de microscópio estereoscópico (40x).

Após a contagem do número de esporos, procedeu-se com estes mesmos esporos o processo de identificação morfológica das principais espécies e gêneros de FMAs predominantes na área de estudo, que constou somente de uma etapa, caracterizada como Identificação Direta (ID). No entanto em virtude do pouco tempo disponível para a realização das análises de micorrizas não houve possibilidade da concretização da Identificação Indireta (II) caracterizada pelo cultivo armadilha e isolamento de espécies para posterior identificação.

Para a identificação direta foi utilizada 50g de solo de cada tratamento dentro de cada parcela, sendo cada parcela considerada uma unidade experimental. Os esporos extraídos para identificação direta foram preparados em 02 lâminas da seguinte forma:

- a) Esporos rompidos por pressão, montados em álcool polivinil-lacto-glicerol (PVLG) para observar as paredes;
- b) Esporos inteiros, montados em PVLG, com reativo de Melzer (1:1, v/v).

Este reativo permite observar a reação dos esporos ao iodo, critério que serve, para sua correta classificação.

As lâminas foram montadas com, no máximo, 60 esporos em cada lâmina. As preparações contendo os esporos foram observadas em microscópio óptico e identificadas por espécies, de acordo com o manual de Schenck; Perez (1988) e as novas descrições encontradas no home page <<http://www.invam.caf.wvu.edu>> e no site <[HTTP://www.agro.ar.szczecin.pl/~jblaszkowski/](http://www.agro.ar.szczecin.pl/~jblaszkowski/)> acesso em 2010. A classificação e a identificação dos FMAs basearam-se nas características morfológicas dos esporos. Em nível de espécie, além de observar características externas (utilizadas para identificação de gêneros), como forma, diâmetro e cor do

esporo, comprimento da hifa de sustentação e ornamentação externa da parede, observaram-se, também, características internas, como conteúdo e paredes dos esporos.

#### **3.4.9 Análises estatísticas**

Os resultados dos tratamentos com cultivos foram submetidos à análise de variância e ao teste de Tukey, a 5% de significância. A comparação de cada tratamento com a testemunha (solo construído descoberto - T15) foi feita utilizando o teste de Dunnett ao nível de 5% de probabilidade.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Atributos químicos do solo**

#### **4.1.1 pH , condutividade elétrica e teores de Ca , Mg, K e P**

Os valores de pH embora tenham variado de 6,3 a 7,0 não diferiram entre os tratamentos com cultivos. As comparações entre o tratamento sem plantas (T15) com os demais tratamentos, também não foram significativas (tab. 2). Todos os valores de pH podem ser interpretados como altos (>6,0), segundo a comissão de química e fertilidade do solo (CQFS-RS/SC, 2004).

Os elevados valores de pH dos tratamentos com cultivo (T1 a T14) podem ser justificados, pelo pouco tempo de estabelecimento das plantas de cobertura (dois anos) e, principalmente, pela alta dose de calcário aplicada, que resultou numa supercalagem da área experimental, devido o calcário ter sido incorporado em apenas 0-10cm, ao invés de 0-20cm, visto que o solo construído apresentava apenas uma camada arável variando de 10 a 15cm. O tratamento T15 (solo construído sem plantas) situado ao lado da área experimental também recebeu calagem, o que é uma prática adotada pela CRM por ocasião do processo de construção do solo, justificando assim o seu alto valor de pH.

A elevação do pH do solo para valores superiores a 6,0 pode provocar prejuízos, como a precipitação de diversos nutrientes do solo, como P, Zn, Fe, Cu, Mn, mineralização da matéria orgânica, etc., podendo ocorrer desequilíbrios nutricionais e desenvolvimento de patógenos prejudiciais as plantas (SOUSA et al., 2007; BISSANI et al., 2008).

A calagem apresenta um efeito residual igual ou superior a 5 anos, sendo que, após quatro anos o pH passa a diminuir devido à lixiviação natural dos cátions e as reações acidificantes do solo (BISSANI et al., 2008). Os resultados de pH do solo observados se aproximam estatisticamente dos observados por Santos (2006), em um solo construído após a mineração de carvão mineral em Candiota no RS. No entanto em um trabalho realizado por Campos et al. (2003) no município de Lauro Müller - SC com três solos construídos em área de mineração de carvão, dois em 1996 e um em 1983, os valores de pH encontrados foram na média de 3,5 e 4,5 para as camadas de 0-10cm. Segundo os autores, esses baixos valores de pH, após

a incorporação do calcário na camada arável do solo são resultantes do intenso processo de acidificação da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), decorrente da grande exposição de resíduos de carvão piritoso por longo tempo.

**Tabela 2.** Valores de pH em água, condutividade elétrica (CE) e teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), e fósforo (P) em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.

| Tratamento       | pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub> | CE                  | Ca   | Mg           | K            | P                   |
|------------------|------------------------------|---------------------|--|--------------|--------------|---------------------|
|                  |                              | mS cm <sup>-1</sup> | -----cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> ----- |              |              | mg kg <sup>-1</sup> |
| T1               | 7,0 a                        | 0,15 a              | 6,53 a*  | 4,22 a*      | 0,67 a*      | 56 a                |
| T2               | 6,3 a                        | 0,12 a              | 5,73 a*  | 3,61 a       | 0,72 a*      | 57 a                |
| T3               | 6,6 a                        | 0,19 a*             | 6,83 a*  | 4,26 a*      | 0,96 a*      | 94 a*               |
| T4               | 6,6 a                        | 0,13 a              | 6,76 a*  | 4,15 a*      | 0,73 a*      | 77 a                |
| T5               | 6,8 a                        | 0,13 a              | 6,43 a*  | 4,00 a       | 0,72 a*      | 56 a                |
| T6               | 6,8 a                        | 0,12 a              | 5,89 a*  | 3,88 a       | 0,71 a*      | 60 a                |
| T7               | 6,7 a                        | 0,13 a              | 5,64 a*  | 3,70 a       | 0,86 a*      | 66 a                |
| T8               | 6,8 a                        | 0,13 a              | 5,73 a*  | 4,00 a       | 0,74 a*      | 45 a                |
| T9               | 6,4 a                        | 0,17 a              | 6,28 a*  | 3,79 a       | 0,91 a*      | 100 a*              |
| T10              | 6,4 a                        | 0,17 a              | 5,64 a*  | 3,75 a       | 0,84 a*      | 88 a                |
| T11              | 6,4 a                        | 0,18 a              | 5,87 a*  | 4,00 a       | 0,75 a*      | 72 a                |
| T12              | 6,4 a                        | 0,16 a              | 6,30 a*  | 3,76 a       | 0,82 a*      | 102 a*              |
| T13              | 6,5 a                        | 0,15 a              | 6,28 a*  | 3,95 a       | 0,87 a*      | 88 a                |
| T14              | 6,5 a                        | 0,19 a*             | 5,25 a*  | 3,90 a       | 0,77 a*      | 57 a                |
| T15              | 6,80                         | 0,08                | 3,93   | 3,19         | 0,29         | 42                  |
| <b>***CV (%)</b> | <b>8,00</b>                  | <b>71,60</b>        | <b>13,60</b>                                   | <b>14,80</b> | <b>18,00</b> | <b>32,80</b>        |
| <b>***Média</b>  | <b>6,6</b>                   | <b>0,16</b>         | <b>6,08</b>                                    | <b>4,0</b>   | <b>0,80</b>  | <b>72,9</b>         |

T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey entre os tratamentos a 5%. \* significativo a 5% de probabilidade respectivamente usando o teste de Dunnett com T15 comparado aos demais tratamentos estudados. \*\*\*CV – coeficiente de variação e média não inclui os valores do T15.

A condutividade elétrica do solo (CE), não diferiu estatisticamente entre os tratamentos estudados, apesar da variação observada nos valores deste atributo (tab. 2), o que pode ser explicado pelo elevado coeficiente de variação obtido. Observou-se um valor mínimo de 0,12mS cm<sup>-1</sup> no tratamento T2, mantido sob a cobertura de Braquiária brizantha e um máximo de 0,19mS cm<sup>-1</sup> no tratamento T3 e T14 cultivados com Tanzânia e Braquiária humidícola +Tifton. Comparando o solo

construído sem cultivos (T15), com os demais cultivos, apenas os tratamentos T3 e T14, cultivados com Tanzânia e Braquiária humidicola+Tifton, foram diferentes estatisticamente. Todos os tratamentos apresentaram valores de CE abaixo de  $2\text{mS cm}^{-1}$ , valor máximo proposto por DAKER (1970) para solos sem problemas de salinidade.

Os teores de cálcio também não diferiram estatisticamente entre os tratamentos (T1 a T14), apesar da faixa de valores  $5,25$  a  $6,83\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ . Estes valores são considerados altos ( $>4\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) pela comissão de química e fertilidade do solo (CQFS-RS/SC, 2004) e indicam que na área experimental, provavelmente ainda existam carbonatos advindos da correção da acidez do solo pela calagem, que estão em processo de dissolução, liberando importantes quantidades de Ca, conforme verificado por HAERING et al. (1993).

Nesse mesmo solo construído, submetido a outros cultivos, Santos (2006) obteve uma faixa de teores de Ca de  $9,2$  a  $14,6\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , considerada bem acima da classe alto pela CQFS-RS/SC, (2004), os quais também foram atribuídos à supercalagem da área na qual não foi possível incorporar o calcário na profundidade de  $0$ - $20\text{cm}$ , ficando restrito a camada de  $0$ - $10\text{cm}$  de profundidade. Altos valores de cálcio ( $7,9$  e  $7,0\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) também foram obtidos, respectivamente por Camillo et al. (2004) e Inda et al. (2010), em um solo construído após a mineração de carvão mineral na mina de Boa Vista, no município de Minas do Leão, no estado do Rio Grande do Sul.

Ao comparar o tratamento testemunha T15 (solo descoberto sem cultivo) com os demais tratamentos, observaram-se diferenças estatísticas, com o maior valor de cálcio ( $6,83\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) no tratamento T3 (Tanzânia), o que pode ser resultante das altas quantidades de palhada aportada nos respectivos cultivos, que evitam a mobilização e/ou carreamento de partículas de solo pela água das chuvas, evitando assim que altas quantidades de sais de cálcio, como também de outros nutrientes sejam perdidas para áreas circunvizinhas ou para os mananciais hídricos. Este processo não ocorreria no T15, pelo baixo incremento de cobertura do solo, que o mesmo proporciona.

Foi obtida uma faixa de valores de magnésio que variou de  $3,61$  a  $4,26\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , mas foram considerados estatisticamente iguais entre os tratamentos (T1 a T14). Estes valores são considerados altos ( $>1,0\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) pela CQFS-RS/SC, (2004). Assim como já foi discutido para o cálcio, os altos teores de magnésio

observados na área experimental indicam que, provavelmente, existem carbonatos advindos da correção da acidez do solo pela calagem, que ainda estão em processo de dissolução, liberando importantes quantidades de Mg, o que também foi observado por Camilo et al. (2004). Também esses altos teores podem ser resultantes do efeito residual da adição de calcário para correção da acidez do solo, associado ao processo de *supercalagem* pela incorporação do calcário mais superficialmente. Resultados semelhantes foram observados por Santos (2006) estudando o mesmo solo construído após a mineração de carvão mineral no estado do Rio Grande do Sul e submetido a diferentes cultivos, que obteve uma faixa de teores de Mg que variou de 3,3 a 4,1  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , valores também superiores ao considerado alto (CQFS-RS/SC, 2004).

Nas comparações feitas para a variável magnésio entre a testemunha T15 (solo construído descoberto) com os demais tratamentos avaliados, foram observadas diferenças significativas apenas entre esse e os tratamentos T1, T3 e T4. Isso sugere que esses tratamentos cultivados com capim vaquero, Tanzânia e Braquiária humidicola, mantém um sistema de cultivo que preserva uma boa quantidade de massa vegetal sobre a superfície do solo, protegendo o solo e assim evitando perdas de grandes quantidades de Mg, ocasionados por processos erosivos que ocorrem em decorrência das chuvas.

Os valores de K do solo construído e submetido aos cultivos variaram de 0,67 a 0,96  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , mas não diferiram entre si, situando-se na faixa de valores de K considerados muito alto ( $>0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), mesmo para solos de alta CTC (CQFS-RS/SC, 2004) Tais valores foram 131 e 231% maiores que a testemunha T15 (solo construído sem plantas) (tab. 2).

Esses altíssimos teores de potássio são resultantes das sucessivas adubações com NPK efetuadas na área experimental e, principalmente da adubação realizada seis dias anteriores à amostragem de solo. Além disso, pode ter contribuído também para elevação dos teores de K, o aporte periódico de matéria seca, feito através dos cortes e deposição nas parcelas das plantas de cobertura.

Avaliando solos construídos com diferentes tempos de construção, Camillo et al. (2004) encontraram resultados de K próximos aos valores obtidos neste estudo em um solo construído também com dois anos sob vegetação com gramíneas rasteiras. Santos et al. (2004) encontrou valores de 28; 90 e 140  $\text{mg dm}^{-3}$  de potássio respectivamente, para área de mineração recém construída (apenas com cobertura

de terra vegetal), solo construído com um ano e solo construído com seis anos que receberam calagem e adubação com NPK, antes do estabelecimento da cobertura vegetal, evidenciando as influências da adubação e do tempo de cultivo nos teores de nutrientes.

Comparando a testemunha T15 (solo construído descoberto) com os demais tratamentos avaliados, foram observadas diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância usando o teste de Dunnett. Esses resultados significativos demonstram que, tanto a adubação das culturas como a manutenção da vegetação sobre o solo contribuíram para a adição de K. Além disso, uma boa quantidade de biomassa vegetal sobre a superfície do solo protege-o e assim evita perdas de K, por lixiviação ou processos erosivos que ocorreriam, caso o solo se mantivesse sem cobertura vegetal, condição em que é mantido o solo na testemunha T15.

Todos os teores de P obtidos nos tratamentos com cultivo de plantas, assim como também na testemunha T15, foram muito alto ( $>18\text{mg dm}^{-3}$ ) (CQFS-RS/SC, 2004), considerando-se que o solo construído possui um teor de argila correspondente a classe 2, (MIOLA, 2010). Os altos teores de fósforo em todos os tratamentos podem ser atribuídos às adubações com NPK realizadas na área. Apesar da amplitude nos valores encontrados, maiores no T9 e T12 cultivados com Braquiária brizantha+Tifton e Tanzânia+Tifton, com  $100$  e  $102\text{mg kg}^{-1}$  de P disponível, e menor no T8 (Vaquero+Hemátria), com  $45\text{mg kg}^{-1}$  de P, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos estudados, (tab. 2). Os distintos valores podem ser resultantes das diferentes capacidades de extração das plantas utilizadas na área, ou ainda do elevado coeficiente de variação obtido para esse atributo, provavelmente em razão da recente adubação efetuada na área experimental, antecedendo o período de amostragem, o que pode ter aumentado muito a variabilidade obtida entre blocos (APÊNDICE 1A).

Nas comparações usando a testemunha T15 contra os demais tratamentos, foram observadas diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância, ao comparar o teor de fósforo do T15 com o do T3, T9 e T12 mantidos com Tanzânia, Braquiária brizantha+Tifton e Tanzânia+Tifton. Os valores destes tratamentos foram respectivamente 123%, 138% e 142% superiores à testemunha T15. Esses resultados evidenciam que dentre as espécies estudadas, os tratamentos T3, T9 e T12 mantidos sob um manejo adequado do solo, adubação química e abundante

cobertura vegetal, conseguiram melhorar o nível de disponibilidade de fósforo no solo, quando comparados com a testemunha T15.

#### 4.1.2 Teores de manganês, zinco, cobre e sódio

Os teores de Mn ficaram na faixa de  $6,0\text{mg kg}^{-1}$  a  $33,7\text{mg kg}^{-1}$  e não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos (T1 a T14). Os valores observados foram superiores aos considerados como “alto” ( $>5,0\text{mg kg}^{-1}$ ) pela CQFS-RS/SC, (2004) Os teores de manganês, apresentaram uma correlação inversa com o pH do solo ( $r=0,70$ ) (Fig. 8 APÊNDICE 6F), indicando que com a elevação do pH, houve uma diminuição no teor de Mn. Este comportamento é esperado em razão do aumento da adsorção química de manganês à superfície dos minerais silicatados com a elevação do pH (complexo de superfície de esfera interna). Além das reações de adsorção, o Mn ainda pode reagir no solo formando óxidos de manganês ( $\text{MnO}_2$ ) bastante insolúveis (BISSANI, et al., 2008). Os maiores teores de manganês foram observados nos tratamentos T13, T10, T2, T11, T12, cultivados com Braquiária humidícula+Hemártria, Braquiária brizantha+Hemártria, Braquiária brizantha, Tanzânia+Hemártria e Tanzânia+Tifton, com valores médios de  $33,7$ ;  $26,1$ ;  $20,7$ ;  $19,6$  e  $19,0\text{mg kg}^{-1}$ . Estes resultados estão de acordo com o relatado por Abreu et al. (2007); Dechen e Nachtigall (2007), onde afirmam que a maior disponibilidade de manganês ocorre na faixa de pH, ao redor de 5,0 a 6,5.

O teor médio obtido para zinco foi de  $1,56\text{mg kg}^{-1}$ , sendo que entre os tratamentos também não se constataram diferenças significativas. Todos os valores observados estão acima do considerado alto ( $>0,5\text{mg kg}^{-1}$ ) (CQFS-RS/SC, 2004). Conforme os resultados, pôde-se observar o efeito da calagem para correção da acidez do solo feita anterior ao plantio das culturas de cobertura, no aumento do pH do solo, e conseqüentemente sua influência sobre a disponibilidade de zinco, onde observa-se (tab. 3), que quanto maior o pH menor é a disponibilidade de zinco, apresentando um coeficiente de correlação igual a ( $r=0,50$ ) (Fig. 9 APÊNDICE 7G). Tal comportamento é esperado em razão do aumento da adsorção química de zinco à superfície dos minerais silicatados com a elevação do pH (complexo de superfície de esfera interna) (MEURER, et al., 2006). Esses resultados concordam com Abreu

et al. (2007); Dechen e Nachtigall (2007), que atribuíram a maior disponibilidade de zinco na faixa de pH 5,0 a 6,5.

Numa avaliação sobre o efeito da calagem na disponibilidade de zinco derivado de duas fontes ( $ZnSO_4$  e resíduo de siderurgia), em dois valores de pH (5,0 e 6,0), Santos et al. (2002), observaram que houve uma diminuição da disponibilidade de Zn com o aumento de pH, independentemente da fonte utilizada. O efeito da calagem sobre a disponibilidade de Zn, também foi estudado por Accioly et al. (2004), onde eles observaram que a adição de doses de calcário (10 a 20t ha<sup>-1</sup>), elevou o pH do solo próximo a neutralidade, reduzindo o teor de zinco disponível no solo pela solução de Mehlich-1.

**Tabela 3.** Teores de manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), e de sódio trocável (Na), em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.

| Tratamento    | Mn                  | Zn           | Cu           | Na           |
|---------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
|               | mg kg <sup>-1</sup> |              |              |              |
| T1            | 6,0 a               | 1,5 a        | 0,68 a       | 17,0 ab*     |
| T2            | 20,7 a              | 2,15 a       | 0,74 a       | 10,3 b       |
| T3            | 10,9 a              | 1,34 a       | 0,58 a       | 14,0 ab      |
| T4            | 18,0 a              | 1,50 a       | 0,71 a       | 16,2 ab*     |
| T5            | 12,0 a              | 1,39 a       | 0,76 a       | 13,5 ab      |
| T6            | 10,3 a              | 1,17 a       | 0,61 a       | 11,8 ab      |
| T7            | 10,9 a              | 1,2 a        | 0,74 a       | 14,7 ab      |
| T8            | 7,61 a              | 1,7 a        | 0,69 a       | 12,3 ab      |
| T9            | 19,6 a              | 1,6 a        | 0,74 a       | 14,2 ab      |
| T10           | 26,1 a              | 2,0 a        | 0,71 a       | 13,0 ab      |
| T11           | 19,6 a              | 1,94 a       | 0,66 a       | 12,5 ab      |
| T12           | 19,0 a              | 2,0 a        | 0,53 a       | 16,0 ab*     |
| T13           | 23,0 a              | 1,4 a        | 0,66 a       | 19,1 a*      |
| T14           | 10,9 a              | 1,4 a        | 0,56 a       | 13,0 ab      |
| T15           | 13,0                | 0,52         | 0,61         | 9,2          |
| <b>CV (%)</b> | <b>67,72</b>        | <b>48,00</b> | <b>16,00</b> | <b>24,68</b> |
| Média         | 16,09               | 1,56         | 0,68         | 14,11        |

T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey entre os tratamentos a 5%. \* significativo a 5% de probabilidade respectivamente usando o teste de Dunnett com T15 comparado aos demais tratamentos estudados. \*\*\*CV – coeficiente de variação, e média não inclui os valores do T15.

Os teores de cobre também não diferiram estatisticamente entre os tratamentos avaliados (tab. 3). Os valores médios obtidos ( $0,68\text{mg kg}^{-1}$ ) estão acima do considerado *alto* ( $>0,4\text{mg kg}^{-1}$ ) (CQFS-RS/SC, 2004).

Ao confrontar o T15 com cada um dos demais tratamentos não foram observadas diferenças significativas nos teores de Mn, Zn e Cu (tab. 3) evidenciando que o cultivo das diferentes gramíneas não melhoram esses atributos do solo ..

Os valores obtidos para sódio trocável, variaram de 10,3 a  $19,1\text{mg kg}^{-1}$  correspondendo aos tratamentos T2 e T13, respectivamente (tab. 3) e apresentaram diferenças estatísticas entre os cultivos. Esses teores podem estar relacionados às adubações feitas periodicamente, com fertilizantes que contém sódio, como os produzidos a partir do mineral silvinita, tendo em sua composição misturas de KCl e NaCl (ROBERTS, 2004).

Valores de sódio semelhantes aos encontrados neste trabalho foram encontrados por Santos (2006) em um solo construído na mina de Candiota, com 12,7 meses e 1,5 anos de cultivo de plantas de coberturas, com 12,25 e  $12,82\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente.

Ao comparar o T15 com os demais tratamentos (tab. 3) foram observados teores médios significativos nos tratamentos T13, T1, T4 e T12, respectivamente.

#### **4.1.3 Carbono orgânico total (COT)**

Os valores de carbono orgânico total (COT) observados no solo sob os diferentes cultivos (tab. 4) não diferiram entre si. Houve uma pequena variação de 9,5 a  $11,3\text{g kg}^{-1}$  de COT respectivamente nos tratamentos T8 e T9 (Vaquero+Hemária e Braquiária brizantha+Tifton), embora entre os tratamentos não tenha havido diferenças estatísticas. Essa faixa de valores de COT corresponde a 1,6 e 1,9% de matéria orgânica, que é considerada baixa ( $\leq 2,5\%$ ) pela comissão de química e fertilidade do solo (CQFS-RS/SC, 2004). Esses baixos valores se justificam pelo pouco tempo de cultivo da área e indicam a necessidade de uma maior incorporação de massa vegetal e, conseqüente, mais aporte de carbono ao longo do tempo nos solos construídos, para alcançar-se níveis adequados de matéria orgânica, um importante indicador da qualidade dos solos.

**Tabela 4.** Teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (Nt), carbono microbiano ( $C_{mic}$ ) e nitrogênio microbiano ( $N_{mic}$ ), em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.

| Tratamento    | COT                           | Nt          | Cmic      | Nmic                           |
|---------------|-------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|
|               | -----g Kg <sup>-1</sup> ----- |             |           | -----mg Kg <sup>-1</sup> ----- |
| T1            | 9,5 a*                        | 0,92 a      | 369       | bcd*                           |
| T2            | 10,9 a*                       | 0,96 a      | 257       | d                              |
| T3            | 10,6 a*                       | 1,0 a       | 413       | abcd*                          |
| T4            | 10,5 a*                       | 0,92 a      | 305,5     | cd                             |
| T5            | 10,5 a*                       | 1,01 a      | 526,6     | ab*                            |
| T6            | 9,7 a*                        | 0,9 a       | 441       | abc*                           |
| T7            | 9,9 a*                        | 0,93 a      | 454       | abc*                           |
| T8            | 9,5 a*                        | 0,94 a      | 326       | cd*                            |
| T9            | 11,3 a*                       | 1,06 a      | 340,5     | cd*                            |
| T10           | 10,9 a*                       | 1,04 a      | 445       | abc*                           |
| T11           | 11,1 a*                       | 1,0 a       | 300       | cd                             |
| T12           | 10,7 a*                       | 1,0 a       | 308       | cd                             |
| T13           | 10,8 a*                       | 1,13 a      | 570       | a*                             |
| T14           | 9,6 a*                        | 0,95 a      | 369       | bcd*                           |
| T15           | 6,1                           | 1,01        | 178       | 63                             |
| <b>CV (%)</b> | <b>14,5</b>                   | <b>9,62</b> | <b>18</b> | <b>48,6</b>                    |
| Média         | 10,4                          | 0,98        | 387       | 57,4                           |

T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemátria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemátria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemátria, T11– Tanzânia+Hemátria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemátria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey entre os tratamentos a 5%. \* significativo a 5% de probabilidade respectivamente usando o teste de Dunnett com T15 comparado aos demais tratamentos estudados. \*\*\*CV – coeficiente de variação, e média não inclui os valores do T15.

Estudando as alterações químicas e microbiológicas de um solo construído e submetido a diferentes cultivos na mina de Candiota, RS, Santos (2006) encontrou valores médios na mesma profundidade estudada neste trabalho de 7,37, 7,79 e 7,52g kg<sup>-1</sup> de carbono orgânico aos 6,6 e 12,7 meses e 1,5 anos de cultivos com diferentes plantas de cobertura. Os valores inferiores ao obtido neste estudo podem ser atribuídos ao pouco tempo que as plantas de cobertura tiveram para incorporar e constituir a matéria orgânica do solo. Um aspecto importante a ser salientado refere-se também a pouca espessura de solo superficial constituído de misturas de

horizontes com predominância de horizonte B, que é retornado sobre o substrato (0-0,10 a 0-0,15m aproximadamente).

Ren-Sheng et al. (1998) estudando a produção de fitomassa, influenciado pela calagem e espessura do solo aplicado sobre substratos remanescentes de mineração de carvão, observaram haver um aumento linear de produção de massa seca de plantas com o aumento da espessura da camada aplicada, que variou de 0-150cm.

Durante o processo de lavra e empilhamento da camada fértil do solo, a mesma sofre oxidação da MOS e, conseqüente perda de carbono e nutrientes. Durante a construção destas áreas, o solo fértil é removido e misturado com o horizonte B e C, causando diluição na matéria orgânica remanescente, o que pode levar à perda da funcionalidade e degradação do solo, e/ou da capacidade regenerativa em casos extremos de degradação (SIQUEIRA et al., 2008). Além disso, durante o processo de construção do solo, a mistura de horizontes, com posterior compactação do solo, causa a desorganização de todo o sistema envolvido, e assim provocando a perda de carbono e nutrientes. No entanto este mesmo autor afirma que a recuperação de teores de carbono é lenta e progressiva se medidas de controle, como correção da fertilidade do solo, manutenção de plantas na superfície do solo, evitando os processos erosivos, etc., forem tomadas e conduzidas corretamente.

Ao comparar cada tratamento com a testemunha T15 (tab. 4), foram encontradas diferenças significativas para todos os tratamentos, o que evidencia ter havido uma recuperação parcial do solo em relação a esse atributo pela capacidade das plantas cultivadas incorporarem carbono orgânico ao longo do tempo de cultivo em maior quantidade em relação ao T15, que mantém a superfície do solo praticamente ausente de vegetação. Adicionalmente o sistema radicular das plantas e seus exsudatos podem proporcionar maior agregação do solo o que ajuda na proteção e estabilização da MOS.

#### **4.1.4 Nitrogênio total**

Quanto aos teores de N-total não se verificou diferenças significativas entre os tratamentos estudados (tab. 4). Mesmo com a adição periódica de fontes nitrogenadas como uréia e/ou sulfato de amônio, via adubação mineral, os valores de N nos solos vegetados situaram-se abaixo do valor médio apresentado no solo natural (tab. 1). O valor médio obtido nos tratamentos equivaleu a 51% do teor de nitrogênio total do solo nas condições naturais (tab. 1). Santos (2006) avaliando as alterações ocorridas nessa mesma área de estudo, obteve aos 6,6 e 12,7 meses e 1,5 anos de cultivo uma média equivalente a 13, 29 e 32% do teor de nitrogênio total nas condições naturais, anterior a extração de carvão mineral (tab. 1). Isso demonstra a possibilidade de aumento de nitrogênio total com a intensificação dos cultivos na área em processo de recuperação.

Na comparação de cada tratamento com a testemunha T15 não houve diferenças significativas. A ausência de diferença pode ser atribuída ao pouco tempo de estabelecimento das culturas estudadas e também pela absorção do N do solo pela massa vegetal em estudo.

## **4.2 Atributos microbiológicos**

### **4.2.1 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana**

Os teores de carbono da biomassa microbiana apresentaram uma faixa de valores de 257 a 570mg kg<sup>-1</sup>(tab. 4) nos tratamentos T2 (Braquiária brizantha) e T13 (Braquiária humidicola+Hemártria), apresentando diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Os maiores teores de carbono da biomassa, 570 e 525,6mg kg<sup>-1</sup>, foram observados nos tratamentos T13 mantidos sob o cultivo consorciado de Braquiária humidícola+Hemártria e no T5 cultivado somente com Hemártria. Em face disto, houve uma maior acumulação de carbono pela biomassa microbiana e uma melhoria nas condições de desenvolvimento da microbiota. Nestas condições, há um fornecimento constante de material orgânico mais susceptível a decomposição, permanecendo o solo coberto, com menor variação e níveis mais adequados de temperatura e umidade. Esses valores poderão ser promissores ao longo do tempo de cultivo. Holanda Neto et al. (2010) encontrou

valores de Cmic bastantes promissores nos cultivos com Hermátria e pensacola, em um solo construído com seis anos de implantação na mina de Candiota, RS. Segundo Vasconcellos et al. (1999), a biomassa microbiana promove uma imobilização do carbono quando resíduos vegetais ficam em superfície.

Mendoza et al. (2002), em um experimento conduzido em solo construído após mineração de carvão a céu aberto, no município de Lauro Müller (SC), encontraram teor de  $159,5\text{mg Kg}^{-1}$  de carbono da biomassa microbiana, valor inferior aos observados neste trabalho.

Os valores de Cmic apresentaram baixa correlação com os valores de carbono orgânico. A recuperação do carbono orgânico do solo é lenta e progressiva, enquanto o Cmic é mais rápida que o COT acumulado no solo. A revegetação fornece carbono ao solo e sustenta a proliferação microbiana, refletindo em aumento rápido do Cmic, mas como a maior parte do C adicionado é consumida na oxidação, o acúmulo do C no solo é muito lento. A relação Cmic/COT, que indica a dinâmica e taxa das transformações do material orgânico pela microbiota, decresce com a reabilitação, tendendo a certo equilíbrio na medida em que essa recuperação se avança (SIQUEIRA et al., 2008).

Ao comparar os resultados obtidos nos tratamentos com o da testemunha T15, foram observadas diferenças estatísticas para o carbono microbiano nos tratamentos T1, T3, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T13 e T14 respectivamente, sendo que todos os valores obtidos nos tratamentos foram superiores ao obtido no T15. Isso indica que nos cultivos utilizados há um maior fornecimento de carbono ao solo que sustenta a proliferação microbiana, refletindo em aumento rápido do Cmic, o que não acontece no T15, por manter a superfície do solo descoberta. O não revolvimento e a manutenção da superfície do solo coberta por uma vegetação densa contribuiu para que estes tratamentos apresentassem os maiores valores de Cmic em relação ao solo mantido na testemunha T15. Além disso, os próprios sistemas radiculares das plantas utilizadas na área contribuíram para o efeito rizosférico, proporcionando uma maior disponibilidade de substrato orgânico para a microbiota do solo. As gramíneas apresentam um efeito rizosférico intenso em virtude do seu abundante sistema radicular, o qual geralmente apresenta elevada taxa de reciclagem (SANTOS, 2004). Assim, o maior valor de Cmic encontrado no T13, indica que o mesmo está em processo de recuperação.

Os teores de nitrogênio da biomassa microbiana tiveram uma faixa de valores de 41 a 92,4 mg kg<sup>-1</sup> nos tratamentos T9 e T2, respectivamente, e também não diferiram estatisticamente entre os tratamentos (tab. 4). Santos (2006) encontrou valores de Nmic que variaram de 4,86 e 7,37mg kg<sup>-1</sup> entre os tratamentos aos 6,6 e 12,7 meses e 1,5 anos de cultivo em uma mesma profundidade e área que é mantido este estudo e que também não houve variação significativa entre os tratamentos, teores menores que os obtidos neste trabalho. A ausência de diferença pode ser atribuída ao pouco tempo de estabelecimento das culturas estudadas e também ao aproveitamento do N do solo pela massa vegetal em estudo.

Conforme os resultados obtidos (tab. 4), não houve diferenças estatísticas, comparando os tratamentos com o solo descoberto sem cultivos T15, indicando uma possível influência das culturas de coberturas em incorporar N na biomassa microbiana presente no solo.

#### **4.2.2 Respiração Basal e quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>)**

Não houve diferença estatística entre os tratamentos, quanto à liberação de C-CO<sub>2</sub>(tab. 5). Holanda Neto et al. (2010), encontrou valores semelhantes nesta mesma área, em um solo construído e com seis anos de cultivos.

Comparando-se os tratamentos com a testemunha T15, foram observadas diferenças significativas para todos os tratamentos utilizando o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância. Os valores de liberação de C-CO<sub>2</sub>, foram superiores em todos os cultivos em relação à testemunha, o que pode ser atribuído ao baixo nível de cobertura vegetal do solo construído T15. Resultados semelhantes foram encontrados por Holanda Neto et al. (2010), em um solo construído com seis anos de implantação das culturas de cobertura.

Não houve diferenças significativas entre os tratamentos para os valores de quociente metabólico qCO<sub>2</sub> (tab. 5).

O menor quociente metabólico 0,25qCO<sub>2</sub>x10<sup>-3</sup> encontrado na testemunha T15 (tab. 5) pode ser atribuído a ausência de vegetação na superfície do solo, que conseqüentemente mantém ausência de atividade microbiana dependente de biomassa vegetal.

Carneiro et al. (2008) avaliando a atividade microbiana de um solo construído após a mineração de bauxita em Minas Gerais, observou que em áreas reabilitadas, o  $qCO_2$  diminuiu para  $4\mu g C-CO_2/mg C-BM$ , chegando a valores próximo ao obtido na área referência, indicando, portanto, que a revegetação melhora as condições fisiológicas do solo para os microrganismos heterotróficos.

**Tabela 5.** Teores de respiração basal (RB), e quociente metabólico ( $qCO_2$ ) em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.

| Tratamento        | RB                  | $qCO_2$                |
|-------------------|---------------------|------------------------|
|                   | $\mu g C-CO_2 /h/g$ | $qCO_2 \times 10^{-3}$ |
| T1                | 0,81 a*             | 2,20 a*                |
| T2                | 0,66 a*             | 2,63 a*                |
| T3                | 0,60 a*             | 1,55 a                 |
| T4                | 0,71 a*             | 2,29 a*                |
| T5                | 0,71 a*             | 1,38 a                 |
| T6                | 0,62 a*             | 1,56 a                 |
| T7                | 0,51 a              | 1,14 a                 |
| T8                | 0,60 a*             | 1,89 a*                |
| T9                | 0,73 a*             | 2,15 a*                |
| T10               | 0,96 a*             | 2,26 a*                |
| T11               | 0,59 a*             | 2,01 a*                |
| T12               | 0,73 a*             | 2,49 a*                |
| T13               | 0,90 a*             | 1,64 a                 |
| T14               | 0,67 a*             | 1,88 a*                |
| T15               | 0,04                | 0,25                   |
| <b>*** CV (%)</b> | <b>38,00</b>        | <b>40,00</b>           |
| <b>*** Média</b>  | <b>0,70</b>         | <b>1,94</b>            |

T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey entre os tratamentos a 5%. \* significativo a 5% de probabilidade respectivamente usando o teste de Dunnett com T15 comparado aos demais tratamentos estudados. \*\*\*CV – coeficiente de variação, e média não inclui os valores do T15.

Área com um baixo quociente metabólico indica economia na utilização de energia e, supostamente, reflete um ambiente mais estável ou mais próximo do seu estado de equilíbrio. Valores elevados são indicativos de ecossistemas submetidos a alguma condição de estresse ou de distúrbio como, por exemplo, a incorporação de resíduos ao solo (SANTOS, 2006).

Santos (2006) avaliando as alterações microbiana nesta mesma área encontrou valores médios igual a 2,84, 1,39 e 7,19 $qCO_2 \times 10^{-3}$ , respectivamente aos 6,6 e 12,7 meses e 1,5 anos de cultivo, resultados em sua maior parte superiores aos encontrados neste trabalho.

Com relação ao quociente metabólico  $qCO_2$ , na comparação dos tratamentos com a testemunha T15, houve diferenças estatísticas significativas para o T1, T2, T4, T8, T9, T10, T11, T12, e T14, cultivados com as espécies vegetais Capim Vaquero, Braquiária brizantha, Braquiária humidícola, Vaquero+Hemártria, Braquiária brizantha+Tifton, Braquiária brizantha+Hemártria, Tanzânia+Hemártria, Tanzânia+Tifton e Braquiária humidícola+Tifton, respectivamente. Os maiores valores de  $qCO_2$  obtidos nos tratamentos em relação a testemunha T15, pode ser atribuído a presença de um substrato oriundo desses tratamentos facilmente assimilável para o desenvolvimento e atividade microbiana.

### 4.3 Relações químicas e biológicas

A relação COT/Nt não apresentou diferenças estatísticas entre os diferentes tratamentos, apresentaram uma média de 10,48 e uma variação de 9,57 a 11,35. A não observação de diferença significativa na relação COT/Nt deve-se a não observação de variação significativa para COT e Nt, verificados nos tratamentos analisados (tab. 4). Santos (2006) também não encontrou resultados significativos nessa mesma área, obtendo uma variação média de 10,3 a 14,9 em três períodos de avaliação (198, 380 e 562 dias).

Em relação aos valores de  $Cmic/Nmic$  também não se observou diferenças estatísticas entre os cultivos estudados (tab. 6). Isso pode ser atribuído ao elevado coeficiente de variação inerente a este tipo de análise, pois a biomassa microbiana constitui a maior parte da fração ativa da matéria orgânica do solo e seus valores são bastante sensíveis. Mesmo os maiores valores foram encontrados nos tratamentos T12 e T10, respectivamente, indicando um crescimento promissor. Santos (2006) estudando as alterações químicas e biológicas, nesta mesma área encontrou resultados que se mostraram promissores para os tratamentos mantidos com Tifton e Pensacola.

A relação  $C_{mic}/COT$ , expressa em porcentagem, denominada de quociente microbiano, apresentou a menor relação no tratamento T2 (2,43%) e a maior no T13 (5,30%) (tab. 6), respectivamente. Conforme os resultados obtidos houve diferenças estatísticas entre os tratamentos avaliados, com maior destaque para os T13, T5 e T6, cultivados com Braquiária humidícola+Hemártria, Hermártria e Tifton.

**Tabela 6.** Relações  $COT/N_{total}$ ,  $C_{mic}/N_{mic}$ ,  $C_{mic}/COT$  e  $N_{mic}/Nt$  em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm.

| Tratamento        | COT/Nt      | Cmic/Nmic    | -----%----- |             |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                   |             |              | Cmic/COT    | Nmic/Nt     |
| T1                | 10,3 a*     | 10,0 a       | 4 abcd      | 7,78 a      |
| T2                | 10,4 a*     | 3,15 a       | 2,4 d       | 9,54 a*     |
| T3                | 10,5 a*     | 9,7 a        | 4 abcd      | 4,51 a      |
| T4                | 11,4 a*     | 10,0 a       | 3 cd        | 4,61 a      |
| T5                | 10,4 a*     | 9,4 a        | 5 ab*       | 6,00 a      |
| T6                | 10,8 a*     | 6,9 a        | 4,72 abc*   | 7,66 a      |
| T7                | 10,7 a*     | 7,0 a        | 4,64 abc    | 7,85 a*     |
| T8                | 10,0 a*     | 11,2 a       | 3,45 abcd   | 4,58 a      |
| T9                | 10,7 a*     | 9,4 a        | 3,07 bcd    | 3,93 a      |
| T10               | 10,4 a*     | 14,0 a       | 4,12 abcd   | 4,90 a      |
| T11               | 10,8 a*     | 7,8 a        | 2,69 cd     | 4,77 a      |
| T12               | 10,7 a*     | 15,1 a       | 3 bcd       | 6,60 a      |
| T13               | 9,6 a*      | 13,1 a       | 5,30 a*     | 4,44 a      |
| T14               | 10,0 a*     | 13,1 a       | 4 abcd      | 4,90 a      |
| T15               | 6,0         | 2,84         | 2,94        | 6,28        |
| <b>*** CV (%)</b> | <b>8,65</b> | <b>94,00</b> | <b>22,3</b> | <b>48,3</b> |
| <b>*** Média</b>  | <b>10,5</b> | <b>9,77</b>  | <b>3,79</b> | <b>5,86</b> |

T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey entre os tratamentos a 5%. \* significativo a 5% de probabilidade respectivamente usando o teste de Dunnett com T15 comparado aos demais tratamentos estudados. \*\*\*CV – coeficiente de variação, e média não inclui os valores do T15.

Quanto a relação  $N_{mic}/Nt$  (tab. 6), não houve diferença estatística entre os tratamentos, sendo a menor e maior faixa de 3,93 a 9,54%, nos tratamentos T9 (Braquiária brizantha+Tifton) e T2 (Braquiária brizantha) com maior destaque para os tratamentos T2 e T7, cultivados com Braquiária brizantha e Vaquero+Tifton, que se diferiu do da testemunha T15.

As relações  $C_{mic}/COT$  e  $N_{mic}/Nt$ , expressam índices da qualidade da matéria orgânica. Para solos com matéria orgânica de baixa qualidade nutricional, e a biomassa microbiana encontra-se sob algum fator de estresse, a capacidade de uso do carbono e do nitrogênio é diminuída. Nesse caso, as relações  $C_{mic}/COT$  e  $N_{mic}/Nt$  diminuem. O rápido aumento da biomassa microbiana poderá ocorrer, com a adição de matéria orgânica de boa qualidade ou com a modificação do fator limitante para uma condição mais adequada, mesmo que os níveis de  $COT$  permaneçam inalterados (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Conforme verificado através dos resultados obtidos (tab. 6) os valores para as relações  $C_{mic}/COT$  e  $N_{mic}/Nt$ , em sua maioria, foram superiores a testemunha T15, indicando que a matéria orgânica do solo possui boa qualidade nutricional, tornando o carbono disponível e, principalmente, o nitrogênio para a biomassa microbiana.

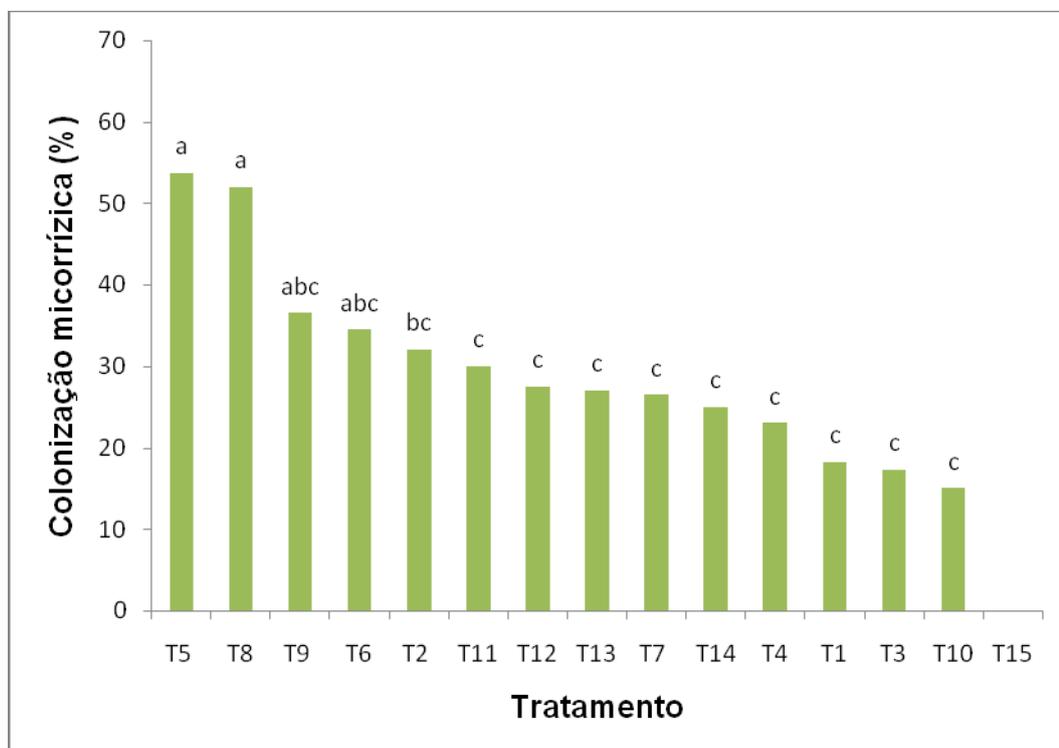
Ao comparar os tratamentos com a testemunha T15, houve diferenças significativas apenas nas relações  $COT/Nt$ ,  $C_{mic}/COT$  (tab. 6), com todos os tratamentos, apresentando valores superiores ao T15 na relação  $COT/Nt$ , e na relação  $C_{mic}/COT$  foi significativo apenas em T5, T6 e T14, porém a maioria foi superior a T15, com exceção dos tratamentos T2 e T14. Na relação  $N_{mic}/Nt$ , foram significativos apenas os tratamentos T2 e T7. Isso indica o grande potencial que as plantas de coberturas cultivadas na área têm em fornecer ao solo matéria orgânica de boa qualidade nutricional, tornando o carbono disponível e, principalmente, o nitrogênio para a biomassa microbiana.

#### **4.4 Fungos Micorrizicos Arbusculares (FMAs)**

##### **4.4.1 Porcentual de colonização de raízes e densidade de esporos de FMAs**

A colonização micorrízica das raízes das plantas diferiu estatisticamente entre os diferentes cultivos estudados (Fig. 6). Observou-se que nos tratamentos com a sequência Hemártria (T5) e Vaqueiro + Hemártria (T8) a colonização micorrízica foi superior do que os demais cultivos, não ocorrendo diferenciação entre esses tratamentos restantes. A colonização micorrízica é uma característica que pode ser afetada por inúmeros fatores como: condições de baixa e elevada

fertilidade do solo, espécie vegetal predominante, idade da planta, densidade de raízes, dos propágulos de FMAs, a eficiência de colonização de FMAs e o manejo do solo, dentre outros (CORDEIRO et al., 2005; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).



**Figura 6.** Porcentual de colonização de raízes por Fungos Micorrizicos Arbusculares - FMAs em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm. T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey entre os tratamentos a 5%. \* significativo a 5% de probabilidade respectivamente usando o teste de Dunnett com T15 comparado aos demais tratamentos estudados.

Assim sendo, neste estudo as diferentes coberturas vegetais utilizadas, e os nutrientes aplicados, especialmente o fósforo adicionado via adubações com NPK. Os teores de P do solo com os tratamentos foram considerados “muito altos” pela CQFS-RS/SC, (2004) (tab. 2) e podem ter influenciado a colonização micorrízica, sendo possivelmente um fator limitante. Moreira e Siqueira (2006) afirmam que em

solos muito deficientes em P, pequenas quantidades deste elemento favorecem a colonização e a esporulação micorrízica, que pode, entretanto, ser inibida com doses elevadas desse nutriente. Os resultados aqui obtidos, com ênfase nos tratamentos mantidos cultivados com Hemártria (T5) e Vaqueiro + Hemártria (T8), corroboram com os de outros estudos os quais relatam colonização abundante na cultura de gramíneas (SIQUEIRA; KLAUBERG-FILHO, 2000; CORDEIRO et al., 2005) e efeito da adição de fósforo na colonização e esporulação de FMAs em diferentes espécies de plantas (MIRANDA et al., 1984).

De acordo com Carneiro et al. (1998), a maioria dos tratamentos (T2, T4, T6, T9, T11, T12, T13, e T14) analisados apresentam um grau de colonização micorrízica na faixa considerada média, os mantidos cultivados com Hemártria (T5) e Vaqueiro + Hemártria (T8), apresentam valores de colonização de raízes classificados como alta, e os T1, T3 e T10 na categoria baixa colonização e o T15 por não apresentar vegetação em sua superfície foi enquadrado na classe ausente.

Carneiro et al. (1998) categorizou as espécies vegetais quanto a colonização micorrízica em classes muito alta, alta, média, baixa e ausente, quando apresentavam grau de colonização >80%, 79-50%, 49-20%, 19-1% e 0%, respectivamente.

A baixa colonização nos cultivos T1, T3 e T10 (Fig. 6) pode ser explicado pelo efeito limitante causado pelo excesso de P no solo (tab. 2), pois este resultados condizem com a afirmação feita por Moreira e Siqueira (2006), em que a inibição da colonização inicia em substrato com teor de P acima de  $50\text{mg kg}^{-1}$  de solo (Mehlich-1), sendo esse efeito muito acentuado em teores acima de  $100\text{mg kg}^{-1}$ . Outro fator que pode explicar tal efeito pode ser devido às altas concentrações de metais pesados como neste caso o Mn, Zn e Cu (tab. 3). Moreira & Siqueira (2006) enfatizaram que a presença de manganês, cobre, zinco, cádmio e níquel inibe a germinação de esporos e o crescimento micelial e reduz a colonização micorrízica das plantas. Os índices de colonização radicular e densidade de esporos dos FMAs são menores em solos submetidos a distúrbios mecânicos ou que são mantidos nus (Oliveira; Sanders, 1999), fato este que se observa na testemunha T15 (Figuras 6 e 7), devido a ausência de vegetação na superfície do solo.

As maiores colonizações micorrízicas nas culturas Hemártria (T5) e Vaqueiro + Hemártria (T8) devem-se, provavelmente, à maior eficiência fotossintética das gramíneas utilizadas na área, que podem garantir altos teores de fotossintatos na

simbiose com os fungos micorrízicos arbusculares, mantendo níveis mais altos de colonização, para obter retorno com a maior absorção de P (Cordeiro et al., 2005). Quando a concentração de fósforo no solo é muito alta, como no caso do presente estudo, o uso de carbono na simbiose micorrízica induziria a aumentos na absorção de P pelo fungo e translocado para a planta, levando a consideráveis aumentos na taxa de fotossíntese (CORDEIRO et al., 2005; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Devido à ausência de vegetação na superfície do solo o T15 não apresentou valores de colonização micorrízica, impossibilitando a sua comparação com os demais tratamentos.

A densidade de esporos diferiu entre os tratamentos, com o T1 e o T2 apresentando o maior e menor número de esporos, respectivamente.

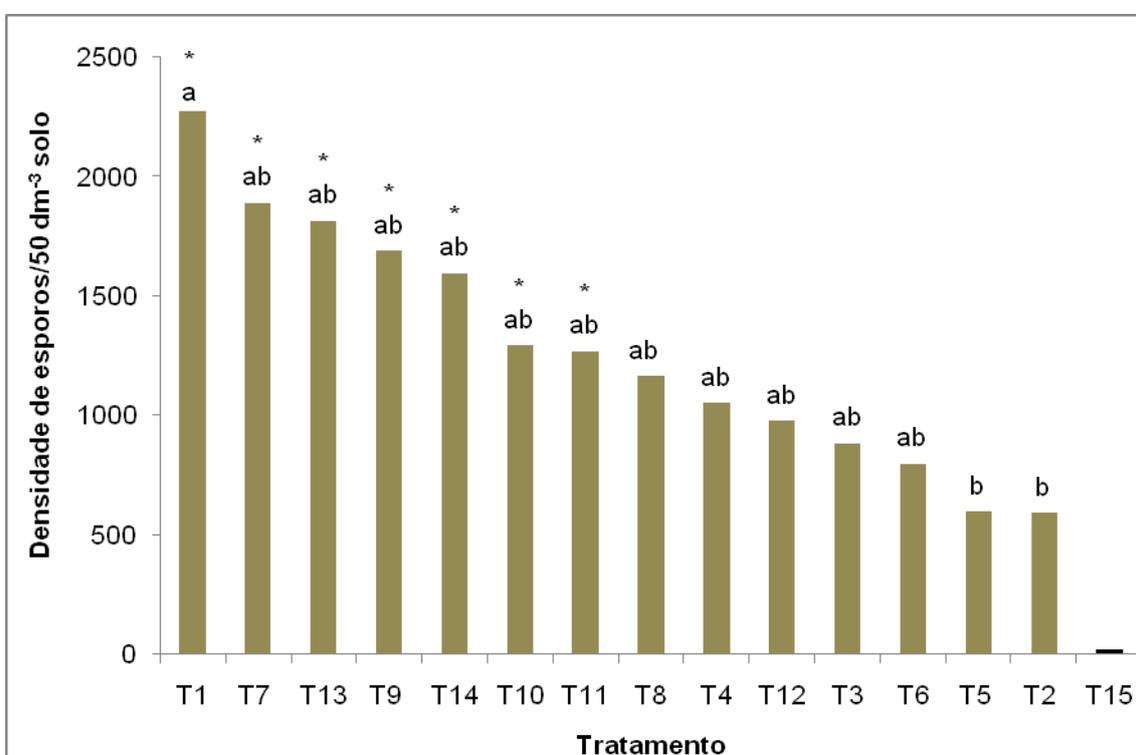
Comparando a testemunha T15 sem plantas de cobertura com os demais tratamentos observou-se que a mineração afetou a densidade de esporos, que aumentou com a reabilitação da área, através da revegetação com plantas forrageiras (Fig. 7). Sendo assim a manutenção da superfície do solo sem vegetação após a mineração de carvão pode ser um fator limitante à recuperação da área minerada e conseqüentemente afetará a presença de micorrizas arbusculares através da densidade de esporos.

Todos os tratamentos analisados apresentaram valores de densidade de esporos superiores aos obtido por Mehrotra (1998), em áreas de mineração de carvão na Índia (cerca de 10 esporos por  $50\text{mL}^{-1}$ ), como também dos obtidos por Caproni (2001) em áreas de mineração de bauxita em Poços de Caldas, MG, revegetadas com gramíneas (braquiária, capim-azevém ou capim-gordura) e com bracatinga em idade avançada, onde se obteve densidade máxima ao redor de 265 esporos por  $50\text{mL}^{-1}$ . Cuenca et al. (1998 apud MELLONI et al., 2004) estudando solos degradados da Venezuela, também verificaram que a revegetação com espécies gramíneas como a braquiária proporcionou aumento da densidade de esporos de FMAs, de 18 a 471 vezes, com relação a solos degradados, não revegetados.

Os resultados deste estudo mostram que as interferências no solo provocadas pela introdução de vegetação e pelo manejo adequado do solo promoveram aumentos no número de esporos de FMAs e alterações na colonização micorrízica. Isso, dependendo das espécies de plantas, quando comparadas às áreas sem interferência antrópica como no solo natural (tab. 1). Portanto a

ocorrência e o estabelecimento da simbiose micorrízica trata-se de uma estratégia dessas plantas para superar estresses bióticos e abióticos que ocorrem no solo.

Ao comparar o tratamento testemunha T15 com os demais tratamentos (Fig. 7), houve diferenças estatísticas, com o tratamento T1 apresentando a maior densidade de esporos (2.275 esporos) e o T2 com o menor valor (594 esporos). Os valores de maior significância são atribuídos aos cultivos T1, T7, T9, T10, T11, T13 e T14, respectivamente, quando comparados com a testemunha T15. Isso demonstra a interferência que as plantas de coberturas utilizadas exercem na recuperação da área e conseqüentemente no grau de esporulação das micorrizas.



**Figura 7.** Densidade de esporos de Fungos Micorrízicos Arbusculares - FMAs em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão na profundidade de 0 – 5cm. T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey entre os tratamentos a 5%. \* significativo a 5% de probabilidade respectivamente usando o teste de Dunnett com T15 comparado aos demais tratamentos estudados.

#### 4.4.2 Identificação das principais espécies de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs)

Foram identificadas doze espécies de FMAs nas amostras de solo da área de estudo: *Acaulospora mellea* Spain & Schenck, *Entrophospora infrequens* (Hall) Ames & Schneider, *Glomus clarum* Nicol. & Schenck, *Glomus macrocarpum* Tulasne & Tulasne, *Glomus tortuosum* Schenck & Smith, *Glomus sp.*, *Glomus clavisporum* (Trappe) Almeida & Schenck, *Glomus dominikii* Blaszkowski, *Glomus etunicatum* Becker & Gerdemann, *Glomus lamellosum* Dalpe, Koske & Tews, *Gigaspora sp.*, *Scutellospora sp.* (tab. 7). A *Gigaspora sp.* é caracterizada por apresentar esporos grandes, maiores que 200 µm, coloração verde-claro, forma globosa a subglobosa, sem ornamentação na parede externa, paredes laminadas e forte reação ao reagente de Melzer, enquanto os esporos de *Glomus sp.* são pequenos, menores que 100µm, coloração alaranjada a marrom, forma globosa a irregular, paredes laminadas e membranosas, fraca reação ao reagente de Melzer. Neste trabalho embora haja uma baixa diversidade de espécies de fungos MAs o mesmo foi superior ao obtido por Mehrotra (1998) em solos de mineração de carvão na Índia, revegetados há sete anos (seis espécies) com diferentes espécies arbóreas, e por Kiernan et al. (1983) em solos de áreas de mineração de carvão nos EUA, naturalmente revegetadas há mais de 30 anos (oito espécies), e foi inferior aos resultados observados por Raman et al. (1993) em solos de mineração de magnesita na Índia, sob revegetação espontânea, onde encontraram-se 13 espécies de fungos MA. Caproni (2001), em solos de área de mineração de bauxita em Porto Trombetas, MG, obteve 57 espécies de FMAs. Embora no presente trabalho haja um baixo nível de espécies o mesmo mostra que a mineração de carvão e os processos de revegetação não destruíram significativamente a diversidade das populações de FMAs. As diferentes condições edáficas, de fertilidade do solo e as espécies vegetais presentes na área de estudo podem ter influenciado na densidade e diversidade de espécies de FMAs (tab. e Fig. 7).

**Tabela 7.** Espécies de fungos micorrízicos arbusculares encontradas e respectivas frequência de ocorrência em um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão em Candiota, RS, na profundidade de 0 – 5cm.

| Fungos                   | Tratamento |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     | SN |
|--------------------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|                          | T1         | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 | T10 | T11 | T12 | T13 | T14 | T15 |    |
| <i>A. mellea</i>         |            |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     | 6   | 6  |
| <i>E. infrequens</i>     |            |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     | 4  |
| <i>G. clarum</i>         |            |    |    |    | 29 |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     | 30 |
| <i>G. macrocarpum</i>    | 25         | 26 | 24 | 21 | 15 | 18 | 26 | 21 | 22 | 18  | 20  | 20  | 30  | 17  | 4   | 20 |
| <i>G. tortuosum</i>      | 28         | 31 | 35 | 30 |    | 26 | 34 | 30 | 31 | 32  | 29  | 32  | 28  | 25  |     |    |
| <i>Glomus sp.</i>        | 12         |    |    |    |    | 7  |    |    |    | 10  |     |     |     |     | 5   |    |
| <i>G. clavisporum</i>    |            |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     | 8   |     |     |     |    |
| <i>G. dominikii</i>      |            |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     | 8   |     |    |
| <i>G. etunicatum</i>     |            |    |    |    | 12 |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |    |
| <i>G. lamellosum</i>     |            |    |    |    |    | 3  |    |    |    |     |     |     |     |     |     |    |
| <i>Gigaspora sp.</i>     |            |    |    | 6  |    | 6  |    | 8  | 4  |     | 10  |     |     | 10  | 4   |    |
| <i>Scutellospora sp.</i> |            |    |    |    |    |    |    |    | 3  |     |     |     |     |     |     |    |
| Frequência total         | 55         | 57 | 59 | 57 | 56 | 60 | 60 | 59 | 60 | 60  | 59  | 60  | 58  | 60  | 19  | 60 |

T1– Capim vaqueiro, T2– Braquiária brizantha, T3– Tanzânia, T4– Braquiária humidícola, T5– Hemártria, T6– Tifton, T7– Vaqueiro+Tifton, T8– Vaqueiro+Hemártria, T9– Braquiária brizantha+Tifton, T10– Braquiária brizantha+Hemártria, T11– Tanzânia+Hemártria, T12– Tanzânia+Tifton, T13– Braquiária humidícola+Hemártria, T14– Braquiária humidícola+Tifton, T15– solo construído descoberto.

## 5 CONCLUSÕES

a) A correção do solo através da calagem e as adubações realizadas, bem como os cultivos resultaram em aumento nos valores de pH, condutividade elétrica, cálcio, magnésio, potássio, fósforo, manganês, zinco, cobre e sódio trocável do solo construído após a mineração de carvão;

b) As diferentes espécies usadas para vegetação do solo construído aumentaram os teores de carbono orgânico total e a respiração basal do solo em relação ao mesmo solo não vegetado;

c) Os maiores teores de carbono da biomassa microbiana no solo constatados nos cultivos com hemátria e braquiária humidícula+hemátria, indicam possíveis alternativas para a recuperação da área em estudo;

d) A colonização micorrízica, o potencial de esporulação e a diversidade de espécies de fungos micorrízicos são aumentadas com a introdução das espécies vegetais, reduzindo o impacto causado pela interferência da mineração;

e) A colonização micorrízica do solo construído da área minerada é aumentada com o cultivo de Hemátria (T5) e Vaqueiro + Hemátria (T8);

f) As espécies de fungos micorrízicos arbusculares encontradas na área de estudo foram: *Acaulospora mellea*, *Entrophospora infrequens*, *Glomus clarum*, *Glomus macrocarpum*, *Glomus tortuosum*, *Glomus sp.*, *Glomus clavisporum*, *Glomus dominikii*, *Glomus etunicatum*, *Glomus lamellosum*, *Gigaspora sp.*, e *Scutellospora sp.* com maior predomínio das espécies *Glomus macrocarpum* e *Glomus tortuosum*, indicando uma possível especificidade das espécies vegetais com a comunidade de FMAs.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C.A.; LOPES, A.S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds) Fertilidade do solo. 2ª Ed. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), p. 646-736, 2007.

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O.; CURTI, N.; MOREIRA, F.M.S. Amenização do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camaldulensis* cultivadas em solo contaminado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.775-783, 2004.

ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.2505-2516, 2008.

AMBIENTE BRASIL. Disponível em:

<<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./gestao/index.html&contedo=./gestao/areas.html>>. Acesso em: 05 de outubro de 2009.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. **Soil Biol. and Bioch.**, v.10, p.215-221, 1978.

ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biol. and Bioch.**, Oxford, v.25, p.393-395, 1993.

ANGHINONI, Ibanor, BISSANI, Carlos. Fósforo e adubos fosfatados. In: Fertilidade dos solos e manejo da adubação das culturas. Porto Alegre: Departamento de Solos, 2004a. p.117-137.

BAGO, B.; PFEFFER, P.E.; SHACHAR, H.Y. Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas. **Plant Physiol.**, v.124, p.949-957, 2000.

BALOTA, E.L.; LOPES, E.S. Introdução de fungo micorrizico arbuscular no cafeeiro em condições de campo: Persistência e interação com espécies nativas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.217-223, 1996.

BEARE, M.H.; PARMELEE, R.W.; HENDRIX, P.F.; CHENG, W. Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agroecosystems. **Ecol. Monogr.**, v.62, p.569-591, 1992.

BERBARA, R.L.L.; SOUZA, F.A.; FONSECA, H.M.A.C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, M.S (Ed.) Nutrição mineral de plantas. Ed. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2007. p. 54-88.

BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O.; TEDESCO, M.J. Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas. 2ª ed. Porto Alegre: Metrópole, 344p. 2008.

BLASZKOWSKI J. 1994. *Glomus clarum* (Glomales, Zygomycetes), a new vesicular-arbuscular fungus to Poland. *Mycotaxon* 52, 99-107.

BLASZKOWSKI J. <[HTTP://www.agro.ar.szczecin.pl/~jblaszkowski](http://www.agro.ar.szczecin.pl/~jblaszkowski)>. Acesso de 01 – 30 dez de 2010.

BROOKES, P.C.; LANDMAN, A.; PRUDEN, B.; JENKINSON, D.S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biol. Biochem.**, v.17, p.837-842, 1985.

BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S. & JENKINSON, D.S. Mensurament of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biol. Biochem.**, v.14, p.319-326, 1982.

BROWN, S.; LUGO, A.E. Rehabilitation of tropical lands: a key sustaining development. **Restoration Ecology**, v.2, p.97-111, 1994.

BUGIN, A. Introdução à recuperação de áreas degradadas. In: TEIXEIRA, E. C., PIRES, M. J. R. (coord). Meio ambiente e carvão - Impactos da exploração e utilização. Porto Alegre, FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/FEPAM, 2002. p.93-98.

BURNS, R.G. Extracellular enzyme-substrate interactions in soil. In: SLATER, J.H.; WHITTENBURY, R.; WIMPENNY, W.T., eds. *Microbes in their natural environments*. **Cambridge**, Cambridge University Press, p.249-298, 1983.

CAMILLO, M.F.; QUINÕES, O.R.G.; INDA JUNIOR, A.V.; BISSANI, C.A.; GIASSON, E.; DICK, D.P. Atributos químicos de solos construídos em áreas de mineração de carvão. In: CRUZ, T.; ROCHA, M.A. (Org.). *Jovens pesquisadores: a ciência e o conhecimento do mundo*. 1ª ed. Porto Alegre, v. 1, p. 101-112, 2004.

CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A.; SOUZA, L. S. Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 27. p.1123-1137, 2003.

CAPRONI, A. L. **Fungos micorrízicos arbusculares em áreas reflorestadas remanescentes da mineração de bauxita em Porto Trombetas, PA**. 2001. 205f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2001.

CARNEIRO, M.A.C.; SIQUEIRA, J.O.; CURI, N.; MOREIRA, F.M.S. Efeitos da inoculação de fungos micorrizicos arbusculares e da aplicação de fósforo no estabelecimento de forrageiras em solo degradado. **Pesq. Agrop. Bras.**, v.34, p.1669-1677, 1999.

CARNEIRO, M.A.C.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; CARVALHO, D.; BOTELHO, S.A.; SAGGIN-JÚNIOR, O.J. Micorríza arbuscular em espécies arbóreas e arbustivas nativas de ocorrência no sudeste do Brasil. **CERNE**, v.4, n.1, p.129-145, 1998.

- CARNEIRO, M.A.C.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; SOARES, A.L.L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cromosequências de reabilitação após mineração de bauxita. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.621-632, 2008.
- CARSON, C.D.; FANNING, D.S.; DIXON, J.B. Alfisols and ultisols with acid sulfate weathering features in Texas. In: KITTRICK, J.A, FANNING, D.S., HOSSNER, L.R. (Ed.). Acid sulfate weathering. Madison: **SSSA**, v.10. p.127-146, 1982.
- CATTELAN, A.J.; VIDOR, C. Sistemas de culturas e população microbiana do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 14, n.2, p.125-132, 1990.
- CGTEE – Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.cgtee.gov.br>. Acesso em: 21 dez. 2010.
- CLARK, R.K.; CLARK, S.C. Floristic diversity in relation to soil characteristic in lead mining complex in the Pennines, England. **New Phytol.**, v.87, p.799-815, 1981.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre, SBCS – Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400p.
- COOK, B. G.; PENGELLY, B. C.; BROWN, S. D.; DONNELLY, J. L.; EAGLES, D. A.; FRANCO, M. A.; HANSON, J.; MULLEN, B. F.; PATRIDGE, I. J.; PETERS, M.; SCHULTZE-KRAFT, R. Tropical Forages: an interactive selection tool. CSIRO, DPI&F (qld), CIAT and ILRI, Brisbane, Austrália. Disponível em: <http://www.tropicalforages.info/>. Acesso em: 21 dez. 2010.
- CORDEIRO, M.A.S.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B.; SAGGIN JUNIOR. Colonização e densidade de esporos de fungos micorrízicos em dois solos do cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Pesq. Agrop. Trop.**, 35 (3): 147-153, 2005.
- CUENCA, G.; ANDRADE, Z. de; ESCALANTE, G. Diversity of glomalean spores from natural, disturbed and revegetated communities growing on nutrient-poor tropical soils. **Soil Biol. & Bioch.**, Oxford, v. 30, n. 6, p.711-719, 1998.
- DAKER (1970) A água na agricultura. Manual de hidráulica agrícola. Rio de Janeiro: Bartos, 1970, 452p.
- DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M.S. (Ed) Nutrição mineral de plantas. 1a Ed. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2007. p.328-354.
- DIAS, L.E.; GRIFFITH J.J. Conceituação e caracterização de áreas degradadas. In: DIAS, E.L. & MELLO, J.W.V., eds. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p.1-7, 1998.
- DICK, R.P.; BREAKWELL, D.P.; TURCO, R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Scien. Soc. of Amer.**, p.247-272, 1996.

DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Significance and potencial uses of soil enzymes for bioremediation. In: Bioremediation of contaminated soils. Madison: American Society of Agronomy, Crop Society of America, **Soil Scien. Soc. of Amer.**, Agronomy monograph n.37, p. 315-338, 1999.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; CELEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for sustainable environment. Madison, **Soil Scien. Soc. of Amer.**, 3-21, 1994. (Special Publication, 35).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p. Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – disponível em [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acesso em: 21 de dez. 2010.

FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F.A.O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p. 991-996, 1999.

FILHO, S.P.V. **Microbiota e sua atividade em uma crossequência sob sistema plantio direto**: ESALQ, 1999. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Microbiologia Agrícola) – escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Piracicaba. FOGEL, R. Mycorrhizae and nutrient cycling in natural Forest ecosystems, **New Phytologist**, v.86, p.199-212, 1980.

FORNASARI FILHO, N.; BRAGA, T.O.; BATISTUCCI, S.G.G.; MONTANHESI, M.O.R. Auditoria e Sistema de Gerenciamento Ambiental (ISO 14000). In: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS. SIMPÓSIO SUL-AMERICANO, 1.; SIMPÓSIO NACIONAL, 2., Curitiba, 1994. **Anais**. Curitiba, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1994. p.25-44.

FOX, R.L.; PENA, R.S.D.L.; GAVENDA, R.T.; HABTE, M.; HUE, N.V.; IKAWA, H.; JONES, R.C.; PLUCKNETT, D.L.; SILVA, J.A.; SOLTANPOUR, P. Amelioration, revegetation and subsequent soil formation in denuded bauxitic materials. *Allertonia*, v.602, p.128-184, 1991.

FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; DIAS, L.E.; FARIA, S.M. Revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas - PA com leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas. In: SIMPÓSIO SULAMERICANO, 1.; SIMPÓSIO NACIONAL: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2., SOBRADE, 1994, Foz do Iguaçu. **Anais**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1994. p.679.

FRANK, A.B. Über die auf werzelsymbiose beruhende Ernährung gewisser Baume durch unterirdische Pilze. **Ber. Dtsch. Bot. Ges.** v.3, p.128-145, 1885.

GALLARDO, A.; SCHLESINGER, W.R. Estimating microbial biomass nitrogen using the fumigation-extraction methods in a warm-temperate forest soil. **Soil Biol. and Bioch.**, Oxford, v.22, p.927-932, 1990.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; VIANA, A. P.; SANTOS, G. A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serrapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.1489-1499, 2008.

GAMA-RODRIGUES, E. F.da. **Biomassa-C microbiana de solos de Itaguaí: comparações entre os métodos da fumigação-incubação e fumigação-extração**. Itaguaí: UFRRJ, 1992. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 1992.

GAMA-RODRIGUES, E. F.da; GAMA-RODRIGUES, A.C.da; BARROS, N. F.de. Biomassa microbiana de carbono e de nitrogênio de solos sob diferentes coberturas florestais. **R. Bras. Ci. Solo**, v.21, p.361-365, 1997.

GAMA-RODRIGUES, E. F.da; GAMA-RODRIGUES. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O. (Eds) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2ª Ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p.159-170.

GERDEMANN, J.W.; NICOLSON, T.H. Spores of mycorrhizal endogene species extracted from soil by wet-sieving and decating. *Trasactions of British Mycological Society*, v.46, p.235-244, 1963.

GIOVANETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. **New Phytol.**, v.84, p.489-500, 1980.

GOMES, A. P.; FERREIRA, J. A. F.; ALBUQUERQUE, L. F.; SUFFERT, T. Carvão fóssil. *Estudos avançados*, Instituto de estudos Avançados da Universidade de São Paulo [online], v.12, n.33, p.89-106. ISSN 0103-4014, 1998.

GONZALEZ, J.A.Z.; COSTA, M.D.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; BORGES, A.C. Acúmulo de ácido oxálico e cristais de cálcio em ectomicorrizas de eucalipto. I – Produção de ácido oxálico e concentração de nutrientes em raízes laterais finas colonizadas por fungos ectomicorrízicos. **R. Bras. Ci. Solo**, v.33, p.541-553, 2009.

GRACE, C.; D. P. STRIBLEY. 1991. A safer procedure for routine staining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **Mycological Research**, v.95, n.9, p.1160-1162.

GRISI, B.M. Biomassa e atividade de microrganismos do solo/ revisão metodológica. **R. Nordest. Biol.**, v.10, p.1-22, 1995.

HAERING, K.C. et al. Changes in mine soil properties resulting from overburden weathering. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.22, p.194-200, 1993.

HOLANDA NETO, M.R.; CASTILHOS, D.D.; CASTILHOS, R.M.V.; PAULETTO, E.A. ROSA, D.S.B.; HELLWING, L. Atributos microbiológicos de solo construído sob diferentes cultivos em áreas de mineração de carvão mineral em Candiota no RS. In:

XVII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA – RBMCSA., 2010, Teresina - PI, **Anais/CD-ROM**, 2010.

HUNGRIA, M.; ANDRADE, D.S.; COLOZZI FILHO, A.; BALOTA, E.L.; SANTOS, J.C.F. Ecologia microbiana em solos sob cultivo na Região Sul do Brasil. In: III Simpósio Brasileiro sobre Microbiologia do solo. Junho de 1994. Londrina Paraná. **Anais...** p.234-270.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação. IBAMA, 1990. 96p.

INVAM. International culture collection of vesicular and arbuscular mycorrhizal fungi. Species Description. Morgantown: West Virginia Agriculture and Forestry Experimental Station, 2000. Disponível em: <<http://www.invam.caf.wvu.edu>>. Acessado em 01 – 30 de dez. 2010.

JASPER, D. A.; ABBOTT, L. K.; ROBSON, A. D. Soil disturbance in native ecosystems the decline and recovery of infectivity of VA mycorrhizal fungi. In: READ, D. J.; LEWIS, D. H.; FITTER, A. H.; ALEXANDER, L. J. (Ed.). Mycorrhizas in ecosystems. Wallingford: **CAB International**, 1992. p. 151-155.

JENKINSON, D.S.; LADD, J.N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E.A. & LADD, J.N., eds., **Soil Biol. Biochem.**, v.5, p.415-471, 1981.

JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. Fumigation with chloroform. **Soil Biol. Biochem.**, v.8, p.167-177, 1976.

KÄMPF, N. et al. Solos construídos em áreas de mineração de carvão da Bacia Carbonífera. In: **Carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: Centro de Ecologia UFRGS, 2000. p. 596-640.

KIERNAN, J. M.; HENDRIX, J. W.; MARONEK, D. M. Endomycorrhizal fungi occurring on orphan strip mines in Kentucky. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 61, n. 6, p. 1798-1803, June 1983.

KISS, S.; DRAGAN-BULARDA, M.; PASCA, D. Enzymology of technogenic soils. **Adv. Agron.**, v.42, p.230–278, 1993.

KITAMURA, A. E.; ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; GONZALEZ, A. P. recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.405-416, 2008.

KLEIN, D.A.; SORENSEN, D.L.; REDENTE, E.F. Soil enzymes: A predictor of reclamation potential and progress. In: TATE, R.L.; KLEIN, D.A., eds. Soil reclamation processes: Microbiological analyses and applications. New York, Dekker, 1985. P.141-171.

KOOPE, J. C.; COSTA, J. F. C. Mineração. In: TEIXEIRA, E. C (Coord.). Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização. Porto Alegre, RS: FEPAM, p.15-27, 2002.

KOSKE, R.E.; GEMMA, J.N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycol. Res.**, v.92, p.488-505, 1989.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geodema**, v.123, p.1-22, 2004.

LEJON, D.P.H.; CHAUSSOD, R.; RANGER, J.; RANJARD, L. Microbial community structure and density under different tree species in an acid forest (Morvan, France). **Microbiol. Ecol.**, v.50, p.614-625, 2005.

MACEDO, M.O.; RESENDE, A.S.; GARCIA, P.C.; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S.; CAMPELO, E.F.C.; FRANCO, A.A. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. **For. Ecol. and Managem.**, v.255, p.1516-1524, 2008.

MCGONIGLE, T.P.; MILLER, M.H.; EVANS, D.G.; FAIRCHILD, G.L.; SWAN, J.A. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytol.**, v.115, p.495-501.

MEHROTRA, V. S. Arbuscular mycorrhizal associations of plants colonizing coal mine spoil in India. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, Inglaterra, v. 130, n. 2, p. 125-133, Mar. 1998.

MELLONI, R.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração de bauxita em reabilitação. **Pesq. Agrop. Bras.**, v. 20, n. 2, p. 267-276, 2003.

MENDONÇA, D.; FIGUEIREDO, S.R.; KLAUBERG FILHO, O.; PIRES, J.C. Características biológicas de um solo reconstruído após mineração de carvão a céu aberto com adição de calagem e esterco animal. In: XXV REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. 2002. Rio de Janeiro. CD Rom, 2002.

MENDONÇA, E.S.; MATOS, E.S. Matéria orgânica do solo: métodos de análises. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, UFV, 2005. 107p.

MEURER, E.J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E.J. (Ed) Fundamentos de química do solo. 3ª Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006, p. 117-162.

MIOLA, E.C.C. **Qualidade física de um solo construído e cultivado com diferentes plantas de cobertura na área de mineração de Candiota, RS.** 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras: Editora UFLA, 2ª ed. 2002. 626p.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras: Editora UFLA, 3ª ed. 2006. 729p.

MÜLLER, A.A.; SANTOS, H.M.; SCHMITT, J.C.C.; MACIEL, L.A.C.; BERTOL, M.A.; CÉSAR, S.B. Perfil analítico do carvão. 2ª ed. Porto Alegre: DNPM, n. 6, 1987. 140p.

NÓBREGA, R. S. A.; MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O.; LIMA, A. S. Caracterização fenotípica e diversidade de bactérias diazotróficas associativas isoladas de solos em reabilitação após a mineração de bauxita. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.269-279, 2004.

NOER, R. Reabilitação de áreas mineradas em minas de carvão a céu aberto: Histórico, métodos e perspectivas. In: II Congresso Brasileiro de carvão, Centro de Estudos de Carvão, **Anais**. CECAR/UFRGS, Porto Alegre-RS, v.1, p.727-734, 1989.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds) Fertilidade do solo. 1a Ed. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2007. p. 472-550.

OADES, J.M.; JENKINSON, D.S. Adenoside-triphosphate content of the soil microbial biomass. **Soil Biol. Biochem.**, v.11, p.201-204, 1979.

OLIVEIRA, A.A.R.; SANDERS, F.E. Effect of manegement practices on mycorrhizal infection, growth and dry matter partitioning in field-grow bean. **Pesq. Agrop. Bras., Brasilia**, v. 34, n. 7, p.1247-1254, 1999.

OLIVEIRA, J.R.A. **O impacto de sistemas integrados de lavouras e pastagens na biomassa-C e na atividade biológica de um Latossolo Vermelho-Escuro de Cerrado**. 2000. 115f. (Tese de Doutorado) – Universidade Federa de Brasília, Brasília, DF.

PATÊS, N. M.S, PIRES, A.J.V, SILVA, C.C.F, SANTOS, L.C, CARVALHO, G.G.P.; FREIRE, M.A.L. Características morfogênicas e estruturais do capim-tanzânia submetido a doses de fósforo e nitrogênio. **R. Bras. Zootec**, v.36, n.6, p.1736-1741, 2007.

PAUL, E.A.; CLARK, F.E. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press: San Diego 275p, 1996.

PAUL, E.A.; CLARK, F.E. Soil microbiology and biochemistry. California: Academic Press, 275p, 1989.

PHILLIPS, J.M.; HAYMAN, D.S. Improved procedure for clearing roots and staining parasitic and vesiculararbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment for infection. **Trans. Brit. Mycol. Soc.**, v.55, p.158-161, 1970.

PINTO, L. F. S. **Potencial de acidificação e de neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em área de mineração de**

**carvão**. , 1997, 186f. Tese (Doutorado em Solos). Faculdade de Agronomia - UFRGS, Porto Alegre, RS.

PINTO, L. F. S.; KÄMPF, N. Contaminação dos Solos Construídos. In: TEIXEIRA, Elba Calesso; PIRES, Marçal José Rodrigues. (Org.). Meio Ambiente e Carvão - Impactos da Exploração e Utilização. Porto Alegre: FEPAM, p. 69-92, 2002.

PIRT, S. J. Principles of microbe and Cell cultivation. Oxford, Boston: Blackwell Scientific, 1975, p.274.

QUIÑONES, O.R.G. **Caracterização e gênese de solos construídos após mineração de carvão na mina boa vista, município de Minas do Leão, RS**. 2004. 60f. Dissertação (Mestrado em ciência do solo). Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS.

REN-SHENG, L.; DANIELS, W.L.; STEWART, B. Influence of liming and topsoil thickness on vegetative growth and leachate quality of acidic coal refuse. In: NATIONAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY FOR SURFACE MINING AND RECLAMATION, 15., St. Louis, 1998. Proceedings. St. Louis, 1998. P.232-337.

RICE, C.W.; MOORMAN, T.B.; BEARE, M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Sci. Soc. of Amer.**, p.203-216, 1996.

ROBERTS, T. **Reservas de minerais potássicos e a produção de fertilizantes potássicos no mundo**. Potafos - Informações Agronômicas, Nº 107, setembro 2004, p. 1- 14.

ROSENDAHL, S.; TAYLOR, J.W. Development of multiple genetic markers for studies of genetic variation in arbuscular mycorrhizal fungi using AFLP(TM). *Molec. Ecol.*, v.6, p.821-829, 1997.

SAGGIN-JUNIOR, O.J. **Micorrizas arbusculares em mudas de espécies arbóreas nativas do sudeste brasileiro**. 1997. 120f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SANCHES, J. C. D.; FORMOSO, M. L. L. Utilização do carvão e meio ambiente. Porto Alegre-RS: CIENTEC (Boletim Técnico, 20), 1990. 34p.

SANTANA, D.F.; BAHIA-FILHO, A.F.C. Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16., Montpellier, França. Proceedings. Montpellier, ISS, 1998. CD-ROM.

SANTOS, D. C. **Alterações químicas e biológicas em solo de área de mineração de carvão submetido a diferentes cultivos**. 2006. 97f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

SANTOS, G.C.G.; ABREU, C.A.; CAMARGO, O.A.; ABREU, M.F. Pó-da-aciaria como fonte de zinco para o milho e seu efeito na disponibilidade de metais pesados. **Bragantia**, v.61, p.257-266, 2002.

SANTOS, V.B.; CASTILHOS, D.D.; CASTILHOS, R.M.V.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; SILVA, D.G. Biomassa, atividade microbiana e teores de carbono e nitrogênio totais de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo, **R. bras. Agrociência**, v.10, n. 3, p.333-338, jul-set, 2004.

SANTUCCI, J. O papel do carvão mineral na geração de energia. In: **Carvão mineral: responsável por 40% da eletricidade mundial**. Porto Alegre, RS. CREA-RS, 2009, 38p.

SCHAFER, W. M, NIELSEN, G. A., NETTLETON, W. D. Minesoil genesis and morphology in a spoil chronosequence in Montana. **Soil Sci. Soc. of Amer. Journ.**, v.44, p.802-807, 1980.

SCHENCK, N.C.; PEREZ, Y. A manual of identification of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi, 2ª ed. Gainesville: University of Florida, 1988. 241p.

SCHNEIDER, P., KÄMPF, N., GIASSON, E. Solos. In: Carvão e Meio Ambiente. Centro de Ecologia da UFRGS. ed.: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2000. p.45-76.

SCHWENKE, G.D.; AYRE, L.; MULLIGAN, D.R.; BELL, L.C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. II. Soil organic matter dynamics in mine. **Austr. J. Soil Res.**, v.38, p.371-393, 2000b.

SCHWENKE, G.D.; MULLIGAN, D.R.; BELL, L.C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. I. Initial changes to soil matter and related parameters. **Austr. J. Soil Res.**, v.38, p.345- 369, 2000a.

SCHWENKE, G.D.; MULLIGAN, D.R.; BELL, L.C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. III. Simulated long-term soil organic matter development. **Austr. J. Soil Res.**, v38, p.395-.410, 2000c.

SENGUPTA, M. Environmental impacts of mining: Monitoring, restoration, and control. Boca Raton, Lewis Publishers, 1993. 494p.

SIEVERDING, E. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. Technical Cooperation. Eschborn: Federal republic of Germany, 1991. 317p.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria Orgânica do Solo In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds) Fertilidade do solo. 1a Ed. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2007. p. 276-374.

SILVA-JUNIOR, M.C.; SACRANO, F.R.; SOUZA CARDEL, F. Regeneration of na Atlantic Forest formation in the undertory of a *Euclyptus grandis* plantation in southeastern Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v.11, p.147-152, 1995.

SIMS, G.K. Biological degradation of soil. *Advances in Soil Science*, **New York**, v.24, p.289-330, 1989.

SIQUEIRA, J. O.; O. KLAUBERG-FILHO. Micorrizas arbusculares: a pesquisa brasileira em perspectiva. p. 235-264, 2000. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). I Tópicos em ciências do solo. SBCS, Viçosa. 2000, 352 p.

SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; GRISI, B.M.; HUNGRIA, M.; ARAUJO, R.S. Microrganismos e processos biológicos do solo: Perspectiva ambiental. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1994. 142p.

SIQUEIRA, J.O.; SOARES, C.R.F.S.; SILVA, C.A. Matéria orgânica em solos de áreas degradadas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O. (Eds) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2ª Ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p.498-525.

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil biochemistry*. New York: Marcel Dekker, v.6, p.357-393, 1990.

SMITH, S.E.; READ, D.J. Mycorrhizal symbiosis. London, Academic Press, 1997. 605p.

SOARES, E.R.; MELLO, J.W.V.; SCHAEFER, E.G.R.; COSTA, L.M. Cinza e carbonato de cálcio na mitigação de drenagem ácida em estéril de mineração de carvão. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.171-181, 2006.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds) Fertilidade do solo. 2ª Ed. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2007. p. 206-274.

SPARLING, G. P.; WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration In situ using microbial respiration and 14C labeled cells. **Soil Biol. Biochem.**, v.20, n.3, p.337-343, 1988.

SRIVASTAVA, S.C.; JHA, A.K.; SINGH, J.S. Changes with time in soil biomass C, N and P of mine spoils in a dry tropical environment. **Can. J. Soil Sci.**, v.69, p.849-855, 1989.

SRIVASTAVA, S.C.; SINGH, J.S. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: Effects of alternate land-user and nutrient flux. **Soil Biol. Biochem.**, v.23, p.117-124, 1991.

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: Methods of soil analysis, Madison: **Amer. Soc. of Agron.**, v.2, n.1, p.1551-1572, 1965.

STÜRMER, S.L.; SIQUEIRA, J.O. Diversidade de fungos micorrizigos arbusculares em ecossistemas brasileiro. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. & BRUSSAARD, L. (Eds.) Biodiversidade do Solo em Ecossistemas Brasileiros. Lavras: Editora UFLA, 2008. p.537-583.

TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W., ed. Methods of soil analysis. Madison, **Soil Sci. Soc. of Amer.**, 1994. p.775-833. (SSSA Book Series, 5).

TEDESCO, M. J.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. Departamento de Solos Universidade Federal do Rio Grande do Sul - RS, 1995. 174p.

TOLEDO, L.O. **Aporte de serrapilheira, fauna edáfica e taxa de decomposição em áreas de floresta secundária no Município de Pinheiral**. 2003. 80f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C.; JAWSON, M.D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Sci. Soc. of Amer.**, (Special Publication, 35), p.73-90. 1994.

van der HEIJDEN, E.W.; KUYPER, T.W. Ecological strategies of estomicorrhizal fungi of *Salix repens*: root manipulation versus root replacement. **Oikos**, v.103, p.668-680, 2003.

van der HEIJDEN, M.G.A.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I.R. Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. **Ecology**, v.79, p.2082-2091, 1998a.

van der HEIJDEN, M.G.A.; KLIRONOMOS, J.N.; URSIC, M.; MOUTOGLIS, P.; STREITWOLF, E.R.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I.R. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, v.396, p.69-72, 1998b.

VASCONCELLOS, C.A.; CAMPOLINA, D.C. A.; SANTOS, F.G. Resposta da soja e da biomassa de carbono do solo aos resíduos de cinco genótipos de sorgo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.23, p.67-77, 1999.

VENCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. Na extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biol. Biochem.**, v. 19, n.6 p.703-707, 1987.

VENZKE FILHO, S.P.; FEIGL, B.J.; PICCOLO, M.C.; SIQUEIRA NETO, M.; CERRI, C.C. Biomassa microbiana do solo em sistema de plantio direto na região de campos gerais - Tibagi, PR. **R. Bras. Ci. Solo**. v.32, p.599-610, 2008.

VICTOR, R. P.; ASSEF, L.C.; PAULINO, V.T. Forrageiras para eqüinos. Disponível em: <http://www.iz.sp.gov.br/artigos.php?ano=2007>. Acesso em: 02 de jan. 2010.

WARDLE, D.A. A comparative assessment of factors with influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biol. Rev.**, v.67, p.321-358, 1992.

WARDLE, D.A. Changes in the microbial biomass and metabolic quotient during leaf litter succession in some New Zealand forest and scrubland ecosystem. **Functional Ecology**, Victoria, v.7, p.346-355, 1993.

## 7 APÊNDICES

Apêndice 1A. Valores brutos de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), pH em água, e condutividade elétrica (C.E) de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS na profundidade de 0-5cm.

| Trat. | Ca<br>cmolc.dm <sup>-3</sup> | Mg<br>cmolc dm <sup>-3</sup> | K<br>cmolc.dm <sup>-3</sup> | P<br>mg Kg <sup>-1</sup> | pH <sub>H2O</sub> | C.E<br>mS.cm <sup>-1</sup> |
|-------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|
| T1    | 7,31                         | 4,07                         | 0,78                        | 64,6                     | 7,4               | 0,19                       |
| T1    | 6,48                         | 4,44                         | 0,60                        | 44,9                     | 7,3               | 0,13                       |
| T1    | 5,75                         | 3,51                         | 0,81                        | 72,1                     | 6,3               | 0,14                       |
| T1    | 6,58                         | 4,88                         | 0,48                        | 42,2                     | 7,0               | 0,15                       |
| T2    | 6,85                         | 3,83                         | 0,75                        | 40,8                     | 7,2               | 0,08                       |
| T2    | 3,74                         | 2,73                         | 0,70                        | 108,1                    | 4,4               | 0,18                       |
| T2    | 5,02                         | 3,34                         | 0,76                        | 51,7                     | 6,5               | 0,11                       |
| T2    | 7,31                         | 4,56                         | 0,67                        | 28,6                     | 6,9               | 0,14                       |
| T3    | 7,67                         | 4,67                         | 0,95                        | 106,8                    | 6,8               | 0,26                       |
| T3    | 6,85                         | 4,30                         | 0,91                        | 91,1                     | 6,7               | 0,18                       |
| T3    | 6,12                         | 3,89                         | 1,13                        | 59,8                     | 6,6               | 0,18                       |
| T3    | 6,67                         | 4,18                         | 0,86                        | 119,0                    | 6,3               | 0,15                       |
| T4    | 5,57                         | 4,27                         | 0,87                        | 89,8                     | 7,0               | 0,11                       |
| T4    | 6,58                         | 3,80                         | 0,58                        | 87,7                     | 6,4               | 0,11                       |
| T4    | 6,94                         | 3,98                         | 0,72                        | 49,0                     | 6,1               | 0,14                       |
| T4    | 7,94                         | 4,56                         | 0,77                        | 83,0                     | 6,8               | 0,19                       |
| T5    | 6,30                         | 4,30                         | 0,79                        | 97,2                     | 6,7               | 0,15                       |
| T5    | 7,12                         | 3,69                         | 0,72                        | 36,7                     | 7,2               | 0,13                       |
| T5    | 5,11                         | 3,51                         | 0,69                        | 34,7                     | 6,5               | 0,12                       |
| T5    | 7,21                         | 4,56                         | 0,69                        | 57,8                     | 6,8               | 0,14                       |
| T6    | 6,48                         | 3,98                         | 0,62                        | 32,0                     | 6,6               | 0,09                       |
| T6    | 5,48                         | 3,22                         | 0,65                        | 38,1                     | 7,3               | 0,12                       |
| T6    | 5,11                         | 3,80                         | 0,72                        | 76,2                     | 6,5               | 0,12                       |
| T6    | 6,48                         | 4,53                         | 0,85                        | 97,2                     | 6,8               | 0,16                       |
| T7    | 5,75                         | 3,54                         | 1,00                        | 84,3                     | 7,3               | 0,10                       |
| T7    | 5,30                         | 3,83                         | 0,79                        | 44,2                     | 6,8               | 0,10                       |
| T7    | 5,30                         | 3,66                         | 0,91                        | 63,2                     | 5,8               | 0,14                       |
| T7    | 6,21                         | 3,67                         | 0,76                        | 72,8                     | 6,7               | 0,19                       |
| T8    | 6,03                         | 3,86                         | 0,89                        | 69,4                     | 7,2               | 0,16                       |
| T8    | 5,94                         | 4,44                         | 0,67                        | 21,1                     | 7,1               | 0,10                       |

|     |      |      |      |       |     |      |
|-----|------|------|------|-------|-----|------|
| T8  | 5,57 | 3,60 | 0,96 | 53,7  | 6,2 | 0,14 |
| T8  | 5,39 | 4,24 | 0,44 | 34,7  | 6,8 | 0,13 |
| T9  | 8,13 | 3,89 | 0,90 | 90,4  | 7,0 | 0,16 |
| T9  | 6,12 | 3,19 | 0,83 | 87,7  | 5,8 | 0,16 |
| T9  | 5,02 | 3,63 | 1,15 | 99,3  | 6,2 | 0,20 |
| T9  | 5,84 | 4,44 | 0,78 | 124,4 | 6,5 | 0,15 |
| T10 | 6,12 | 3,66 | 0,63 | 74,1  | 7,2 | 0,14 |
| T10 | 5,57 | 3,69 | 0,88 | 96,6  | 5,8 | 0,15 |
| T10 | 5,21 | 3,92 | 1,01 | 93,8  | 6,2 | 0,22 |
| T10 | 5,66 | 3,75 | 0,84 | 88,4  | 6,4 | 0,17 |
| T11 | 6,39 | 3,77 | 0,92 | 85,7  | 6,5 | 0,17 |
| T11 | 6,30 | 4,30 | 0,64 | 42,8  | 6,3 | 0,19 |
| T11 | 5,30 | 3,80 | 0,79 | 83,6  | 6,7 | 0,14 |
| T11 | 5,48 | 4,33 | 0,66 | 76,2  | 6,0 | 0,24 |
| T12 | 5,94 | 3,14 | 0,91 | 118,3 | 6,2 | 0,16 |
| T12 | 7,12 | 4,21 | 0,93 | 97,9  | 6,6 | 0,18 |
| T12 | 6,30 | 3,54 | 0,58 | 56,4  | 6,7 | 0,14 |
| T12 | 5,84 | 4,15 | 0,86 | 133,3 | 6,3 | 0,17 |
| T13 | 5,84 | 4,04 | 1,19 | 127,8 | 6,5 | 0,20 |
| T13 | 7,31 | 4,04 | 0,78 | 62,6  | 6,7 | 0,14 |
| T13 | 6,39 | 3,31 | 0,89 | 66,6  | 6,1 | 0,13 |
| T13 | 5,57 | 4,41 | 0,64 | 95,9  | 6,7 | 0,14 |
| T14 | 5,94 | 3,80 | 0,78 | 64,6  | 6,9 | 0,11 |
| T14 | 5,02 | 3,72 | 0,86 | 68,0  | 6,8 | 0,12 |
| T14 | 5,21 | 3,69 | 0,83 | 55,8  | 6,3 | 0,12 |
| T14 | 4,84 | 4,38 | 0,62 | 39,4  | 6,1 | 0,43 |
| T15 | 3,93 | 3,19 | 0,29 | 42,2  | 6,0 | 0,08 |
| T15 | 3,94 | 3,22 | 0,28 | 42,0  | 6,0 | 0,06 |
| T15 | 3,92 | 3,20 | 0,27 | 42,3  | 7,5 | 0,10 |
| T15 | 3,94 | 3,16 | 0,26 | 42,2  | 7,7 | 0,08 |
| SN  | 2,28 | 1,10 | 0,17 | 57,8  | 4,7 | 0,07 |
| SN  | 2,27 | 1,11 | 0,17 | 57,0  | 4,7 | 0,06 |
| SN  | 2,29 | 1,12 | 0,17 | 58,0  | 4,7 | 0,07 |
| SN  | 2,26 | 1,10 | 0,17 | 58,2  | 4,7 | 0,07 |

Apêndice 2B. Valores brutos de sódio (Na), manganês (Mn), zinco (Zn), e cobre (Cu) de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS na profundidade de 0-5cm.

| <b>Tratamento</b> | <b>Na mg Kg<sup>-1</sup></b> | <b>Mn mg Kg<sup>-1</sup></b> | <b>Zn mg Kg<sup>-1</sup></b> | <b>Cu mg Kg<sup>-1</sup></b> |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| T1                | 16,69                        | 4,35                         | 2,45                         | 0,61                         |
| T1                | 10,80                        | 10,88                        | 1,09                         | 0,71                         |
| T1                | 17,68                        | 6,53                         | 1,24                         | 0,71                         |
| T1                | 22,59                        | 2,18                         | 1,38                         | 0,71                         |
| T2                | 7,86                         | 8,70                         | 1,24                         | 0,71                         |
| T2                | 7,86                         | 50,05                        | 5,01                         | 0,82                         |
| T2                | 10,80                        | 17,41                        | 0,95                         | 0,82                         |
| T2                | 14,73                        | 6,53                         | 1,41                         | 0,61                         |
| T3                | 13,75                        | 8,70                         | 1,38                         | 0,61                         |
| T3                | 14,73                        | 10,88                        | 1,30                         | 0,61                         |
| T3                | 13,75                        | 17,41                        | 1,12                         | 0,61                         |
| T3                | 13,75                        | 6,53                         | 1,58                         | 0,51                         |
| T4                | 15,71                        | 13,06                        | 2,02                         | 0,71                         |
| T4                | 14,73                        | 21,76                        | 1,35                         | 0,92                         |
| T4                | 16,69                        | 23,94                        | 1,15                         | 0,71                         |
| T4                | 17,68                        | 13,06                        | 1,50                         | 0,51                         |
| T5                | 12,77                        | 23,94                        | 1,67                         | 0,71                         |
| T5                | 10,80                        | 8,70                         | 1,30                         | 0,71                         |
| T5                | 9,82                         | 6,53                         | 0,92                         | 0,82                         |
| T5                | 20,62                        | 8,70                         | 1,67                         | 0,82                         |
| T6                | 9,82                         | 21,76                        | 1,04                         | 0,82                         |
| T6                | 8,84                         | 2,18                         | 1,12                         | 0,71                         |
| T6                | 13,75                        | 8,70                         | 0,78                         | 0,51                         |
| T6                | 14,73                        | 8,70                         | 1,73                         | 0,41                         |
| T7                | 15,71                        | 8,70                         | 1,35                         | 0,71                         |
| T7                | 14,73                        | 13,06                        | 0,95                         | 0,92                         |
| T7                | 10,80                        | 15,23                        | 1,04                         | 0,71                         |
| T7                | 17,68                        | 6,53                         | 1,61                         | 0,61                         |
| T8                | 12,77                        | 6,53                         | 1,87                         | 0,71                         |
| T8                | 8,84                         | 8,70                         | 0,81                         | 0,82                         |
| T8                | 12,77                        | 8,70                         | 1,30                         | 0,71                         |
| T8                | 14,73                        | 6,53                         | 0,72                         | 0,51                         |
| T9                | 11,78                        | 4,35                         | 1,58                         | 0,71                         |
| T9                | 12,77                        | 39,17                        | 1,64                         | 0,71                         |
| T9                | 17,68                        | 21,76                        | 1,61                         | 0,82                         |

---

|     |       |       |      |      |
|-----|-------|-------|------|------|
| T9  | 14,73 | 13,06 | 1,53 | 0,71 |
| T10 | 11,78 | 8,70  | 1,47 | 0,71 |
| T10 | 12,77 | 52,22 | 2,82 | 0,71 |
| T10 | 14,73 | 17,41 | 1,84 | 0,71 |
| T10 | 12,77 | 26,11 | 2,04 | 0,71 |
| T11 | 10,80 | 15,23 | 1,44 | 0,51 |
| T11 | 12,77 | 23,94 | 1,35 | 0,71 |
| T11 | 11,78 | 15,23 | 1,41 | 0,82 |
| T11 | 14,73 | 23,94 | 3,57 | 0,61 |
| T12 | 12,77 | 15,23 | 1,24 | 0,51 |
| T12 | 27,50 | 17,41 | 2,28 | 0,51 |
| T12 | 11,78 | 23,94 | 1,30 | 0,51 |
| T12 | 11,78 | 19,58 | 3,17 | 0,61 |
| T13 | 24,55 | 10,88 | 2,36 | 0,82 |
| T13 | 14,73 | 23,00 | 1,04 | 0,71 |
| T13 | 18,66 | 45,70 | 0,92 | 0,51 |
| T13 | 18,66 | 13,06 | 1,44 | 0,61 |
| T14 | 12,77 | 8,70  | 1,30 | 0,71 |
| T14 | 12,77 | 17,41 | 1,09 | 0,61 |
| T14 | 13,75 | 8,70  | 1,04 | 0,51 |
| T14 | 12,77 | 8,70  | 2,02 | 0,51 |
| T15 | 8,84  | 13,06 | 0,52 | 0,61 |
| T15 | 8,85  | 19,23 | 0,55 | 0,67 |
| T15 | 8,86  | 16,48 | 0,51 | 0,57 |
| T15 | 8,83  | 8,24  | 0,50 | 0,59 |
| SN  | 6,87  | 87,90 | 2,48 | 0,92 |
| SN  | 6,86  | 87,90 | 2,44 | 0,90 |
| SN  | 6,85  | 90,65 | 2,52 | 0,87 |
| SN  | 6,88  | 85,15 | 2,48 | 0,99 |

---

Apêndice 3C. Valores brutos de nitrogênio total (Nt), carbono orgânico total (COT), carbono microbiano (Cmic), nitrogênio microbiano (Nmic), respiração basal (R.B) e quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS na profundidade de 0-5cm.

| Trat. | Nt<br>g Kg <sup>-1</sup> | COT<br>g kg <sup>-1</sup> | C <sub>mic</sub> µg de C<br>.g solo | N <sub>mic</sub><br>mg.Kg <sup>-1</sup> | R.B<br>µg C-CO <sub>2</sub> /h/g solo | qCO <sub>2</sub> x10 <sup>-3</sup> |
|-------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| T1    | 0,86                     | 8,14                      | 368,73                              | 12,96                                   | 1,12                                  | 3,05                               |
| T1    | 0,86                     | 8,87                      | 390,91                              | 81,02                                   | 0,61                                  | 1,55                               |
| T1    | 1,05                     | 11,26                     | 369,1                               | 81,02                                   | 0,67                                  | 1,82                               |
| T1    | 0,91                     | 9,81                      | 347,68                              | 113,43                                  | 0,83                                  | 2,39                               |
| T2    | 0,89                     | 10,22                     | 245,45                              | 84,26                                   | 0,80                                  | 3,25                               |
| T2    | 1,03                     | 13,14                     | 257,07                              | 103,7                                   | 0,56                                  | 2,19                               |
| T2    | 0,94                     | 9,08                      | 296,8                               | 55,09                                   | 0,58                                  | 1,97                               |
| T2    | 0,99                     | 10,95                     | 228,96                              | 126,39                                  | 0,71                                  | 3,12                               |
| T3    | 0,99                     | 9,6                       | 482,18                              | 68,06                                   | 0,57                                  | 1,18                               |
| T3    | 1,02                     | 11,68                     | 300                                 | 35,65                                   | 0,78                                  | 2,59                               |
| T3    | 1,05                     | 10,64                     | 457,92                              | 32,41                                   | 0,35                                  | 0,77                               |
| T3    | 0,99                     | 10,54                     | 413,37                              | 45,37                                   | 0,69                                  | 1,66                               |
| T4    | 0,93                     | 10,74                     | 305,53                              | 16,2                                    | 0,75                                  | 2,45                               |
| T4    | 0,80                     | 9,29                      | 263,64                              | 64,81                                   | 0,51                                  | 1,94                               |
| T4    | 0,94                     | 10,33                     | 296,8                               | 45,37                                   | 0,44                                  | 1,49                               |
| T4    | 1,02                     | 11,47                     | 356,16                              | 38,89                                   | 1,16                                  | 3,27                               |
| T5    | 1,01                     | 11,58                     | 445,45                              | 61,57                                   | 0,85                                  | 1,91                               |
| T5    | 0,95                     | 8,87                      | 554,55                              | 35,65                                   | 0,64                                  | 1,15                               |
| T5    | 1,01                     | 10,43                     | 576,64                              | 68,06                                   | 0,48                                  | 0,83                               |
| T5    | 1,09                     | 11,26                     | 525,55                              | 81,02                                   | 0,87                                  | 1,65                               |
| T6    | 0,83                     | 9,18                      | 472,73                              | 97,22                                   | 0,40                                  | 0,84                               |
| T6    | 0,78                     | 8,56                      | 554,55                              | 58,33                                   | 0,63                                  | 1,14                               |
| T6    | 0,89                     | 9,39                      | 441,36                              | 55,09                                   | 0,57                                  | 1,30                               |
| T6    | 1,11                     | 11,58                     | 296,8                               | 58,33                                   | 0,88                                  | 2,95                               |
| T7    | 0,86                     | 8,56                      | 368,73                              | 35,65                                   | 0,38                                  | 1,04                               |
| T7    | 0,86                     | 9,08                      | 536,36                              | 84,26                                   | 0,57                                  | 1,06                               |
| T7    | 1,02                     | 11,37                     | 454,18                              | 64,81                                   | 0,35                                  | 0,77                               |
| T7    | 0,97                     | 10,54                     | 457,92                              | 106,94                                  | 0,76                                  | 1,67                               |
| T8    | 0,91                     | 10,02                     | 425,45                              | 16,2                                    | 0,69                                  | 1,61                               |
| T8    | 0,83                     | 8,25                      | 272,73                              | 45,37                                   | 0,54                                  | 1,99                               |
| T8    | 1,05                     | 11,26                     | 326                                 | 81,02                                   | 0,64                                  | 1,98                               |
| T8    | 0,97                     | 8,35                      | 279,84                              | 32,41                                   | 0,55                                  | 1,97                               |

|     |      |       |        |        |      |      |
|-----|------|-------|--------|--------|------|------|
| T9  | 0,91 | 9,39  | 302,55 | 25,93  | 0,90 | 2,99 |
| T9  | 0,99 | 10,85 | 372,73 | 68,06  | 0,55 | 1,48 |
| T9  | 1,10 | 13,76 | 322,24 | 25,93  | 0,37 | 1,15 |
| T9  | 1,23 | 11,16 | 364,64 | 45,37  | 1,09 | 2,98 |
| T10 | 0,91 | 8,87  | 445,2  | 12,96  | 0,85 | 1,91 |
| T10 | 1,07 | 11,68 | 445,2  | 51,85  | 0,96 | 2,16 |
| T10 | 1,14 | 12,1  | 576,64 | 93,98  | 1,03 | 1,78 |
| T10 | 1,03 | 10,88 | 313,76 | 53     | 1,00 | 3,18 |
| T11 | 0,94 | 9,81  | 300    | 19,44  | 0,41 | 1,37 |
| T11 | 0,93 | 9,39  | 236,36 | 58,33  | 0,54 | 2,30 |
| T11 | 1,02 | 9,7   | 238,96 | 61,57  | 0,60 | 2,49 |
| T11 | 1,18 | 15,53 | 424    | 55,09  | 0,81 | 1,90 |
| T12 | 0,90 | 8,46  | 321,45 | 6,48   | 0,28 | 0,88 |
| T12 | 1,01 | 10,33 | 307,84 | 90,74  | 0,75 | 2,44 |
| T12 | 1,11 | 12,2  | 254,4  | 58,33  | 0,64 | 2,50 |
| T12 | 0,97 | 11,68 | 347,68 | 110,19 | 1,43 | 4,12 |
| T13 | 1,03 | 9,81  | 545,45 | 35,65  | 0,74 | 1,35 |
| T13 | 1,03 | 10,43 | 663,64 | 42,13  | 0,85 | 1,28 |
| T13 | 1,23 | 12,1  | 569,8  | 35,65  | 0,36 | 0,63 |
| T13 | 1,23 | 10,95 | 500,32 | 90,74  | 1,65 | 3,30 |
| T14 | 0,91 | 8,35  | 445,45 | 55,09  | 0,64 | 1,43 |
| T14 | 0,99 | 10,44 | 368,96 | 64,81  | 0,49 | 1,33 |
| T14 | 0,99 | 10,12 | 305,28 | 51,85  | 0,77 | 2,52 |
| T14 | 0,90 | 9,39  | 356,16 | 16,2   | 0,80 | 2,25 |
| T15 | 1,01 | 6,06  | 164,64 | 55,09  | 0,04 | 0,27 |
| T15 | 0,99 | 6     | 190,91 | 58,33  | 0,03 | 0,16 |
| T15 | 1,08 | 6,06  | 164,64 | 61,57  | 0,02 | 0,12 |
| T15 | 0,98 | 6     | 190,91 | 77,78  | 0,06 | 0,31 |
| SN  | 1,99 | 27,42 | 363,64 | 64,81  | 1,31 | 3,60 |
| SN  | 2,00 | 27,4  | 636,36 | 55,09  | 1,30 | 2,04 |
| SN  | 1,96 | 27,44 | 363,64 | 74,54  | 1,32 | 3,63 |
| SN  | 1,98 | 27,42 | 636,36 | 68,06  | 1,31 | 2,06 |

Apêndice 4D. Valores brutos das relações carbono microbiano/carbono orgânico total (Cmic/COT %), nitrogênio microbiano (Nmic/Nt %), carbono microbiano/nitrogênio microbiano (Cmic/Nmic) e carbono orgânico total/nitrogênio total (COT/Ntotal) de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS na profundidade de 0-5cm.

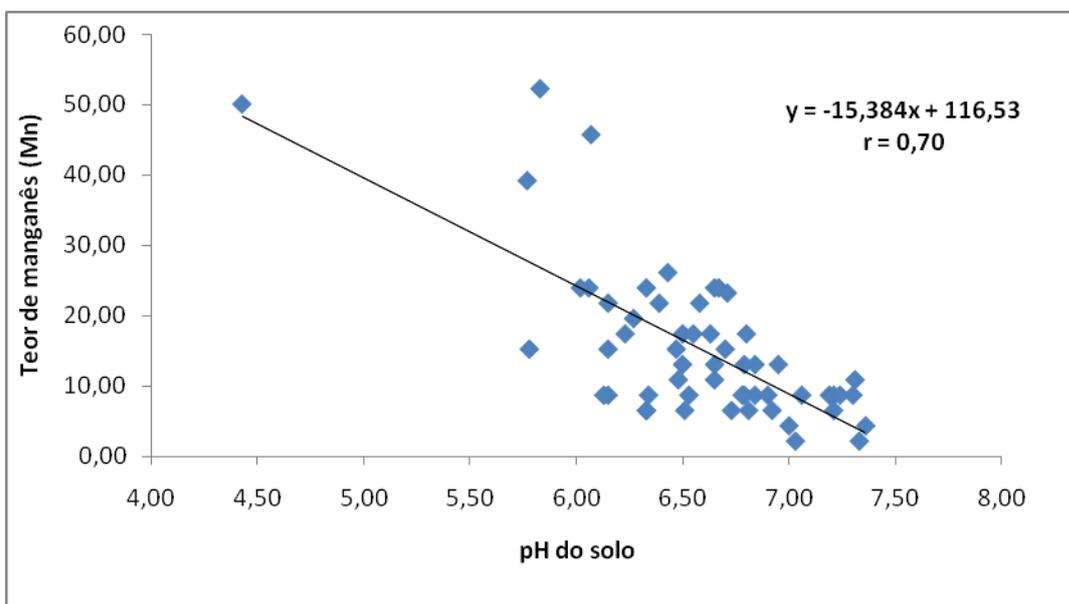
| <b>Trat.</b> | <b>Cmic/COT %</b> | <b>Nmic/Nt %</b> | <b>Cmic/Nmic</b> | <b>COT/Ntotal</b> |
|--------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| T1           | 4,53              | 1,51             | 28,45            | 9,48              |
| T1           | 4,41              | 9,44             | 4,82             | 10,33             |
| T1           | 3,28              | 7,74             | 4,56             | 10,76             |
| T1           | 3,54              | 12,44            | 3,07             | 10,76             |
| T2           | 2,40              | 9,52             | 2,91             | 9,67              |
| T2           | 1,96              | 10,04            | 2,48             | 12,16             |
| T2           | 3,27              | 5,87             | 5,39             | 9,93              |
| T2           | 2,09              | 12,73            | 1,81             | 10,01             |
| T3           | 5,02              | 6,86             | 7,08             | 9,67              |
| T3           | 2,57              | 3,50             | 8,42             | 11,46             |
| T3           | 4,30              | 3,10             | 14,13            | 10,17             |
| T3           | 3,92              | 4,57             | 9,11             | 10,62             |
| T4           | 2,84              | 1,75             | 18,86            | 11,61             |
| T4           | 2,84              | 8,05             | 4,07             | 11,54             |
| T4           | 2,87              | 4,83             | 6,54             | 11,00             |
| T4           | 3,11              | 3,82             | 9,16             | 11,25             |
| T5           | 3,85              | 6,12             | 7,23             | 11,51             |
| T5           | 6,25              | 3,74             | 15,56            | 9,31              |
| T5           | 5,53              | 6,77             | 8,47             | 10,37             |
| T5           | 4,67              | 7,46             | 6,49             | 10,36             |
| T6           | 5,15              | 11,69            | 4,86             | 11,04             |
| T6           | 6,48              | 7,50             | 9,51             | 11,00             |
| T6           | 4,70              | 6,22             | 8,01             | 10,61             |
| T6           | 2,56              | 5,24             | 5,09             | 10,40             |
| T7           | 4,31              | 4,15             | 10,34            | 9,97              |
| T7           | 5,91              | 9,82             | 6,37             | 10,58             |
| T7           | 3,99              | 6,36             | 7,01             | 11,15             |
| T7           | 4,34              | 11,07            | 4,28             | 10,91             |
| T8           | 4,25              | 1,78             | 26,26            | 10,99             |

|     |      |       |       |       |
|-----|------|-------|-------|-------|
| T8  | 3,31 | 5,46  | 6,01  | 9,92  |
| T8  | 2,90 | 7,74  | 4,02  | 10,76 |
| T8  | 3,35 | 3,36  | 8,63  | 8,65  |
| T9  | 3,22 | 2,84  | 11,67 | 10,30 |
| T9  | 3,44 | 6,86  | 5,48  | 10,93 |
| T9  | 2,34 | 2,36  | 12,43 | 12,51 |
| T9  | 3,27 | 3,68  | 8,04  | 9,04  |
| T10 | 5,02 | 1,42  | 34,35 | 9,73  |
| T10 | 3,81 | 4,83  | 8,59  | 10,89 |
| T10 | 4,77 | 8,24  | 6,14  | 10,61 |
| T10 | 2,88 | 5,13  | 5,92  | 10,54 |
| T11 | 3,06 | 2,07  | 15,43 | 10,45 |
| T11 | 2,52 | 6,30  | 4,05  | 10,15 |
| T11 | 2,46 | 6,04  | 3,88  | 9,52  |
| T11 | 2,73 | 4,67  | 7,70  | 13,16 |
| T12 | 3,80 | 0,72  | 49,61 | 9,41  |
| T12 | 2,98 | 9,02  | 3,39  | 10,27 |
| T12 | 2,09 | 5,24  | 4,36  | 10,96 |
| T12 | 2,98 | 11,41 | 3,16  | 12,10 |
| T13 | 5,56 | 3,45  | 15,30 | 9,50  |
| T13 | 6,36 | 4,08  | 15,75 | 10,10 |
| T13 | 4,71 | 2,89  | 15,98 | 9,81  |
| T13 | 4,57 | 7,35  | 5,51  | 8,87  |
| T14 | 5,33 | 6,04  | 8,09  | 9,16  |
| T14 | 3,53 | 6,53  | 5,69  | 10,52 |
| T14 | 3,02 | 5,22  | 5,89  | 10,20 |
| T14 | 3,79 | 1,80  | 21,99 | 10,45 |
| T15 | 2,72 | 5,48  | 2,99  | 6,02  |
| T15 | 3,18 | 5,89  | 3,27  | 6,06  |
| T15 | 2,72 | 5,70  | 2,67  | 5,61  |
| T15 | 3,18 | 7,94  | 2,45  | 6,12  |
| SN  | 1,33 | 3,26  | 5,61  | 13,79 |
| SN  | 2,32 | 2,75  | 11,55 | 13,70 |
| SN  | 1,33 | 3,80  | 4,88  | 14,00 |
| SN  | 2,32 | 3,44  | 9,35  | 13,85 |

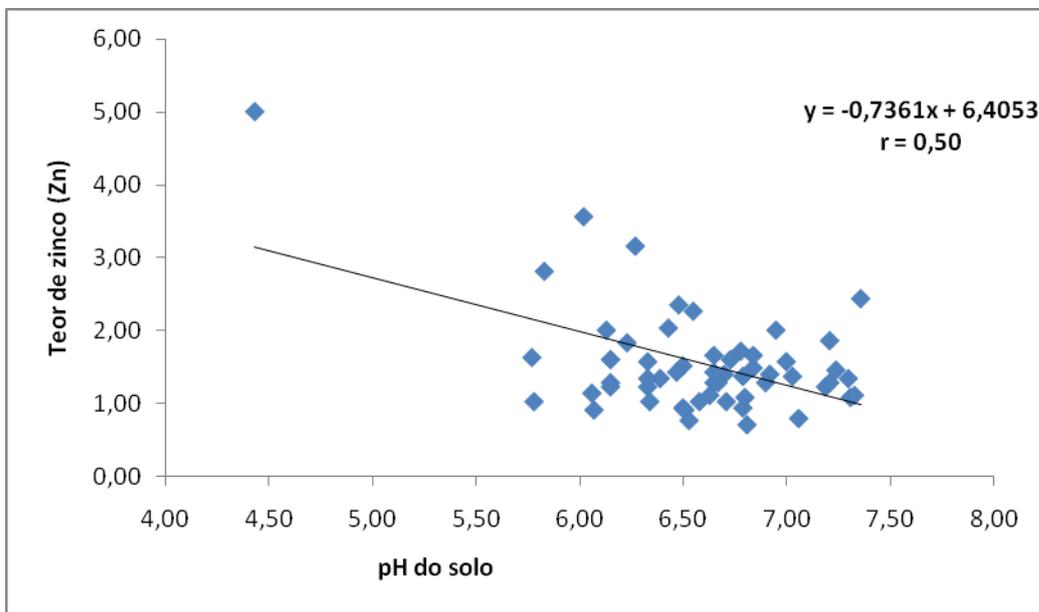
Apêndice 5E. Valores brutos de percentual de colonização de raízes por FMAs e número de esporos de FMAs, de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS na profundidade de 0-5cm.

| <b>Trat.</b> | <b>% Colonização de raízes</b> | <b>Nº. Esporos FMAs</b> |
|--------------|--------------------------------|-------------------------|
| T1           | 21                             | 2322                    |
| T1           | 19                             | 2763                    |
| T1           | 15                             | 2368                    |
| T1           | 18                             | 1647                    |
| T2           | 38                             | 306                     |
| T2           | 24                             | 1254                    |
| T2           | 43                             | 252                     |
| T2           | 22                             | 564                     |
| T3           | 29                             | 1723                    |
| T3           | 15                             | 806                     |
| T3           | 10                             | 750                     |
| T3           | 15                             | 261                     |
| T4           | 26                             | 1130                    |
| T4           | 28                             | 1671                    |
| T4           | 16                             | 618                     |
| T4           | 21                             | 788                     |
| T5           | 48                             | 500                     |
| T5           | 59                             | 699                     |
| T5           | 58                             | 599,5                   |
| T5           | 50                             | 599                     |
| T6           | 38                             | 1801                    |
| T6           | 37                             | 643                     |
| T6           | 41                             | 554                     |
| T6           | 22                             | 202                     |
| T7           | 25                             | 1357                    |
| T7           | 17                             | 3700                    |
| T7           | 21                             | 892                     |
| T7           | 43                             | 1617                    |
| T8           | 63                             | 468                     |
| T8           | 53                             | 1173                    |
| T8           | 38                             | 1080                    |
| T8           | 54                             | 1940                    |

|       |    |      |
|-------|----|------|
| T9    | 20 | 2382 |
| T9    | 35 | 1277 |
| <hr/> |    |      |
| T9    | 48 | 1466 |
| T9    | 43 | 1630 |
| T10   | 24 | 2150 |
| T10   | 12 | 573  |
| T10   | 15 | 1293 |
| T10   | 10 | 1155 |
| T11   | 39 | 1431 |
| T11   | 17 | 758  |
| T11   | 34 | 1780 |
| T11   | 29 | 1112 |
| T12   | 25 | 791  |
| T12   | 27 | 1044 |
| T12   | 28 | 988  |
| T12   | 30 | 1093 |
| T13   | 30 | 2525 |
| T13   | 15 | 1043 |
| T13   | 22 | 1800 |
| T13   | 42 | 1898 |
| T14   | 25 | 1704 |
| T14   | 21 | 1841 |
| T14   | 34 | 600  |
| T14   | 21 | 2238 |
| T15   | 40 | 7    |
| T15   | 34 | 23   |
| T15   | 48 | 25   |
| T15   | 20 | 30   |
| SN    | 40 | 193  |
| SN    | 40 | 193  |
| SN    | 38 | 167  |
| SN    | 42 | 220  |
| <hr/> |    |      |



**Figura 8.** Apêndice 6F - Correlação de manganês (Mn) X pH do solo, de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS.



**Figura 9.** Apêndice 7G - Correlação de zinco (Zn) X pH do solo, de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS.