FABIANO ANDRÉ PETTER

BIOMASSA CARBONIZADA COMO CONDICIONADOR DE SOLO: ASPECTOS AGRONÔMICOS E AMBIENTAIS DO SEU USO EM SOLOS DE CERRADO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador:

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

Co-orientador:

Dr(a). Beáta Emöke Madari

Goiânia, GO – Brasil

2010

FABIANO ANDRÉ PETTER

TÍTULO: **"BIOMASSA CARBONIZADA COMO CONDICIONADOR DE SOLO: ASPECTOS AGRONÔMICOS E AMBIENTAIS DO SEU USO EM SOLOS DE CERRADO".**

Tese DEFENDIDA em 02 de julho de 2010, e APROVADA pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Drª. Beáta Emöke Madari
Embrapa Arroz e Feijão

Drª. Claudia Maria Branco Freitas Maia
Embrapa Florestas - Curitiba, PR.

Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Tomás de Aquino Portes e Castro
UFG/ICB

Dra. Maria da Conceição Santana Carvalho
Embrapa Arroz e Feijão

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro
Presidente - UFG/CAJ

Goiânia - Goiás
Brasil

DEDICATÓRIA

A Deus, por me dar sempre mais do que mereço.

À meus queridos Pais, Eustácio José Petter (*in memorian*) e Maria de Lourdes Petter, pelos ensinamentos de educação, respeito e companheirismo, pelo sacrifício para que meus sonhos se tornassem realidade. Não foram apenas pais, mas sim amigos e companheiros em todas as horas em que precisei meu profundo reconhecimento por tudo que fizeram por mim.

À Leidiane Padilha da Cunha Petter e nosso amado filho Lucas Cunha Petter, companheiros de todas as horas, que com muito amor, apoio, dedicação e paciência souberam enfrentar comigo todos os desafios deste trabalho, bem como em toda minha trajetória pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Às instituições de ensino e pesquisa, Universidade Federal de Goiás – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Embrapa Arroz e Feijão, Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT pelo infraestrutura e apoio técnico necessário no planejamento, condução e avaliação dos experimentos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

À Capes, pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Orientador, Marco Aurélio Carbone, pelos ensinamentos, compreensão e confiança durante meu doutoramento.

A Co-orientadora, Beáta Emöke Madari, pelas brilhantes orientações, incentivos, apoio, amizade, paciência e conhecimentos, os quais foram transmitidos com enorme dedicação e também pelo exemplo de vida como pessoa, educador e pesquisador, minha mais profunda e admirável consideração.

Aos professores, Tomás de Aquino Portes, Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo, Dra. Claudia Maria Branco F. Maia, Dra. Maria da Conceição Santana Carvalho pela gentileza de participarem da banca examinadora.

Aos pesquisadores da Embrapa Arroz e Feijão, Ms. Márcia, pelas orientações na definição de metodologias a serem utilizadas nos experimentos.

Aos meus irmãos José Eduardo (*in memorian*), Robinson (*in memorian*), Marco, Carlos e Jaqueline e suas famílias, pelos incentivos de todos os meus objetivos durante toda minha existência.

Aos funcionários da Embrapa: Diego, Wesley, Adilson, Silvio, entre outros, que tornaram possíveis a avaliação e determinações em laboratório, dos experimentos.

Aos alunos de graduação e meus orientados da UNEMAT, Diogo Milhomem Machado, Fabrício Ribeiro Andrade, Orlai Moreira da Silva, Thiago Rodrigo Schossler, Gustavo Garcia Noleto, pela dedicação e empenho sem tamanho na condução dos experimentos, por compartilhar momentos importantes em minha vida e me ajudar em várias etapas dos experimentos.

Aos colegas de pós-graduação, Leandro Pereira Pacheco, Janne Louize, Roberta Freitas, Priscila de Oliveira, Jeander Caetano, Rafael Ratke, Euraime, Carloeme,

João Eudes pelos momentos maravilhosos que passamos juntos, aprendizado, e companheirismo durante esta caminhada.

Ao Wellington Mota, secretário do PPGA da UFG, pela dedicação, apoio, amizade, sempre me apoiando e estando postos a ajudar, um grande ser humano, que ficará marcado sempre como um grande amigo.

A Neura Lúcia Cunha e seus filhos, Luiz Carlos, Neirismar, por me acolherem em sua casa e me fazerem sentir muito melhor do que já era.

Ao José Humberto pela amizade, companheirismo durante todos estes anos.

Ao meu querido amigo e companheiro Ludgero Nogueria da Silva, pelo carinho e amor com que sempre dedicou seu tempo a me apoiar em todos os momentos de minha vida e suprir minhas ausências para que meus sonhos se realizassem.

Ao meu amigo Marcelo Raphael Volf, pelo companheirismo, carinho e dedicação em todos os momentos deste trabalho.

Aos amigos de trabalho no dia a dia Leidimar e Vinicius pela agradável convivência.

Aos meus amigos Bem Hur e Beatriz, pelo incentivo e amizade.

Tantas pessoas que em minha vida estiveram, cada uma com suas particularidades e brilhantes histórias de vida, que de certa forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, pessoas pelas quais sinto uma enorme gratidão e respeito, pessoas pelas quais jamais esquecerei.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS..... 8

LISTA DE FIGURAS..... 12

RESUMO GERAL..... 15

GENERAL ABSTRACT..... 17

1 INTRODUÇÃO GERAL..... 19

2 REVISÃO DE LITERATURA..... 22

2.1 CARVÃO VEGETAL NO SOLO..... 22

2.2 PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL OU BIOMASSA CARBONIZADA 23

2.3 PROPRIEDADES FÍSICA E ORGANOQUÍMICAS DO BIOCHAR..... 25

2.4 BIOCHAR E ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO..... 28

2.5 BIOCHAR E SUAS PERSPECTIVAS AMBIENTAIS E NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA..... 33

2.6 REFERÊNCIAS..... 36

3 EFEITO DA BIOMASSA CARBONIZADA NA FERTILIDADE DO SOLO E NA RESPOSTA FISIOLÓGICA DA SOJA (*Glycine max*) NO CERRADO..... 42

RESUMO..... 42

ABSTRACT..... 43

3.1 INTRODUÇÃO..... 43

3.2 MATERIAL E MÉTODOS..... 45

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 50

3.3.1 **Análise exploratória do efeito dos tratamentos sobre a fertilidade do solo e os dados fisiológicos das plantas**..... 50

3.3.2 **Efeito do carvão vegetal nas propriedades de fertilidade do solo no 1° ano**..... 58

3.3.3 **Efeito do carvão vegetal nas propriedades de fertilidade do solo no 3° ano**..... 65

3.3.4 **Efeito do carvão vegetal no desenvolvimento e produtividade da soja** 69

3.4 CONCLUSÕES..... 76

3.5 REFERÊNCIAS..... 76

4 O EFEITO DO CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTO NA CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS, NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO E NA EMISSÃO DE N_2O..... 80

RESUMO..... 80

ABSTRACT..... 81

4.1 INTRODUÇÃO..... 81

4.2 MATERIAL E MÉTODOS..... 84

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 89

4.3.1 **Análise exploratória do efeito dos tratamentos sobre os dados fisiológicos das plantas, fertilidade e biologia do solo**..... 89

4.3.2 **Efeito do carvão vegetal e adubação mineral na fertilidade do solo**..... 95

4.3.3 **Efeito do carvão vegetal no desenvolvimento e produtividade do arroz**..... 102

4.3.4 **Eficiência agronômica do uso do nitrogênio, fósforo e potássio**..... 108

4.3.5 **Efeito do carvão vegetal na Respiração e Carbono da Biomassa Microbiana**..... 110

4.3.6 **Efeito da biomassa carbonizada (carvão vegetal) na emissão de óxido nitroso (N2O)**..... 113

4.4 CONCLUSÕES..... 117

4.5 REFERÊNCIAS..... 117

5 CONCLUSÕES GERAIS..... 125

APÊNDICES..... 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição elementar (valores totais) do carvão vegetal utilizado no experimento.....	47
Tabela 3.2	Coordenadas (carregamentos) dos fatores dos variáveis, em base de correlações no 1º e 3° ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (safras 2006/2007 e 2008/2009).....	52
Tabela 3.3	Médias das variáveis de fisiologia e fertilidade do solo (0-20 cm) por agrupamento e média geral de todas as amostras, safra 2006/2007, em Nova Xavantina, MT.....	54
Tabela 3.4	Coordenadas (carregamentos) dos fatores dos variáveis de fisiologia e da fertilidade do solo analisadas em conjunto, em base de correlações no 1º e 3° ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (safras 2006/2007 e 2008/2009).....	56
Tabela 3.5	Médias das variáveis de fisiologia e fertilidade do solo (0-20 cm) por agrupamento e média geral de todas as amostras, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT.....	58
Tabela 3.6	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm, cultivado com soja na safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	59
Tabela 3.7	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm, cultivado com soja na safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	59
Tabela 3.8	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm, cultivado com soja na safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	60
Tabela 3.9	Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	61
Tabela 3.10	Atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	61
Tabela 3.11	Atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	61
Tabela 3.12	Atributos químicos do solo em diferentes profundidades em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	64
Tabela 3.13	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm, cultivado com soja na safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	65

Tabela 3.14	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm, cultivado com soja na safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	66
Tabela 3.15	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm, cultivado com soja na safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	66
Tabela 3.16	Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	67
Tabela 3.17	Atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	67
Tabela 3.18	Atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	68
Tabela 3.19	Teores de potássio no solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	69
Tabela 3.20	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na produtividade e fisiologia da soja, safra 2006/2007, em Nova Xavantina, MT.....	70
Tabela 3.21	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na produtividade e fisiologia da soja, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT.....	70
Tabela 3.22	Produtividade, altura das plantas e matéria seca da soja em função das doses de carvão, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	72
Tabela 3.23	Teor foliar dos nutrientes em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.....	72
Tabela 3.24	Produtividade, altura das plantas e matéria seca da soja em função das doses de carvão, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	72
Tabela 4.1	Composição elementar (valores extraíveis) do carvão vegetal utilizado no experimento.....	85
Tabela 4.2	Correlação entre as variáveis fisiológicas e as doses de adubo mineral (NPK) e carvão vegetal (CARVÃO).....	91
Tabela 4.3	Coordenadas (carregamentos) dos fatores dos variáveis, em base de correlações.....	91
Tabela 4.4	Correlação entre as variáveis de fertilidade do solo (0-20 cm) e as doses de adubo mineral (NPK) e carvão vegetal (CARVÃO).....	93

Tabela 4.5	Correlação entre as variáveis da biologia do solo (0-10 cm) e as doses de adubo mineral (NPK) e carvão vegetal (CARVÃO).....	95
Tabela 4.6	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	96
Tabela 4.7	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	96
Tabela 4.8	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	97
Tabela 4.9	Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	98
Tabela 4.10	Atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	98
Tabela 4.11	Atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm em função das doses de carvão aplicadas, SAFRA 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	99
Tabela 4.12	Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	99
Tabela 4.13	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na produtividade e fisiologia do arroz, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT.....	103
Tabela 4.14	Produtividade, altura e matéria seca do arroz, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT.....	104
Tabela 4.15	Produtividade e altura em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicadas, em Nova Xavantina, MT.....	107
Tabela 4.16	Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na eficiência agronômica, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT	108
Tabela 4.17	Eficiência agronômica da aplicação de N, P e K em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	109
Tabela 4.18	Análise de variância (valores de F) para Respiração e Biomassa Microbiana no solo na profundidade de 0-10 cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	111
Tabela 4.19	Respiração e Biomassa Microbiana no solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.....	111

Tabela 4.20 Respiração e Biomassa Microbiana no solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT..... 113

Tabela 4.21 Emissões totais do gás óxido nitroso (N_2O) durante o ciclo completo (113 dias) da cultura do arroz de terras altas. F=11,34; CV=37,94%, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT..... 115

Tabela 4.22 Fluxos de N_2O observados em estudos realizados no Brasil (Adaptado de Costa et al. (2009))..... 116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fotomicrografia eletrônica da estrutura de um carvão vegetal..... 26

Figura 2.2 Fotomicrografia eletrônica mostrando poros de um carvão vegetal 27

Figura 2.3 Diagrama de análise hierárquica usando dados de fertilidade de Terras Pretas de Índio e de solos não antrópicos da Amazônia. Fonte: adaptado de Madari et al. (2003)..... 30

Figura 3.1 Espectro de ^{13}C RMN (VACP-TOSS) de amostra do carvão vegetal utilizado no experimento..... 48

Figura 3.2 Precipitação (mm) e temperatura média (ºC) ocorrida em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento. Cada data de amostragem refere-se a média de três dias de coleta. Os dados de temperatura foram coletados na estação experimental do Inmet em Nova Xavantina-MT e a pluviosidade na sede da propriedade onde se realizou e experimento, utilizando-se o pluviômetro tipo cunha HD 306..... 50

Figura 3.3 Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento no 1º (A) e 3° (B) ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (resultados da safra 2006/2007 e 2008/2009). ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja. ALT e MS são variáveis ativas, NPK e CARVÃO variáveis suplementares..... 51

Figura 3.4 Projeção dos dados no biplot dos fatores 1 e 2 do experimento no 1º (A) e 3° (B) ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (resultados da safra 2006/2007 e 2008/2009). 0: 0 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 2: 2 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 4: 4 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 8: 8 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 16: 16 Mg ha^{-1} carvão vegetal..... 52

Figura 3.5 Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento no 1º (A) e 3° (B) ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (resultados da safra 2006/2007 e 2008/2009) da análise combinada de variáveis fisiológicas (ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm). NPK e CARVÃO são variáveis suplementares..... 53

Figura 3.6 Teor de carbono no solo (0-10 cm) em função de diferentes doses de carvão pirogênico, safra 2006/2007..... 62

Figura 3.7 Produtividade, altura (V4 e R1) e matéria seca (V4 e R1) da soja em função de diferentes doses de carvão, ano 1, safra 2006/2007 em Nova Xavantina-MT..... 74

Figura 3.8 Produtividade, altura (V4 e R1) e matéria seca (V4 e R1) da soja em função de diferentes doses de carvão, ano 3, safra 2008/2009 em Nova Xavantina-MT..... 75

Figura 4.1 Espectro de ^{13}C RMN (VACP-TOSS) de amostra do carvão vegetal utilizado no experimento..... 86

Figura 4.2 Precipitação (mm) e temperatura média (ºC) ocorrida em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento. Cada data de amostragem refere-se a média de três dias de coleta. Os dados de temperatura foram coletados na estação experimental do Inmet em Nova Xavantina-MT e a pluviosidade na sede da propriedade onde se realizou e experimento, utilizando-se o pluviômetro tipo cunha HD 306..... 88

Figura 4.3 Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento. ALT1, ALT2, ALT3, ALT4 e MS1, MS2, MS3, MS4 são a altura (cm) e a massa seca (g 10 plantas^{-1}) das plantas aos 25, 40, 55 e 70 dias após plantio, respectivamente. PROD: produtividade da soja. ALT1 a 4 e MS1 a 4 são variáveis ativos, NPK e CARVÃO variáveis suplementares..... 90

Figura 4.4 Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento da análise da fertilidade do solo (0-20 cm) em conjunto com os dados fisiológicos. ALT1, ALT2, ALT3, ALT4 e MS1, MS2, MS3, MS4 são a altura (cm) e a massa seca (g 10 plantas^{-1}) das plantas aos 25, 40, 55 e 70 dias após plantio, respectivamente. PROD: produtividade da soja. ALT1 a 4 e MS1 a 4 são variáveis ativas, NPK e CARVÃO variáveis suplementares..... 92

Figura 4.5 Projeção dos dados de fertilidade do solo (0-20 cm) no biplot dos fatores 1 e 2 do experimento. 0: 0 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 8: 8 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 16: 16 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 32: 32 Mg ha^{-1} carvão vegetal..... 94

Figura 4.6 Gráfico das duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento em base das variáveis biológicos do solo. CBM: carbono da biomassa microbiana, CCO2: respiração basal, COT: carbono orgânico total (C), NT: nitrogênio total, CWB: carbono medido pelo método Walkley-Black (carbono oxidável), C:N: relação COT e NT. NPK e CARVÃO são variáveis suplementares 95

Figura 4.7 Produtividade do arroz em função de diferentes doses de carvão, safra 2008/2009 em Nova Xavantina-MT..... 106

Figura 4.8 Fluxos do gás de efeito estufa óxido nitroso (N_2O) durante o ciclo inteiro da cultura do arroz de terras altas. As doses de N foram fixos a 111 kg N ha^{-1} durante todo o ciclo da cultura distribuídos em duas partes, aproximadamente 50% logo antes da semeadura e 50% em cobertura, na forma de uréia. Testemunha: parcelas sem N e sem carvão para o cálculo do fator de emissão; dose 0: 0 Mg ha^{-1} carvão vegetal; dose 8: 8 Mg ha^{-1} carvão vegetal; dose 16: Mg ha^{-1} carvão vegetal; dose 32: Mg ha^{-1} carvão vegetal; Pasto: pastagem original (na condição de antes da instalação do experimento)..... 114

RESUMO GERAL

PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condiciondor de solo: aspectos agronômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado**. 2010. 130 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Produção Vegetal) – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.[1]

Estudou-se o efeito do carbono pirogênico nas características químicas e biológicas do solo, na fisiologia e produtividade das culturas da soja e do arroz de terras altas e na emissão de N_2O para a atmosfera. Os experimentos foram realizados em Nova Xavantina, MT, em dois diferentes tipos solos: Latossolo Vermelho Amarelo (soja) e Cambissolo Háplico (arroz) em delineamento experimental com junção de faixas e blocos ao acaso, em que 5 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1}) de NPK (0-20-20) e 5 doses de carvão vegetal (0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}), no caso da soja, e 4 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1} e 300 kg ha^{-1}) de NPK (05-25-15) e 4 doses de carvão (0 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1}), no caso do arroz, foram aplicadas, para o carvão ao acaso, em 4 repetições (blocos). Combinado com NPK na cultura do arroz foi realizada aplicação de 0, 15, 32 e 50 kg ha^{-1} de N em cobertura, respectivamente. Para avaliação de fertilidade do solo foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm e analisados os seguintes atributos: pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, M.O., C orgânico e N total. Os parâmetros fisiológicos avaliados foram: altura, matéria seca, teor foliar dos nutrientes P, K, Ca e Mg, Fe, Cu, Zn e Mn em pleno florescimento e produtividade. A avaliação dos parâmetros biológicos do solo consistiu na determinação da taxa de respiração basal do solo ($C\text{-}CO_2$) e carbono da biomassa microbiana (CBM). Foi avaliado a emissão de N_2O para a atmosfera. Na cultura da soja houve aumento significativo nos teores de C total de 0-10 cm no 1° ano e 10-20 cm no 3° ano com a aplicação de 16 Mg ha^{-1}de carvão. Verificou-se efeito na interação carvão e NPK, com aumento de K e na camada de 0-10 cm no 1° e 3° ano e acidez potencial apenas no 1° ano. As doses de 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1} proporcionaram maiores alturas e massa seca nas épocas avaliadas. Não se verificou efeito nos teores foliares de nutrientes. A produtividade foi significativamente aumentada em razão da aplicação de 16 Mg ha^{-1}. Na cultura do arroz houve aumento significativo nos teores de P e Ca e no pH e redução de Al e H+Al na camada de 0-10 cm com a aplicação de 32 Mg ha^{-1}de carvão. Esse efeito se repetiu para H+Al na camada de 10-20 cm e com aumento nos teores de K. Verificou-se efeito negativo do carvão na matéria seca aos 25 e 55 DAP, todavia não influenciou a altura das plantas. A produtividade foi aumentada à medida que se aumentou as doses de carvão. Observou-se maior eficiência no uso do N, P e K na dose de 32 Mg ha^{-1}. Não se verificou efeito significativo do carvão no $C\text{-}CO_2$ e CBM. Observou-se os maiores fluxos de N_2O para a atmosfera na presença de 32 Mg ha^{-1}. Como conclusão geral, o carvão vegetal teve efeito similar nas propriedades de fertilidade do solo e produtividade das plantas nos dois experimentos, entretanto seu efeito foi mais fortemente manifestado (maior contraste) no solo mais arenoso. Aumentou ainda a eficiência de uso de nutrientes. Considerando a altura das plantas e a massa seca a soja apresentou melhor resposta para a aplicação de carvão no solo. Finalmente, o carvão

[1] Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro. EA-UFG.
Co-orientador: Dr(a). Beáta Emöke Madari. Embrapa Arroz e Feijão.

vegetal manteve seu efeito na produtividade e aumentou a acumulação da M.O. no solo com o passar do tempo.

Palavras-chave: Biochar, fertilidade do solo, matéria orgânica, propriedades biológicas do solo, óxido nitroso, uso eficiente de nutrientes.

GENERAL ABSTRACT

PETTER, F. A. **Biochar as soil amendment: agronomic and environmental aspects of its application in soils of the Brazilian savana (cerrado).** 2010. 130 f. Thesis (PhD in Agronomy: Plant Production) – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.[1]

The effect of biochar on the chemical and biological soil properties, on the physiological response and productivity of soybean and upland Rice and on N_2O emission was investigated. The study was carried out in Nova Xavantina, Mato Grosso state between September 2006 and May 2009 on two different soil types: Haplic Ferralsol (soybean) and Dystric Cambisol (rice). The experimental design was a combination of strips and random blocks where 5 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1}) of NPK (0-20-20) were distributed in strips and 5 doses of biochar (0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}) in random a manner in the case of soybean and 4 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1} and 300 kg ha^{-1}) of NPK (05-25-15) were distributed in strips and 4 doses of biochar (0 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1} and 32 Mg ha^{-1}) in random a manner in the case of rice. For rice urea was applied as top dressing corresponding the NPK doses: 0 kg ha^{-1}, 15 kg ha^{-1}, 32 kg ha^{-1} e 50 kg ha^{-1} de N, respectively. Every treatment had 4 replications. The biochar was applied only once, before the instalation of the experiments to the 0-15 cm soil layer. Soil fertility parameters were evaluated in samples collected at 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm and pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, SOM and total C and N were measured. Among physiological parameters the height and dry mass of plants were evaluated plus the nutrient levels in plant tissue at flowering and yield. The evaluation of soil biological parameters included the basal respiration rate of the soil ($C\text{-}CO_2$) and the microbial biomass carbon (MBC). Nitrous oxide (N_2O) emissions were also measured. Total C was significantly higher at 0-10 cm in the 1st year after biochar application and at 10-20 cm in the 3rd year in the treatment with 16 Mg ha^{-1} biochar. There was interaction between biochar and NPK, resulting in increase in K levels at 0-10 cm, 1st and 3rd year after application of biochar and decrease in exchangeable acidity in the 1st year. The 8 Mg ha^{-1} and 16 Mg ha^{-1} biochar doses resulted in higher values of plant height and dry mass both in the 1st and 3rd year, however, biochar had no effect on nutrient levels in plant tissue. Soybean yields were, again, significantly affected by biochar doses in a positive and quadratic manner both in the 1st and 3rd year. There was a significant increase in P, Ca, levels and pH, and Al and exchangeable acidity (H+Al) were reduced at 0-10 cm in the treatments with 32 Mg ha^{-1} biochar. Similar effect was observed for (H+Al) and K at 10-20 cm. Biochar had no effect on other soil chemical parameters. It negatively affected the dry mass of the plants at 25 and 55 DAP, however, did not have influence on plant height. Rice yield was directly and linearly influenced by biochar doses. Increase in nutrient use efficiency (N, P, K) was also observed at the highest biochar dose (32 Mg ha^{-1}). Biochar had no effect on $C\text{-}CO_2$ and MBC but seu uso resulted in higher emission rates of N_2O at the 32 Mg ha^{-1} dose.

---

[1]Adviser: Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro. EA-UFG.
Co-adviser: Prof. Dr(a). Beáta Emöke Madari. Embrapa Arroz e Feijão.

In conclusion, in general, biochar had similar effects on soil chemical properties and yields, however its effect was manifested in a greater manner (larger contrast) in the more sandy soil. It increased nutrient use efficiency. As of plant height and dry mass, soybean gave better response for biochar application than rice. Finally, biochar seems to maintain its effect on yield and increases its effect on SOM accumulation over time.

Key words: biochar, soil fertility, organic matter, biological properties os soil, nitrous oxide, efficient use of nutrients.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A intensificação da produção agrícola em grande escala tem assegurado o suprimento de alimentos a uma população que cresce a um nível exponencial. A ação antrópica para produzir alimentos tem gerado inúmeros conflitos entre a cadeia produtiva e a sociedade, que na maioria das vezes é representada por organizações. Devido o crescimento populacional, aumentou-se a demanda por alimentos e, conseqüentemente, as áreas a serem cultivadas, porem em muitos dos casos essa intensa ação antrópica gerou uma degradação do meio ambiente, incluindo-se aí o extrativismo vegetal, devido à falta de planejamento adequado. Gerou-se, com isso, perdas nas camadas mais férteis do solo, chegando essas a 200 Mg ha^{-1} ano^{-1} (Franco & Campello, 2005).

O crescimento da área agricultável, frequentemente, ocorre em áreas de reserva e preservação, onde a derrubada e queima da mata ocasiona perda da fertilidade natural do solo, diminuição da matéria orgânica do solo e liberação de dióxido de carbono (CO_2) e outros gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global. Extensas áreas de pastagens degradadas poderiam ser utilizadas para o fim de se produzir alimentos, contudo devido à baixa fertilidade desses solos, os agricultores preferem abrir novas áreas. Nos solos de cerrado, como os Latossolos, Neossolos, Argissolos, na maioria das vezes a fertilidade do solo restringe-se a camada mais superficial do solo e a perda de matéria orgânica (M.O.) dessa camada reduz o potencial produtivo desses solos.

Segundo estimativas, a matéria orgânica do solo tem três vezes mais carbono do que a existente em toda a biomassa vegetal terrestre (Batjes, 1996) e as emissões de CO_2 do solo, pela ação antrópica, somam aproximadamente 25% das emissões do CO_2 do planeta (Bouwmann & Germon, 1998). A matéria orgânica é de grande importância para as propriedades químicas e físicas dos solos de cerrado, contribuindo em até 80% da capacidade de troca catiônica (CTC) do solo. Entretanto, nesse bioma a taxa de mineralização da M.O. atinge altos níveis na decomposição desses resíduos, em razão da elevada temperatura e atividade microbiológica, reduzindo a quantidade desses compostos

no solo (Torres et al., 2005). Diante disso, a incorporação de matéria orgânica e a manutenção dos seus níveis no solo contribuem para a fixação de carbono e redução do efeito estufa e, não menos importante, para a manutenção da fertilidade.

Novos sistemas e novas tecnologias de produção, que sejam adequadas para as diferentes condições ambientais, aliando a produção de alimentos com a preservação da biodiversidade do solo e da água e ainda contribuindo para o seqüestro do excesso de carbono na atmosfera, podem contribuir para a redução dos problemas anteriormente citados. A fixação de carbono no solo pode ser feita utilizando-se o chamado biochar (biomassa carbonizada), que pode ser produto ou subproduto de diferentes processos de pirólise. Entre esses estão a produção de bio-diesel ou bio-óleos que são fontes de energia renovável. Outra fonte pode ser o próprio carvão vegetal utilizado pela indústria metalúrgica em substituição ao carvão mineral para a produção de ferro gusa. No processo de carbonização é gerado um subproduto, o fino de carvão (pedaços de carvão menores que 8 mm) que não é utilizável pela indústria metalúrgica.

A produção de carvão vegetal a partir de florestas plantadas (florestas energéticas) é reconhecida como um mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). Outro exemplo é a produção de energia térmica e elétrica a partir de fontes alternativas como, por exemplo, de casca de arroz, que é um subproduto em excesso do beneficiamento do arroz, ou tortas da produção de etanol ou açúcar. Esses subprodutos atualmente estão sendo utilizados, através de queima, para a geração de energia térmica ou elétrica para a secagem de grãos ou para o próprio funcionamento da usina e são passíveis à obtenção de crédito de carbono dentro dos padrões do Protocolo de Quioto. No futuro essa energia, com o uso de tecnologia adequada, poderá ser gerada através de um processo de pirólise ou esses materiais poderão ser utilizados como matéria prima para a produção de bio-óleos que por sua vez resulta como subproduto o biochar. Atualmente, a produção de biomassa carbonizada, em vários países como a Austrália e outros com solos altamente intemperizados, típicos de clima tropical, está sendo considerada como objetivo e produto principal de tais processos industriais.

O carvão vegetal, oriundo da carbonização (processo de queima parcial em ambiente controlado e limitado em oxigênio) de materiais ligno-celulósicos (madeira), é uma opção para a produção de carbono pirogênico, quando de forma industrial, sem a liberação do CO_2 e outros gases condensáveis e não condensáveis para a atmosfera, utilizando-se fornos apropriados para tal finalidade. Já existem hoje sistemas fechados e

controlados que permitem a captura e o aproveitamento de subprodutos gerados na carbonização, minimizando assim o efeito maléfico ao meio ambiente. A queima industrial de madeira pode gerar o produto principal (carbono pirogênico), bem como subprodutos como o ácido pirolenhoso e o alcatrão, sendo esses utilizados em indústrias químicas.

O uso do carbono pirogênico ou carvão vegetal pode ser uma alternativa para o aumento da produção de biomassa e de grãos em áreas de pastagens degradadas, diminuindo assim o aumento do plantio em áreas de reserva e preservação. Devido a algumas características do carvão como, reatividade, tempo de degradação, estrutura química da molécula, a qual apresenta uma estrutura basicamente aromática, superfície especifica grande, hidrofobicidade entre outras, faz com que este material seja considerado relativamente inerte no solo e de alta estabilidade, o que pode contribuir para a melhoria das características químicas, físico-hídricas e conseqüentemente biológicas (Madari et al., 2009; Cunha et al., 2009). Essa contribuição pode aumentar a produtividade das culturas, resultando em uma maior liquidez para o agricultor, aumento da recuperação das áreas degradadas, utilização eficiente da água e solo e uma preservação da biodiversidade dos nossos ecossistemas.

Diante disso, este estudo teve por objetivo elucidar o comportamento dos atributos químicos e biológicos do solo e do desenvolvimento e produtividade de duas culturas de grãos, soja e arroz de terras altas, e emissão de gás de efeito estufa (N_2O), quando submetido a doses de carvão vegetal, em combinação com doses de adubo mineral. Esta técnica pode no futuro proporcionar ao agricultor mais uma alternativa para o desenvolvimento sustentável da produção agrícola.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARVÃO VEGETAL NO SOLO

Na maioria dos solos são encontrados pequenos fragmentos de carvão vegetal, uma forma de carbono pirogênico ou *black carbon*, resultante de queimas naturais ou da ação do homem.

Carvões geralmente são reportados como materiais pouco reativos (inertes), hidrofóbicos e, devido à sua porosidade, apresentam elevada área superficial (200 $m^2 g^{-1}$ - 400 $m^2 g^{-1}$), (Kishimoto & Sugira, 1985). Entretanto, a reatividade e a hidrofobicidade dos carvões dependem, assim como sua estrutura, do material de origem e das condições de sua formação como, a temperatura e tempo de queima, umidade do material vegetal, disponibilidade de oxigênio, entre outros. Os carvões, embora possam ser considerados estáveis no sistema solo, comparados às outras formas da matéria orgânica, também sofrem biodegradação e transformação. Bird et al. (1999) sugeriram que o carbono pirogênico pode ser significantemente degradado dentro da escala de tempo de décadas ou séculos em solos sob clima subtropical. Estimam que a meia-vida de partículas carbonizadas com tamanho >2 mm foi estimada em menos de cem anos, e a de partículas <2 mm em menos de cinquenta anos.

No solo, o carbono pirogênico é uma das frações com a maior média de vida dentre todas as frações contendo carbono (Pessenda et al., 2004). Frações contendo carbono pirogênico são encontradas nas Terras Pretas de Índio na Amazônia em grandes quantidades e com idades definidas através do método de radiocarbono que variam de 500-7000 anos (Neves et al., 2003). Nesse sentido, fica evidente a longevidade desse material no solo, no entanto, a taxa quantitativa de decomposição ainda precisa ser avaliada com metodologias que forneçam dados mais precisos.

O entendimento da decomposição do carbono pirogênico no solo é de fundamental importância para seu uso como condicionante de solo, visando o seqüestro de carbono da atmosfera. A permanência no solo sem sofrer, a longo prazo, alterações em sua

estrutura, pode contribuir para a diminuição da emissão de CO_2. Segundo Wardle et al. (2008) após a incorporação de carbono pirogênico oriundo de floresta tropical, não se verificou perdas de massa nos primeiros dez anos, já Brodowski (2004) relatou perdas de 16% e 51% para carbono de biomassa não carbonizada oriundo de milho e centeio respectivamente. Esses dados comprovam que a perda de carbono da biomassa de plantas não carbonizadas em ambientes oxidativos é maior, contribuindo para a diminuição do tempo de permanência do carbono no solo considerando-se o ciclo global do mesmo, o que implica em uma maior taxa de emissão de CO_2 para a atmosfera. Contudo, a degradação e emissão de carbono de forma mais lenta se faz necessária do ponto de vista ambiental.

A biomassa carbonizada, entretanto, também sofre alterações e decomposição no solo, embora numa taxa muito menor. A degradação do carvão faz com que esse material também faça parte do ciclo global do carbono. Do contrário, implicaria no acúmulo de C nessa forma em grandes quantidades na superfície da terra em menos de mil séculos (Kuhlbusch & Crutzen, 1995 in Glaser et al., 2002).

A biodegradação de carvões no solo é um processo relativamente lento que resulta na mobilização do carbono e na alteração das propriedades de superfície do carvão, aumentando a concentração de sítios quimicamente reativos, que podem ser ligados a vários nutrientes do solo.

Estudos recentes (Lehmann et al., 2003; Lehmann et al., 2003a) apontaram a eficiência do carvão vegetal em aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, a formação de biomassa (matéria seca das plantas) e em geral o potencial produtivo do solo. Com o aumento da disponibilidade de nutrientes espera-se maior produção de biomassa das plantas e conseqüentemente maior fixação do CO_2 atmosférico através da fotossíntese.

2.2 PRODUÇÃO DO CARVÃO VEGETAL OU BIOMASSA CARBONIZADA

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal no mundo, contribuindo com 38,5% da produção mundial (Benites et al., 2007). A produção de carvão vegetal a partir de florestas plantadas com eucalipto (*Eucaliptus* sp.) no Brasil é significativa para utilização na indústria metalúrgica, e esse processo está inserido no contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do protocolo de Quioto (Machado, 2003). No processo tradicional de carbonização aproximadamente 35% do carbono da madeira é fixado no carvão vegetal e o restante é emitido no ambiente na forma de fumaça e gases

não condensáveis (CO_2, CO, CH_4 etc.). Entretanto, há tecnologias que são capazes de recuperar esses subprodutos da carbonização, na forma de gases condensados, em até 50% desse carbono perdido, minimizando a poluição do meio ambiente.

A produção de carvão vegetal quando oriundo de material vegetal carbonizado em ambiente controlado, será de agora em diante tratado como *biochar*, uma vez que o interesse desse estudo relaciona-se com suas propriedades capazes de alterar atributos químicos, físicos e biológicos do solo visando a obtenção de um ambiente propício ao bom desenvolvimento das plantas e contribuição ambiental do ponto de vista da redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e fixação do carbono no solo.

Portanto, o biochar aqui relatado é um material rico em carbono (C), oriundo da queima de material vegetal (pirólise da madeira, por exemplo) em ambiente controlado, com baixas ou nenhuma concentração de oxigênio (O_2) e em temperaturas relativamente baixas (< 700 °C) (Lehman & Joseph, 2009).

A quantidade de carvão produzido pela queima depende do material de origem, da temperatura e tempo de queima. Durante a pirólise do material vegetal, uma grande quantidade de massa é perdida principalmente na forma de compostos orgânicos voláteis (CO, CO_2, CH_4) e H_2O resultando em uma redução considerável do volume inicial. No entanto, durante a conversão térmica, os minerais e esqueletos de carbono ajudam a manter a estrutura rudimentar e porosidade do material original (Wildman et al., 1991). Quanto mais alta for a temperatura (> 700 °C) de carbonização maior será a perda de C na forma de compostos voláteis, uma vez que compostos vegetais tais como hemicelulose, celulose e lignina são degradados. Segundo Sjöström (1993), as hemiceluloses são degradadas em temperaturas de 200-260 °C, celuloses 240-350 °C e lignina entre 280-500 °C.

Fearnside et al. (1999) relataram que a produção de carvão de queima natural de floresta secundária na Amazônia foi entre 1,6% e 1,8 % da biomassa vegetal original. A queima de floresta primária resultou em 3,5-4,7 % de carvão (Fearnside et al., 1993; Graça, 1999). Trompowsky et al. (2005), em condições controladas, demonstraram que duas espécies de eucalipto, *E. saligna* e *E. grandis*, tiveram uma máxima produção de carvão, chegando a 56%, a temperatura de carbonização de 300°C. Nesse mesmo estudo, também, se observou que a razão O/C era maior (0,3) para a temperatura de 300°C e, com o aumento da temperatura até 500°C, essa razão diminuiu para 0,06, resultando num material que continha carbono em 90% da sua massa. A presença de oxigênio numa maior proporção pode indicar maior reatividade do carvão analisado.

O carbono orgânico contido no biochar é constituído em sua maior parte de estruturas aromáticas, caracterizadas pela ligação em forma de anel benzênico de átomos de C com oxigênio (O) ou hidrogênio (H) (Lehman & Joseph, 2009). Essas ligações entre C-O e C-H, governam as estruturas aromáticas estáveis do biochar, sendo utilizadas para medir o grau de aromaticidade dos compostos (Braadbaart et al., 2004; Hammes et al., 2006). Geralmente razões O/C abaixo de 0,3 indicam alto grau de aromaticidade, o que corrobora com a premissa de se carbonizar a matéria prima em ambiente com baixas concentrações de oxigênio, para se obter um biochar com alta concentração de C.

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E ORGANOQUÍMICAS DO BIOCHAR

A maioria dos trabalhos relacionados à pirólise de materiais vegetais referem-se a produção de carvão ativado, visando seu uso como adsorventes em processos de separação e purificação de gases, líquidos e compostos sólidos. Todavia os custos de produção dos carvões ativados são relativamente altos, o que torna inviável seu uso como condicionante de solo em sistemas agrícolas. Carvão ativado é conhecido como biomassa carbonizada geralmente a 800-1000 °C em um ambiente controlado nas concentrações de oxigênio. O material é cuidadosamente carbonizado para que não ocorra sua queima total e assim diminuindo a quantidade de poros. Contudo muito das informações sobre a produção e o comportamento do carvão ativado serve como base de informação para o uso de biochar, uma vez que as características físicas são semelhantes, principalmente na sua principal função que é a de adsorver compostos líquidos, sólidos e gasosos.

A temperatura de carbonização é o fator que mais exerce influência sobre as propriedades físicas do biochar. A combustão da madeira leva a uma perda de massa em volume na forma de compostos voláteis, que incluem a perda do “suco celular”, hemicelulose, celulose e lignina, formando compostos com alto teor de carbono (Downie et al., 2009). Com a perda desses compostos há formação de macro, meso e microporos, que contribuem para o aumento da área de superfície específica do biochar. Geralmente a área de superfície específica do biochar aumenta com o aumento de temperatura até certo ponto (Brown et al., 2006), todavia em altas temperaturas (> 1000 °C) essas pilhas grafitadas sofrem um “derretimento”, uma espécie de fusão, e conseqüentemente perda de carbono e atributos físicos desejáveis, como a porosidade.

O biochar em um primeiro momento pode ser recalcitrante devido o preenchimento dos espaços porosos por compostos condensados de alcatrão e outros produtos da decomposição, no entanto, com o aquecimento esses compostos tornam-se voláteis e liberam os espaços porosos.

A porosidade do biochar pode ser dividida em micro, meso e macroporos (Figuras 2.1 e 2.2) com diâmetro de < 2nm, 2-50 nm e > 50 nm respectivamente (Rouquerol et al., 1999). Os microporos apresentam função mais relacionada à adsorção de gases, enquanto os mesoporos estão associados à adsorção de líquidos e compostos sólidos. Já, os macroporos são importantes alimentadores de poros de menor diâmetro, auxiliando no transporte de moléculas concentradas para o meso e microporos (Wildman et al., 1991), mas são também relevantes para o movimento de raízes através do solo e como habitat para uma grande variedade de microrganismos do solo.

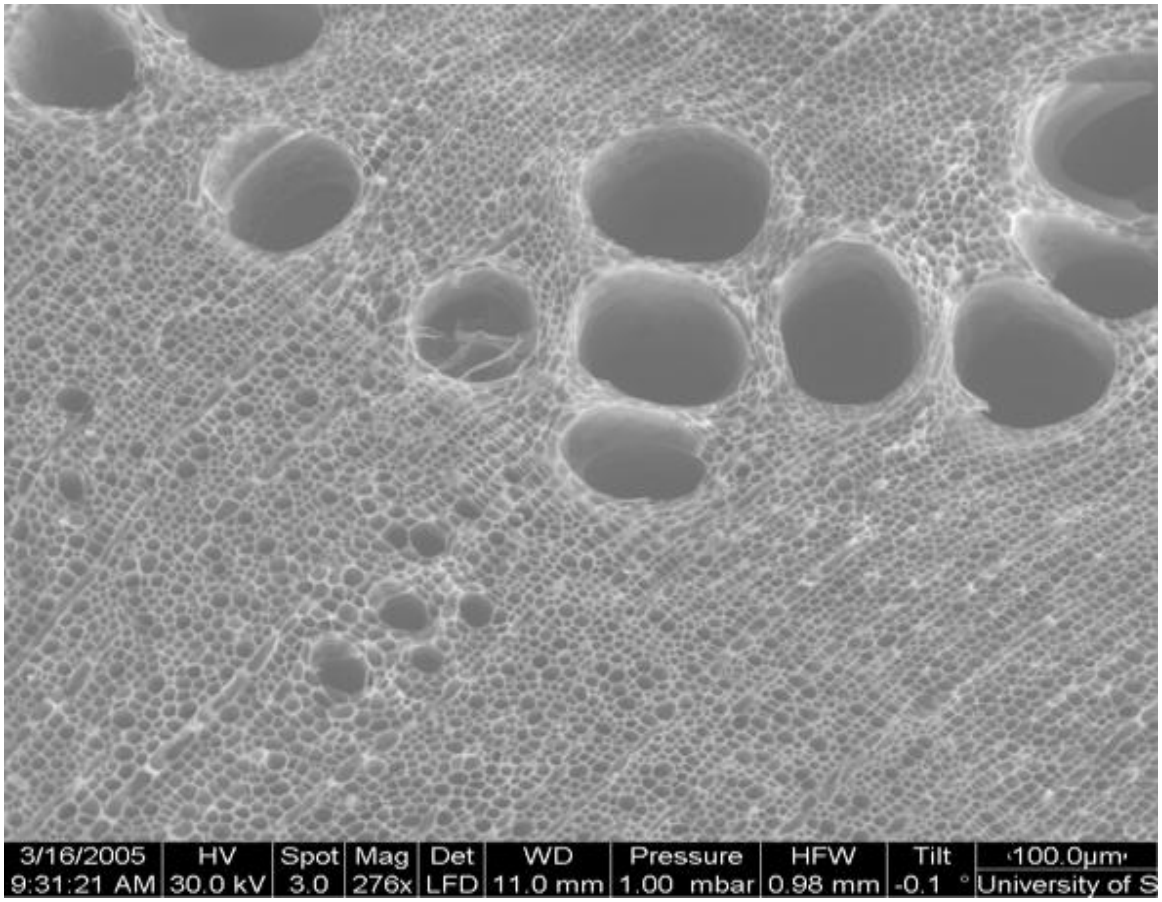

Figura 2.1. Fotomicrografia eletrônica da estrutura de um carvão vegetal (Leij et al., 2005).

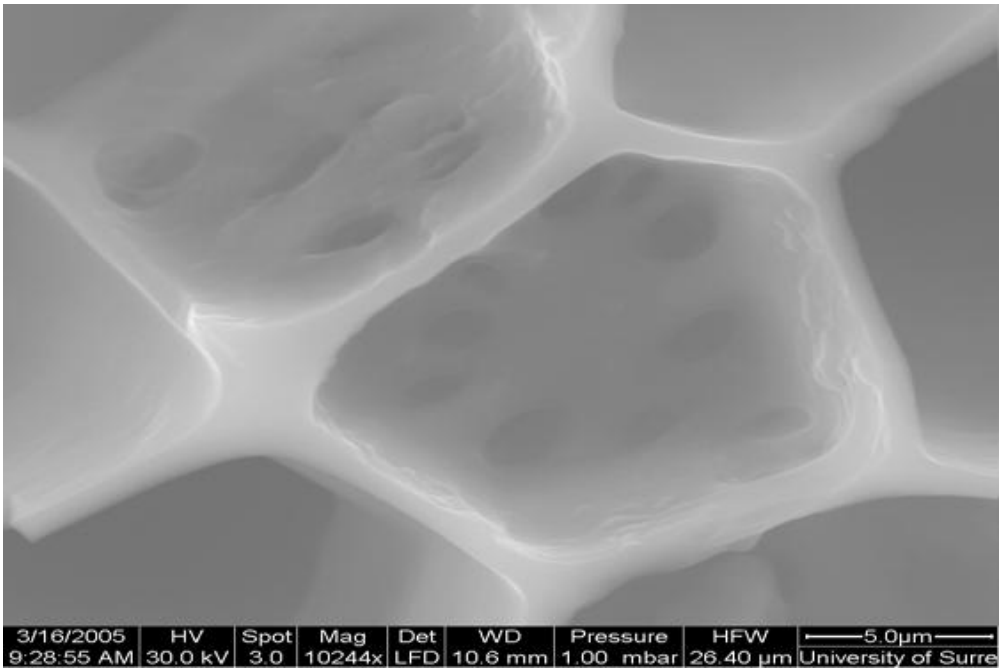

Figura 2.2. Fotomicrografia eletrônica do poro de um carvão vegetal (Leij et al., 2005).

A densidade do biochar também é uma característica física importante. Pastor-Villegas et al. (2006) constataram que a massa específica de biochar feito a partir de diferentes tipos de madeiras transformadas em diferentes tipos de fornos tradicionais variou de 0,43 g cm^{-3} a 0,30 g cm^{-3}. A resistência mecânica de biochars está relacionada à sua densidade de massa e é uma característica usada para definir a qualidade do carvão ativado, no que se refere à sua capacidade de resistir ao desgaste durante o uso e o mesmo pode ser atribuído ao biochar (Aygun et al., 2003). A porosidade do biochar é responsável pela maior parte das superfícies de cargas reativas. Estas estruturas periféricas reativas podem ser hidrofílicas, hidrofóbicas, altamente ou parcialmente reativas, sendo essa variação em função da eletronegatividade de grupos funcionais que se ligam ao carbono das estruturas aromáticas, tais como OH, NH_2, OR, ou O (C=O)R, o que gera uma heterogeneidade química de superfície (Brennan et al., 2001).

Em estudos com diferentes temperaturas de carbonização Baldock & Smernik (2002) verificaram que o aumento de temperatura de 150 °C para 250 °C diminuiu a razão O/C, resultando em uma perda relativa de H e O, indicando a formação de estruturas contendo C insaturado de forma aromática.

Através do uso da tecnologia de espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN) é possível identificar a variação de compostos em diferentes temperaturas de carbonização, através de sinais espectrais emitidos por suas estruturas. Krull et al.

(2003) verificaram que a 200 °C a intensidade do sinal associado com as estruturas de celulose e hemicelulose (carbohidratos) diminuiu, enquanto a intensidade do sinal da lignina aumentou. Tal fato pode ser atribuído a temperatura de degradação da lignina, que é maior em relação à hemicelulose. Essas mudanças de conversão das estruturas refletem nas características químicas do material (Krull et al., 2003). Tais alterações de estruturas levam a uma perda de massa durante as transformações. Baldock & Smernik (2002) relataram perdas de massa de 3%-81% durante o aumento de temperatura de 150 °C para 300 °C.

Diante disso, percebe-se que as características físicas e químicas do biochar como a porosidade, área de superfície específica e cargas eletroquímicas estão intimamente relacionadas com a temperatura de carbonização e das concentrações de O_2.

2.4 BIOCHAR E ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO

Os solos apresentam características próprias distintas quando relacionados com suas propriedades químicas, físicas e biológicas, dependendo da natureza do mineral, da matéria orgânica e da forma com que estes estão associados (Brady & Weil, 2008). No entanto, quando materiais com características distintas estão presentes pode-se ter mudanças no comportamento desse solo, alterando as características anteriormente citadas. A presença de biochar pode contribuir para mudanças significativas nas propriedades físicas do solo, alterando as características do mesmo tais como: textura, estrutura, porosidade e consistência, diâmetro dos poros, distribuição granulométrica, densidade, em função de sua maior área superficial específica (Downie et al., 2009). Segundo esses mesmos autores, a mudança nas características físicas do solo devido a presença de biochar pode resultar em um maior crescimento das plantas, devido a maior disponibilidade de água na zona próxima ao sistema radicular, uma vez que esta é determinada principalmente pela composição física dos horizontes do solo.

O carvão, devido à sua porosidade e, conseqüentemente, a sua alta superfície específica, pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água, especialmente em solos de textura arenosa. Contudo, a estrutura aromática, que tem características hidrofóbicas, pode reduzir a penetração de água nos espaços porosos dos agregados do solo, aumentando assim a estabilidade dos agregados (Glaser et al., 2002).

Todas essas alterações nas propriedades físicas podem levar a mudanças em outras propriedades do solo, principalmente químicas e biológicas, em função do surgimento de sítios quimicamente reativos e habitats de proteção para microorganismos do solo (Brady & Weil, 2008).

A área de superfície específica de um solo é uma característica extremamente importante, influenciando na fertilidade, disponibilidade de água e ar, ciclagem de nutrientes e atividade microbiana. Solos arenosos possuem sua capacidade de armazenamento de água limitada, sendo esta influenciada pela pequena área de superfície especifica das partículas (Troeh et al., 2005).

Como reportado anteriormente, a área de superfície específica do biochar que é de 200-400 m^2 g^{-1}, é comparável a da argila e superior a da areia. Tais parâmetros levam a hipótese de que a presença do biochar em solos arenosos pode suprir de certa forma a limitada disponibilidade de água, baixa capacidade de troca catiônica, disponibilidade de nutrientes e atividade de microorganismos.

A capacidade de troca catiônica está relacionada á área de superfície específica, mas é altamente dependente de sítios quimicamente reativos. Esses sítios vão se formando ao longo dos anos ao passo que partículas são atacadas por microorganismos no solo, alterando as características químicas e físicas do biochar (Cohen-Ofri et al., 2006). Essas alterações segundo estes autores, se dão pelo aumento de cargas elétricas oriundas da oxidação dos compostos bioquímicos, levando a um aumento no número de compostos fenólicos, hidroxílicos, carbonilicos e quinonas e, conseqüentemente, a um aumento no número de cargas negativas resultante da substituição pelas cargas positivas no processo de oxidação. Talvez aí esteja a explicação do aumento da CTC do biochar com o passar dos anos em solos que contem esse material. No Brasil, exemplo do efeito benéfico do carvão (ou carbono pirogênico) para a fertilidade dos solos tropicais são os solos chamados de terra preta de índio (ou terra preta arqueológica), que são solos antrópicos dos povos pré-colombianos da Bacia Amazônica (Kampf & Kern, 2005). Esses solos contêm elevado teor de carbono pirogênico que chega a ser 2,5 vezes maior que o teor desse material em solos adjacentes não antrópicos. Esse carbono (carvão vegetal), que provavelmente se originou de queimas periódicas de lavouras e resíduos da atividade diária previamente carbonizada, foi incorporado ao solo pelo homem e pela atividade biológica no solo durante centenas ou milhares de anos. A Figura 2.3 mostra que, como resultado do manejo do solo indígena que

incluía a incorporação de restos e resíduos carbonizados ao solo, a fertilidade das terras pretas é, geralmente, maior que a dos solos não antrópicos da Região Amazônica.

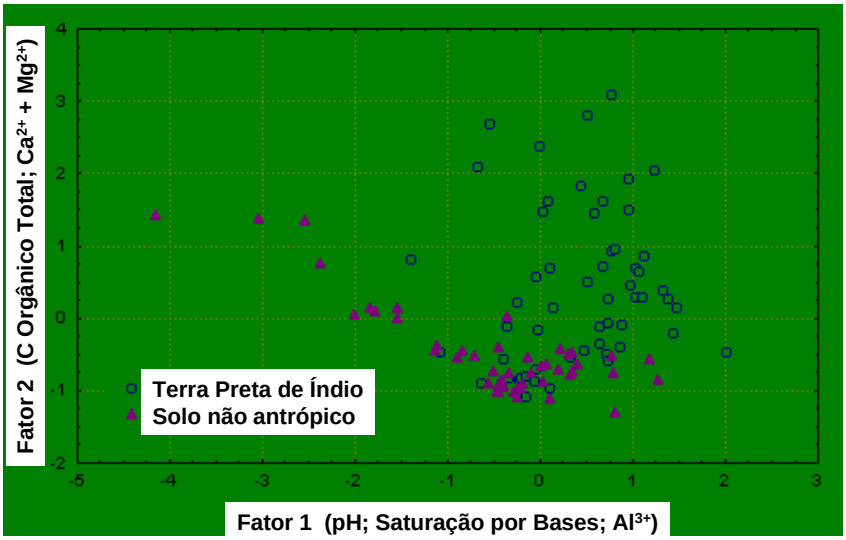

Figura 2.3. Diagrama de análise hierárquica usando dados de fertilidade de Terras Pretas de Índio e de solos não antrópicos da Amazônia. (adaptado de Madari et al., 2003).

Esse efeito benéfico do carvão citado anteriormente levou, provavelmente, centenas de anos para ser consolidado, devido principalmente ao tamanho das partículas de carvão adicionadas ao solo e o tempo de atividade que processos abióticos e bióticos do solo levaram para oxidarem esse material, gerando as características desejáveis, hoje atenuadas, ao mesmo.

Durante a degradação abiótica e biótica do biochar no solo, há uma tendência de aumentar a atividade microbiana sobre o mesmo e conseqüentemente do solo. Apesar de inicialmente a degradação abiótica ser a principal responsável, esta pode contribuir de imediato para o aumento da atividade microbiana, através do aumento de habitat favoráveis e protegidos (Hammes & Schimdt, 2009). Considerando que a biomassa microbiana do solo aumenta com o aumento do teor de argila, seja em campo ou laboratório (Amato, 1992; Juma, 1993; Müller et al., 2004), é de se esperar que o carvão vegetal contribua para esse aumento da biomassa microbiana.

Hamer et al. (2004) investigaram o “priming” interativo de carbono pirogênico e a mineralização de glicose. Segundo esses autores, a mineralização do carbono pirogênico foi estimulada por adição de glicose no solo, e vice-versa, a mineralização da glicose foi estimulada pela presença do carbono pirogênico. Os autores propuseram que o

efeito do material carbonizado ocorreu em razão da maior área superficial para o crescimento e atividade microbiana e não pela disponibilidade de maior quantidade de carbono, pois o carbono pirogênico, sendo altamente aromático, não é prontamente acessível para a microbiota como fonte de energia.

As substâncias húmicas são um conjunto de moléculas que possuem massa molar variável, coloração de amarelada a preta e solubilidades diferenciadas em meios alcalino e ácido (Stevenson, 1994). Em grande parte, são formadas por reações secundárias de síntese e assim, organismos vivos não as produzem diretamente.

As substâncias húmicas distinguem-se no solo ou em sedimentos em razão de apresentarem características diferentes dos compostos que lhes deram origem, sejam eles originados de biopolímeros de microrganismos ou de plantas, ou de processos de síntese e ressíntese mediados pelos organismos decompositores do solo. Em geral, as substâncias húmicas representam aproximadamente 70% do C total do solo. Por isso, exercem grande influência sobre as características físicas e químicas do solo e, conseqüentemente, tem grande influência sobre os atributos de fertilidade. Dentro da fração das substâncias húmicas, diferenciamos quatro frações principais, tendo como base as suas características de solubilidade em ácido, base e álcool. Essas classes de moléculas englobam: a humina, ácido húmico (AH), ácido himatomelânico e ácido fúlvico. A humina é a fração insolúvel da matéria orgânica em solução aquosa em meio ácido e alcalino, portanto, em qualquer valor de pH de solução extratora.

Os ácidos húmicos são os compostos de coloração escura da matéria orgânica solúveis em solução básica e insolúveis em solução ácida. Os ácidos himatomelânicos são a fração dos AH solúveis em álcool. Os ácidos fúlvicos são os compostos da matéria orgânica, solúveis tanto em meio básico como em ácido.

Recentemente, o estudo da fração humificada da matéria orgânica, as substâncias húmicas, tem ganhado nova importância devido ao seu papel extremamente importante na proteção ambiental. O deseqüilíbrio devido à retirada da vegetação natural e estabelecimento de produção agrícola promoveram a degradação do solo e diminuiu sua capacidade para sustentar vida no longo prazo (Mielniczuk et al., 2003). Os ácidos húmicos são uma das frações mais importantes da matéria orgânica, e tem papel fundamental na sustentabilidade das funções do solo. A maior parte das substâncias húmicas representa um compartimento da matéria orgânica que tem uma lenta taxa de transformação e degradação, ou é recalcitrante, e compõem 70-80% da matéria orgânica

(Stevenson, 1994). Elas exercem papel importante na acumulação de carbono e na retenção e disponibilização de nutrientes para as plantas.

As substâncias húmicas nas Terras Pretas de Índio apresentam algumas características diferentes daquelas encontrados em solos não antrópicos, e isso são uma das razões para maior potencial de fertilidade desses solos (Cunha, 2005; Cunha et al., 2007). Por isso, vale investigar se a adição de carvão vegetal ao solo possa ter efeito nas substâncias húmicas, isto é: e em que nível esse efeito se manifesta na composição das substâncias húmicas, ou seja, a proporção das três frações principais (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina) ou também na composição molecular dessas frações (grupos funcionais).

As propriedades que determinam a função e as transformações dos ácidos húmicos são sua estabilidade, reatividade e suscetibilidade à mineralização no solo. A estabilidade dos ácidos húmicos em relação à decomposição e lixiviação é importante para a acumulação e persistência do carbono orgânico no solo. A reatividade dos ácidos húmicos faz com que essas moléculas interajam com outros componentes do solo, por meio da formação de complexos organo-metálicos, cujas ligações formadas entre a fase mineral e orgânica do solo favorecem a acumulação de carbono orgânico. Por reações de adsorção e dessorção, ocorre a retenção e disponibilização de nutrientes para as plantas. Pela mineralização dos ácidos húmicos, ocorre a liberação de nutrientes e também a diminuição do conteúdo de carbono orgânico no solo. A estabilidade dos ácidos húmicos é determinada, principalmente, pelas suas estruturas aromáticas e hidrofóbicas. A sua reatividade química é determinada pela concentração de grupos ácidos nas superfícies moleculares. A suscetibilidade dos ácidos húmicos à mineralização depende, principalmente, das quantidades das estruturas alifáticas hidrofílicas nas associações moleculares dessa fração.

O processo de humificação resulta em moléculas, ou associações moleculares, cada vez maiores, com maior grau de condensação e concentração de radicais livres orgânicos. Utilizando diversas técnicas degradativas e espectroscópicas, Cunha (2005) concluiu que os ácidos húmicos extraídos de Terras Pretas apresentaram mais estruturas aromáticas policondensadas e maior grau de humificação. Os ácidos húmicos das Terras Pretas também apresentaram maior concentração de grupos funcionais ácidos que são os responsáveis pela maior reatividade química, e conseqüentemente, pelas interações dos ácidos húmicos com outros componentes nesses solos. Os ácidos húmicos das Terras

Pretas são, assim, mais estáveis e, ao mesmo tempo, possuem maior reatividade química, do que os ácidos húmicos de solos adjacentes não antrópicos. Assim, pelas suas características físico-químicas e estruturais, tão desejadas em solos tropicais, possibilitam uma maior acumulação de carbono e maior fertilidade e produtividade aos solos na mesma região, onde solos sem essa matéria orgânica são, muitas vezes, obstáculos à produção agrícola sustentável.

Usando os dados obtidos por ^{13}C VACP/MAS ressonância magnética nuclear (RMN) e análise estatística multivariada, Novotny et al. (2007) verificaram que os AH de Terras Pretas contém carbono em estruturas que são características de materiais de origem pirogênica. Isso significa que os ácidos húmicos de Terras Pretas, de fato, herdaram parte da sua estrutura do material pirogênico, ou seja, do carvão vegetal, que foi incorporado, acumulado e transformado no solo durante longo período de tempo contribuindo, assim, para a melhoria das propriedades químicas e físicas do solo e, conseqüentemente, para a formação de solos mais férteis e de maior potencial produtivo.

Assim, o carvão vegetal, embora seja um material relativamente inerte no solo, e de alta estabilidade, dependendo das condições da sua formação e das transformações que passa no solo, tem a capacidade de contribuir para a melhoria das propriedades físicas, químicas e, conseqüentemente, biológicas do solo.

2.5 BIOCHAR E SUAS PERSPECTIVAS AMBIENTAIS E NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA

A aplicação de biochar no solo é proposta como um mecanismo de seqüestro de carbono, pois através dessa prática evitar-se-ia a emissão de carbono em forma de gases de efeito estufa sendo ele armazenado no solo em uma forma mais estável, comparado com a situação em que os resíduos fossem aplicados diretamente ao solo, em formas mais lábeis, ou mesmo queimados (Madari et al., 2006). Lehmann et al. (2006), numa tentativa de calcular o efeito da introdução de um mecanismo que adiciona carvão ao solo no lugar de simplesmente queimar a biomassa, estimaram que até 12% da emissão antrópica de C, causada por mudança no uso da terra (0,21Pg C), poderiam ser eliminados aplicando-se o C no solo na forma de biomassa carbonizada.

A utilização de biochar no solo pode levar a uma maior fixação de carbono, devido sua superfície de cargas e pela alta estabilidade no solo (Madari et al., 2006) em

função de seu efeito recalcitrante e sua natureza refratária (Steiner et al., 2006). Como já abordado anteriormente, essa permanência do C em estruturas aromáticas, como é o caso do biochar, por longos anos, leva ao efeito de retenção prolongada do C no solo. A alta superfície específica, grande quantidade de sítios quimicamente reativos, alta porosidade podem diminuir as emissões de óxido nitroso (N_2O) do solo, principalmente dos provenientes de adubações nitrogenadas. De acordo com dados do IPCC (2007), a agricultura é considerada um dos setores da economia que mais contribui para as emissões de N_2O. Globalmente, estima-se que a agricultura é responsável por 80% das emissões de N_2O. No Brasil, este percentual é ainda maior devido à forte vocação nacional para a agricultura, onde se estima que 94% do N_2O liberado na atmosfera anualmente, são provenientes da agricultura, totalizando aproximadamente 480 Gg N_2O ano^{-1} (Cerri & Cerri, 2007). Yanai et al. (2007) verificaram que o uso de carvão derivado de resíduos biodegradáveis urbanos reteve 73% da emissão de N_2O. Rondon et al. (2006) também verificaram redução na emissão de N_2O com aplicação de carvão nas doses de 20 Mg ha^{-1}. Esses autores verificaram efeito nos períodos iniciais após a aplicação.

Outro potencial do biochar está no seu efeito no crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas agrícolas e florestais, especialmente em solos tropicais, onde a matéria orgânica é essencial para a fertilidade do solo, devido ao alto grau de intemperização dos argilominerais que possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Nesses ambientes o manejo sustentável da matéria orgânica é de primordial importância. Sob manejo sustentável podemos entender o aumento e manutenção de níveis adequados e a formação e manutenção da qualidade da matéria orgânica. Isso implica na incorporação e estabilização de material orgânico, além do aumento da CTC do solo. Com isso, a capacidade produtiva do solo potencialmente aumenta o que também implica em maior produção de biomassa e consequentemente maior re-incorporação de C novo no solo que, por sua vez, contribuirá para a manutenção da produtividade do solo, fechando assim um círculo “benéfico”.

O uso do carvão vegetal visando à melhoria dos atributos do solo vem sendo largamente estudado, mas pouco ainda se sabe do seu real potencial como condicionador de solo. Estudos já realizados apontam para uma certeza de seu potencial como contribuinte nas melhorias das características químicas, físicas e biológicas do solo.

Major et al. (2005) acharam que a adição de carbono na forma de carvão vegetal aumentou a biomassa de plantas de arroz em 53%.

Oguntunde et al. (2004), em estudo a fim de verificar o efeito do carvão vegetal na produção de milho e a influência nas características químicas e físicas do solo, observaram um incremento na produtividade de grãos em torno de 91% e na biomassa cerca de 44% em solo com carvão comparado com solo sem carvão. Houve um aumento significativo na disponibilidade de K, cerca de 329%.

Madari et al. (2006) verificaram, em experimento em vasos, que o arroz de terras altas (cultivar Primavera) responde positivamente à aplicação de carvão vegetal (de *Eucalipto* sp.) em um solo já sob uso agrícola, apresentando significativamente: maior crescimento em solo onde carvão vegetal foi adicionado até o 28° dia após plantio, e o carvão vegetal continuou a proporcionar maior crescimento às plantas até o 71° dia após plantio. O efeito do carvão também se manifestou na acumulação de matéria seca das plantas e nos grãos, principalmente, na fase inicial do desenvolvimento, em que maior efeito foi observado no desenvolvimento do colmo. O carvão vegetal proporcionou desenvolvimento melhor e mais uniforme para as plantas de arroz, principalmente, na fase inicial do crescimento. Com a adição do carvão ao solo, dentro de 28 dias, foi identificado redução na acidez potencial do solo e aumento no teor de fósforo e potássio disponível para as plantas.

Steiner et al. (2007) observaram o dobro de aumento na produtividade de arroz quando aplicado carvão vegetal junto com fertilizante.

Vários trabalhos (Yamato et al., 2006; Rondon et al., 2006; Kimetu et al., 2008) demostraram efeito significativo na produtividade do arroz e outras gramíneas com a aplicação de carvão vegetal ao solo.

Liang (2006) observou redução na respiração e aumento no C-biomassa microbiana com a aplicação de carvão e conseqüentemente aumento na eficiência metabólica dos microrganismos.

Diversos autores (Tryon, 1948; Iswaran et al., 1980; Kishimoto & Sugira, 1985) relatam efeito significativo da aplicação de carvão na fisiologia e produtividade da soja.

Portanto, o carvão vegetal possui grande potencial para a redução do risco da cultura de arroz de terras altas, que tem como período crítico do seu desenvolvimento o período inicial de quatro semanas. Outros benefícios potenciais desse condicionador do solo são a maior eficiência do uso de fertilizantes químicos, especialmente potássio e fósforo e, conseqüentemente, a redução do custo de produção e o aproveitamento de

subprodutos de processos de carbonização. Finalmente, numa estratégia ganha-ganha, a aplicação de carvão vegetal no solo pode promover acúmulo de carbono em longo prazo contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas globais.

2.6 REFERÊNCIAS

AMATO, M.; LADD, J. Decomposition of 14C-labelled glucose and legume material in soils: Properties influencing the accumulation of organic residue and microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 24, n. 5, p. 455-464, 1992.

AYGUN, A.; YENISOY-KARAKAS, S.; DUMAN, I. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. **Microporous and Mesoporous Materials**, Lund, v. 66, n. 2-3, p. 189-195, 2003.

BALDOCK, J. A.; SMERNIK, R. J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered Pinus resinosa (Red pine) wood. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 33, n. 9, p. 1093-1109, 2002.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, Aberystwyth, v. 47, n. 2, p. 151-163. 1996.

BENITES, V. M ; NOVOTNY, E. H. ; TEIXEIRA, W. G. ; MADARI, B. E.; PIMENTA, A. S.; TROMPOWSKY, P. M. Use of charcoal and wood carbonization by-products in agriculture: learning with Terra Preta de Indio. In: INTERNATIONAL AGRICHAR INITIATIVE 2007 CONFERENCE, 1., Terrigal. **Resumos…**Terrigal: International Agrichar Initiative (IAI) 2007 Conference, 2007. p. 30-31.

BIRD, M. I.; MOYO, C.; VEENEDAAL, E. M.; LLOYD, J.; FROST, P. Stability of carbon in savanna soil. **Global Biochemical Cycles**, Washington, v. 13, n. 4, p. 923-932. 1999.

BOUWMANN, A. F.; GERMON, J. C. Introduction: Special issue – soils and climate change. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, v. 27, n. 3, p. 219. 1998.

BRAADBAART, F.; BOON, J. J.; VELD, H., DAVID, P.; VAN BERGEN, P. F. Laboratory simulations of the transformation of peas as a result of heat treatment: Changes of the physical and chemical properties. **Journal of Archaeological Science**, Boston, v. 31, n. 6, p. 821-833, 2004.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils.** 14. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 2008. 965 p.

BRENNAN, J. K.; BANDOSZ, T. J.; THOMSON, K. T.; GUBBINS, K. E. Water in porous carbons. **Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects**, Oxford, v. 187–188, n. 1, p. 539–568, 2001.

BRODOWSKI, S. B. **Origin, function, and reactivity of black carbon in the arable soil environment**. 2004. 156 f. Tese Doutorado, University of Bayreuth, Bayreuth, Germany, 2004.

BROWN, R. A.; KERCHER, A. K.; NGUYEN, T. H.; NAGLE, D. C.; BALL, W. P. Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 37, n. 3, p. 321-333, 2006.

CERRI, C.; CERRI, C. E. Agricultura e aquecimento global. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 40-44, 2007.

COHEN-OFRI, I.; WEINER, L.; BOARETTO, E.; MINTZ, G.; WEINER, S. Modern and fossil charcoal: aspects of structure and diagenesis. **Journal of Archaeological Science**, Boston, v. 33, n. 3, p. 428-439, 2006.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 1, p. 91-98, 2007.

CUNHA, T. J. F. **Ácidos húmicos de solos escuros da Amazônia (Terra Preta de Índio)**. 2005. 118 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

CUNHA, T. J. F; NOVOTNY, E. H.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; MARTIN-NETO, L.; SANTOS, G. A. CARBONO PIROGÊNICO. In TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, E. N.; Woods, W. I. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1º ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 2009.p. 263-284.

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical Properties of Biochar. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S (ed). **Biochar for Enviromental Management: Science and Technology**. 1. Ed.Londres: earthscan, 2009. 416 p.

FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L.; FILHO, N. L.; RODRIGUES, F. J. A.; ROBINSON, J. M. Tropical forest burning in Brazilian Amazônia: measurement of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Altamira, Pará. **Forest Ecology and Management**, Amsterdan v.123, n. 1, p. 65-79, 1999.

FEARNSIDE, P. M.; NEWTON, L.; FERNANDES, F. M. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal Geophysical Research**, Washington, v. 98, n. 8, p. 16733-16743, 1993.

FRANCO, A. A.; CAMPELLO, E. F. C. Manejo integrado na recuperação de áreas degradadas e na sustentabilidade de sistemas produtivos utilizando a fixação biológica de nitrogênio como fonte de nitrogênio. In: **Processos biológicos no sistema solo-planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. p. 201-220. 2005.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soil in the tropic with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 35, n. 4, p. 219-230. 2002.

GRAÇA, P. M. L. A.; FEARNSIDE, P. M.; CERRI, C. C. Burning of Amazonian Forest in Ariquemes, Rondônia, Brazil: biomas, charcoal formation and burning efficiency. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 120, n. 1-3, p. 179-191, 1999.

HAMER, U.; MARSCHNER, B.; BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. **Organic Goechemistry,** Oxford, v. 35, p. 823-830, 2004.

HAMMES, K.; SMERNIK, R. J.; SKJEMSTAD, J. O.; HERZOG, A.; VOGT, U. F.; SCHMIDT, M. W. I. Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw (Oryza sativa) and chestnut wood (Castanea sativa) as reference materials for black carbon quantification. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1629-1633, 2006.

HAMMES, K.; SCHIMIDT, M. W. I. Changes of Biochar in Soil. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S (ed). **Biochar for Enviromental Management: Science and Technology**. 1. Ed. earthscan, Londres, 2009. p. 261-278.

IPCC. INTERNATIONAL PANEL CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007**: **The Physical Science Bases**. IPCC conference 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch. Acesso em 05/04/2010.

ISWARAN, V.; JAUHRI, K. S.; SEN, A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea. **Soil Biology Biochemestry**, Oxford, v. 12, n. 2, p.191–192, 1980.

JUMA, N. Interrelationships between soil structure/texture, soil biota/soil organic matter and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v. 57, n. 1, p. 3-30, 1993.

KAMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro de ocupação humana pré-histórica na Amazônia. Tópicos em Ciência do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 277-320. 2005.

KIMETU, J. M.; LEHMANN, J.; NGOZE, S.; MUGENDI, D. N.; KINYANGI, J.; RIHA, S., VERCHOT, L.; RECHA, J. W.; PELL, A. Reversibility of productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. **Ecosystems,** New York, v. 11, n. 5, p. 726-739. 2008.

KISHIMOTO, S.; SUGIRA, G. Charcoal as a soil condition. In: SYMPOSIUM ON FOREST PRODUCT RESEARCH INTERNATIONAL: ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE, 1985, Pretoria, **Proceedings...**Pretoria: National Timber Research Institute, 1985, v. 5, p. 22-26.

KRULL, E. S.; SKJEMSTAD, J. O.; GRAETZ, D.; GRICE, K.; DUNNING, W.; COOK, G. D.; PARR, J. F. 13C-depleted charcoal from C3 and C4 grasses and the role of occluded carbon in phytoliths. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 34, n. 9, p. 1337–1352, 2003.

KUHLBUSCH, T. A. J.; CRUTZEN, P. J. Toward a global estimate of black carbon in residues of vegetation fires representing a sink for aTerra Mulataospheric CO_2 and a source of O_2. **Global Biogeochemical Cycles,** Washington, v. 9, n. 4, p. 491-501, 1995.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, Netherlands , v. 11, n. 2, p. 403–427, 2006.

LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GERMAN, L. A.; MCCANN, J.; MARTINS, G. C.; MOREIRA, A. Soil Fertility and Production Potential. In LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (eds) **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003. p. 105-124.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Enviromental Management: An Introduction. In: LEHMANN, J.; SOSEPH, S. (ed). **Biochar for Enviromental Management: Science and Technology**. 1. Ed. earthscan, Londres, 2009. p. 4-18.

LEHMANN, J.; SILVA, J. P. DA; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, The Hague, v. 249, n. 2, p. 343-357, Feb. 2003a.

LEIJ, F.; WINGATE, J.; HUTCHINGS, T. 2nd Conference Sustainable Urban Broefield Regeneration: Integrated management, Londres, **CL: AIRE**, 2006.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J., O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZÃO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 1719-1730, 2006.

MACHADO, P. L. O. de A. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): funcionamento, pontos críticos e possibilidades para alguns sistemas agrícolas no Brasil. Documentos, 41. Rio de Janeiro.. **Embrapa Solos**, 2003. 30 p.

MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CUNHA, T. J. F. The effect of management on the fertility of Amazonian dark earths. In LEHMANN, J., KERN, D. C., GLASER, B., Woods, W. I. (eds) **Amazonian dark earths. Origin, properties, management**. Kluwer: Dordrecht. 2003. p. 407-432.

MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Comunicado Técnico 125**. Goiânia, GO. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. 2006. 4 p.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (terra preta de índio). Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, E. N.; Woods, W. I. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua**

Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1º. ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 2009. p. 172-188.

MAJOR, J.; STEINER, C.; DITOMMASO, A.; FALCÃO, N. P. S.; LEHMANN, J. Weed composition and cover after three years of soil fertility management in the central Brazilian Amazon: Compost, fertilizer, manure and charcoal applications. **Weed Biology Management**, Kyoto, v. 5, n. 2, p. 69-76, 2005.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. Tópicos em Ciência do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 3, p. 209-248, 2003.

MÜLLER, T.; HÖPER, H. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: Consequences for model applications. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 36, n. 6, p. 877-888, 2004.

NEVES, E. G.; PETERSEN, J. B.; BARTONE, R. N.; SILVA, C. A. D. Historical and socio-cultural origins of Amazonian Dark Earths. In LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (eds) **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003. p. 29-50.

NOVOTNY, E. H.; DEAZEVEDO, E. R.; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian Dark Earth soils. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, EUA, v. 41, n. 2, p. 400-405, 2007.

OGUNTUNDE, P. G.; FOSU, M.; AJAYI, A. E.; GIESEN, N. V. Effects of charcoal production on maize yeld, chemical properties and texture of soil. **Biology and Fertility of Soils,** Berlin, v. 39, n. 4, p. 296-299. 2004.

PASTOR-VILLEGAS, J.; PASTOR-VALLE, J. F.; MENESES RODRÍGUEZ, J. M.; GARCÍA, M. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon Adsorbents. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 76, n. 1-2, p. 103-108, 2006.

PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; VALENCIA, E. P. E. Holocene fire and vegetation changes in southeasterm Brazil as deduced from fóssil charcoal and soil carbon isotopes. **Quaternary International**, Oxford, v. 114, n. 1, p. 35-43. 2004.

RONDON, M. A.; MOLINA, D.; HURTADO, M.; RAMIREZ, J.; LEHMANN, J.; MAJOR, J.; AMEZQUITA, E. 'Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through bio-char amendments to unfertile tropical soils. In: 18th WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 18., Philadelphia, Pennsylvania. **Resumos…**2006. p. 138.

ROUQUEROL, F.; ROUQUEROL, I.; SING, K. **Adsorption by Powders and Porous Solids**, Academic Press, London, UK. 1999. 125 p.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry: Fundamentals and Applications**. 2. ed. Academic Press, San Diego, USA. 1993. 293 p.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; de MACÊDO, J. J. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term efects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 291, n. 1-2, p. 275-290, 2007.

STEINER, J.; ZECH, W. TEIXEIRA, W. G. Microbial activity as soil quality indicator in annual and perennial plantations treated with charcoal, mineral or organic fertilizer in a highly weathered Amazonian upland soil. In: 18th WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE. 18., Philadelphia, Pennsylvania. **Resumos…**2006. p. 72.

STEVENSON, F. J. **Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions**. 2. ed. New York: Wiley, 1994. 496 p.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.4, p.609-618, 2005.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Soils and Soil Fertility**, 6. ed. Blackwell, Iowa: Wiley, 2005. 489 p.

TROMPOWSKY, P. M.; BENITES, V. M.; MADARI, B. E.; PIMENTA, A. S.; HOCKADAY, W. C., Hatcher, P.G. Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 36, n. 11, p. 1480-1489, 2005.

TRYON, E. H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. **Ecol Monogr**, New York, v.18, n. 1, p. 81–115, 1948.

WARDLE, D. A., NILSSON, M. C.; ZACKRISSON, O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus, **Science**, New York, vol. 320,n. 5876, p. 629. 2008.

WILDMAN, J.; DERBYSHIRE, F. Origins and functions of macroporosity in activated carbons from coal and wood precursors, **Fuel**, Oxford, vol. 70, n. 5, p. 655-661, 1991.

YAMATO, M.; OKIMORI, Y.; WIBOWO, I. F.; ANSHORI, S.; OGAWA, M. Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea, peanut and soil chemical properties in south Sumatra, Indonesia. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 52, n. 4, p. 489-495, 2006.

YANAI, Y.; TOYOTA, K.; OKAZAKI, M. Effects of charcoal addition on N2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 53, n. 2, p. 181-188, 2007.

3 EFEITO DA BIOMASSA CARBONIZADA NA FERTILIDADE DO SOLO E NA RESPOSTA FISIOLÓGICA DA SOJA (*Glycine max*) NO CERRADO

RESUMO

Alternativas no manejo da fertilidade do solo, como o uso de condicionadores, visando o aumento da fertilidade do solo e reduções no uso de fertilizantes químicos são de grande importância para a manutenção e aumento sustentável da produção agrícola. O trabalho foi realizado em Nova Xavantina, MT em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de setembro de 2006 a maio de 2009, com o objetivo de verificar o efeito da biomassa carbonizada nos atributos químicos do solo e no desenvolvimento e produtividade da soja. O delineamento experimental foi uma combinação de faixas e blocos ao acaso, em que 5 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1}) de NPK (0-20-20) foram distribuídas em faixas, e 5 doses de carvão vegetal (0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}) ao acaso, em 4 repetições (blocos). O carvão foi aplicado uma única vez (safra 2006-2007) e incorporado ao solo a uma profundidade de 0-15 cm. Para avaliação de fertilidade do solo foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm e analisados os seguintes atributos: pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, M.O., C orgânico e N total. Os parâmetros fisiológicos avaliados foram: altura e matéria seca em V4 e R1, teor foliar dos nutrientes: P, K, Ca e Mg, Fe, Cu, Zn e Mn em pleno florescimento e produtividade. De maneira geral, com análise multivariada, constatou-se sinergismo entre o efeito da adubação mineral e aplicação de carvão vegetal. Houve aumento significativo nos teores de C de 0-10 cm no 1° ano e 10-20 cm no 3° ano com a aplicação de 16 Mg ha^{-1}de carvão. Não houve efeito do carvão nos demais atributos do solo, exceto M.O. na qual o carvão teve efeito positivo no 3° ano após sua aplicação. Verificou-se efeito na interação carvão x NPK, com aumento de K e na camada de 0-10 cm no 1° e 3° ano e acidez potencial apenas no 1° ano. As doses de 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1} proporcionaram significativamente maiores alturas e massa seca nas épocas avaliadas no 1° e 3° ano. Não se verificou efeito significativo do carvão nos teores foliares de nutrientes. A produtividade foi significativamente aumentada em razão da aplicação de 16 Mg ha^{-1}, no 1° e 3° ano, sendo a equação com comportamento quadrático. O aumentou na produtividade de soja e a fertilidade do solo, se manteve mesmo após 3 anos da sua aplicação. Como conclusão, um importante comportamento do carvão vegetal deve ser enfatizado: ele manteve seu efeito em alguns parâmetros de fertilidade do solo e na produtividade da soja 3 anos após sua aplicação no solo e seu efeito para a acumulação da M.O. aumentou com o tempo.

Palavras-chave: biochar, matéria orgânica, produtividade, plantio direto.

ABSTRACT

EFFECT OF BIOCHAR ON SOIL FERTILITY AND ON THE PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF SOYBEAN (*Glycine max*) IN THE BRAZILIAN SAVANA (CERRADO)

Alternatives in soil fertility management, such as the application of soil amendments, to enhance soil fertility and reduce chemical fertilizer use, are of great importance for the sustainable increase or maintenance agricultural production. The study was carried out in Nova Xavantina, Mato Grosso state between September 2006 and May 2009, in order to verify the effect of carbonized biomass in soil chemical properties abd the development and soybean yeld. The soil was a Haplic Ferralsol. The experimental design was a combination of strips and random blocks where 5 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1}) of NPK (0-20-20) were distributed in strips and 5 doses of biochar (0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}) in random a manner, in 4 replications (blocks). The biochar was applied only once, two months before the instalation of the experiment (September 2006), to the 0-15 cm soil layer. Soil fertility parameters were evaluated in samples collected at 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm and pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, SOM and total C and N were evaluated. Among physiological parameters the height and dry mass of plants were evaluated at the V4 and R1 phases, the nutrient levels in plant tissue at flowering, and yield. In general, using multivariate analysis, sinergism in the effect was detected between mineral fertilization and biochar application on soil fertility properties and physiological attributes. Total organic C was significantly higher at 0-10 cm in the 1st year after biochar application and at 10-20 cm in the 3rd year in the treatment with 16 Mg ha^{-1} biochar. Biochar application had no effect on the other soil fertility attributes, except that in the 3rd year it showed positive effect on soil organic matter accumulation. There was interaction between biochar and NPK, resulting in increase in K levels at 0-10 cm, 1st and 3rd year after application of biochar and decrease in exchangeable acidity in the 1st year. The 8 Mg ha^{-1} and 16 Mg ha^{-1} biochar doses resulted in higher values of plant height and dry mass both in the 1st and 3rd year, however, biochar had no effect on nutrient levels in plant tissue. Soybean yields were, again, significantly affected by biochar doses in a positive and quadratic manner both in the 1st and 3rd year. In conclusion, as an important behaviour of biochar, it has to be emphasized, that it kept its effect on some soil fertility parameters and on soybean yield 3 years after its only application to the soil, and its effect on SOM increased with time.

Key words: cerrado charcoal, organic matter, soybean yield, direct drill.

3.1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa cultivada a cerca de cinco mil anos pelos chineses. Chegou ao Brasil por volta de 1882, onde os primeiros testes foram realizados, contudo só foi introduzida oficialmente como cultura em 1914 no Estado

do Rio Grande do Sul (Roesseing & Meneghelo, 2001). Apenas em 1949, no Rio Grande do Sul, é que a soja apresentou resultados satisfatórios, possibilitando pela primeira vez sua exportação. Desde então, o setor produtivo desta oleaginosa vem, ano após ano passando por crises que impediram de certa forma o seu crescimento de forma mais acelerada e estável. Após essas inúmeras crises, iniciou-se no País uma política de diversificação das exportações de produtos agrícolas, implementando políticas de crédito rural e criando agências tecnológicas que pudessem de certa forma atender as expectativas do produtor e, também, as exigências do mercado internacional. Estes incentivos e investimentos foram, em grande parte, direcionados para a cadeia de produção da cultura da soja, proporcionando um desenvolvimento significativo, sobretudo voltado para exportação. Atualmente, a soja é o principal produto agropecuário brasileiro, sendo o Brasil o segundo maior responsável pelo abastecimento mundial desta oleaginosa.

Entre os fatores mais relevantes que ajudaram a impulsionar o crescimento do agronegócio da soja, destaca-se a contribuição das indústrias esmagadoras de grãos, que tiveram papel fundamental no desenvolvimento desse complexo. A maior demanda de grãos, seja por essas indústrias, seja pelo setor de produção de suínos e aves, também tiverem uma importante contribuição para o início do cultivo da soja na região Centro-Oeste, geralmente em grande escala de produção. Os incentivos públicos também favoreceram esse processo, mas a maior contribuição para a modernização e aumento da produção no cerrado brasileiro foi devido aos investimentos em pesquisas, adoção de novas técnicas e desenvolvimento de novas variedades adaptadas a essa região. Este crescimento fez com que novas fronteiras agrícolas fossem abertas e exploradas, trazendo para a região do cerrado, desenvolvimento, riquezas e principalmente o bem estar social. Regiões antes esquecidas e com enormes dificuldades de crescimento, passaram a ser o centro das atenções da cadeia produtiva da soja e pecuária, abrigando extensas áreas de cultivo, campos com pastagens, indústrias e diversas empresas do setor.

A região dos cerrados apresenta ótimas condições edafoclimáticas para o cultivo dessa oleaginosa, contudo geograficamente encontra-se em uma das regiões menos favorecidas, devido à maior distância das indústrias de insumos agrícolas e dos canais de exportação, gerando altos custos de produção. Entretanto, fatos relativamente recentes vêm contribuindo para a redução dos custos de produção, tais como a adoção do sistema de plantio direto que tem reduzido custos com o uso de máquinas, implementos e gastos com

mão de obra, além de trazer inúmeros benefícios às características químicas, físicas e biológicas dos solos.

Apesar dos benefícios do sistema plantio direto nas características químicas, físicas e biológicas do solo, ainda é grande o uso de fertilizantes químicos visando altas produtividades, isso em função da baixa fertilidade natural dos solos de cerrado (Vargas & Hungria, 1997). Essas altas taxas de aplicação de fertilizantes oneram os custos de produção chegando a ser responsável por 32% do custo direto de produção e 9% do custo total (Conab, 2010), além de contribuírem para a emissão de gases de efeito estufa (CO_2 e N_2O) seja pela aplicação direta ao solo principalmente de fertilizantes nitrogenados ou pelo processo de fabricação das matérias primas através da queima de combustíveis fósseis (Baede et al., 2001).

Segundo Machado (2005), a agricultura introduzida após o desmatamento tem gerado fortes impactos, aumentando as emissões de gases de efeito estufa para atmosfera. Tecnologias capazes de manter o carbono captado da atmosfera fixado ao solo por vários anos e ainda aumentando a fertilidade dos mesmos tem sido alvo de pesquisas recentes, como é o caso do uso do biochar ou carvão vegetal (ex. Glaser et al., 2002; Lehmann et al., 2003; Topoliantz et al., 2005; Steiner et al., 2007; Van Zwieten at al., 2010) como condicionante de solo e forma de seqüestro do carbono da atmosfera. Seqüestro de carbono no solo significa transformar o carbono presente na atmosfera (CO_2) em carbono estocado no solo, fazendo parte da matéria orgânica (Machado, 2005).

Na combustão incompleta da biomassa, como no procedimento da produção de carvão vegetal ou em diferentes processos de pirólise forma se uma série de compostos genericamente denominados de carbono pirogênico. Esses compostos, pela sua recalcitrância, representam um importante reservatório de carbono estável, quando incorporado no solo, podendo mitigar o aumento da concentração atmosférica de CO_2, e também desempenhar importante papel na fertilidade dos solos, especialmente quando química e biologicamente alterados (Madari et al., 2009).

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da adição de carbono pirogênico, na fertilidade do solo, no desenvolvimento e produtividade de soja e na resposta à adubação com NPK.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento em campo foi instalado em setembro de 2006 em Nova Xavantina, MT, bioma Cerrado e avaliado nas safras 2006-2007 e 2008-2009. A localização geodésica é 14º 35´ 36" de latitude e 52º 24´ 04" de longitude e altitude de 310 m em solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd, Embrapa, 1999), textura Franco Argilo Arenosa. Antes da implantação, a área do experimento era utilizada para produção de soja (*Glycine max*, L.) há dez anos em plantio direto, seguindo sucessão soja – pousio. Na análise química e física do solo de amostras coletadas na profundidade de 0-20 cm, antes da implantação do experimento, verificou-se: pH (H_2O): 5,6; Fósforo (P, método de Mehlich): 6,7 mg dm^{-3}; Potássio (K^+): 61,5 mg dm^{-3}; Cálcio (Ca^{2+}): 1,4 $cmol_c$ dm^{-3}; Magnésio (Mg^{2+}): 0,4 $cmol_c$ dm^{-3}; Alumínio (Al^{3+}): 0,13 $cmol_c$ dm^{-3}; Acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$): 4,98 $cmol_c$ dm^{-3}; Saturação por bases (V%): 27; Capacidade de troca catiônica (CTC): 6,93 $cmol_c$ dm^{-3}; Matéria orgânica (M.O.): 12,6 g kg^{-1}; Ferro (Fe): 75,0 mg dm^{-3}; Manganês (Mn): 49,0 mg dm^{-3}; Zinco (Zn): 45,0 mg dm^{-3}; Cobre (Cu): 1,7 mg dm^{-3}; Argila: 307 g kg^{-1}; Silte: 73 g kg^{-1}; Areia: 620 g kg^{-1}.

Os tratamentos do experimento num total de 25 foram compostos pela combinação de quatro doses de adubação de base (100 kg ha^{-1}; 200 kg ha^{-1}; 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} da fórmula 00-18-18 de adubo NPK) e a testemunha (0 kg ha^{-1}) distribuídas em faixas e quatro doses de carvão vegetal, como fonte de carbono pirogênico (2 Mg ha^{-1}; 4 Mg ha^{-1}; 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1} em base úmida) e a testemunha (0 Mg ha^{-1}) ao acaso, em quatro repetições (blocos). Cada parcela foi composta por nove linhas da cultura com 10 m de comprimento, totalizando 40,50 m^2, sendo a área útil para as avaliações de 25,20 m^2.

O carvão vegetal de origem de diferentes espécies de árvores de cerrado foi aplicado ao solo uma única vez (safra 2006/2007) incorporando a uma profundidade de 0 a 15 cm, dois meses antes da semeadura da cultura da soja, utilizando-se enxada rotativa. Antes da incorporação ao solo, o mesmo foi moído para passar em peneira de 2 mm. Posteriormente foi semeado milheto (*Pennisetum americanum*) na área experimental, visando à formação de palhada.

A composição do carvão vegetal adicionado ao solo está demonstrada na Tabela 3.1. Entre os macroelementos esse carvão vegetal conteve K e Ca em maior proporção, entre os microelementos Fe e Mn e 49% de C total e 0,66% N total.

Tabela 3.1. Composição elementar (valores totais) do carvão vegetal utilizado no experimento**.**

Nitrogênio total (N)	g kg^{-1}	6,6
Fósforo (P_2O_5 ácido cítrico)		0,3
Fósforo (P_2O_5 total)		1,0
K_2O		3,3
CaO		5,7
MgO		1,1
Enxofre (S)		0,4
Cobre (Cu)	mg kg^{-1}	7,0
Ferro (Fe)		6.150,0
Manganês (Mn)		194,0
Zinco (Zn)	mg kg^{-1}	13,0
Molibdênio (Mo)		2,0
Cobalto (Co)		1,0
Boro (B)		5,0
Carbono total (C)	g kg^{-1}	490,6
Umidade		50,0
Material mineral total		280,0
Relação C:N		74,3

A amostra de carvão vegetal teve uma baixa relação sinal: ruído (Figura 3.1). Praticamente não houve presença de estruturas alifáticas (alquilas em geral, ~100-0 ppm) ou O- (~70 ppm) e di-O-alquilas (~105 ppm) que seriam provenientes da celulose, e também não há indicação no espectro de grupos arila-O-alquila (~56 ppm) de lignina (embora VACP-TOSS-DD não foi feito para verificar) indicando que a carbonização dessa amostra foi bastante completa e não preservou precursores. O espectro apresentou um claro sinal de grupos O-aromáticos (C-arila, ~130 ppm), responsáveis pela estabilidade do material. Também há indicação de grupos fenólicos (~150 ppm) no espectro, embora em proporção bem menor que os grupos aromáticos, que podem ser responsáveis por alguma reatividade química no carvão vegetal.

Dois dias antes da semeadura, foi realizada dessecação de manejo na área experimental utilizando-se 1.080 g ha^{-1} de equiavalente ácido (e.a.) de glyphosate e 241,8 g e.a. ha^{-1} de 2,4–D.

A semeadura da soja (cultivar TMG 108 RR®) foi realizada no dia 05 de dezembro de 2006 (safra 2006-2007) e 10 dezembro de 2008 (safra 2008-2009), sendo distribuídas 12 sementes por metro, observando-se espaçamento de 0,45 m entre linhas e profundidade de semeadura de 2-3 cm, sendo nessa mesma operação realizada a aplicação dos tratamentos de adubação de base.

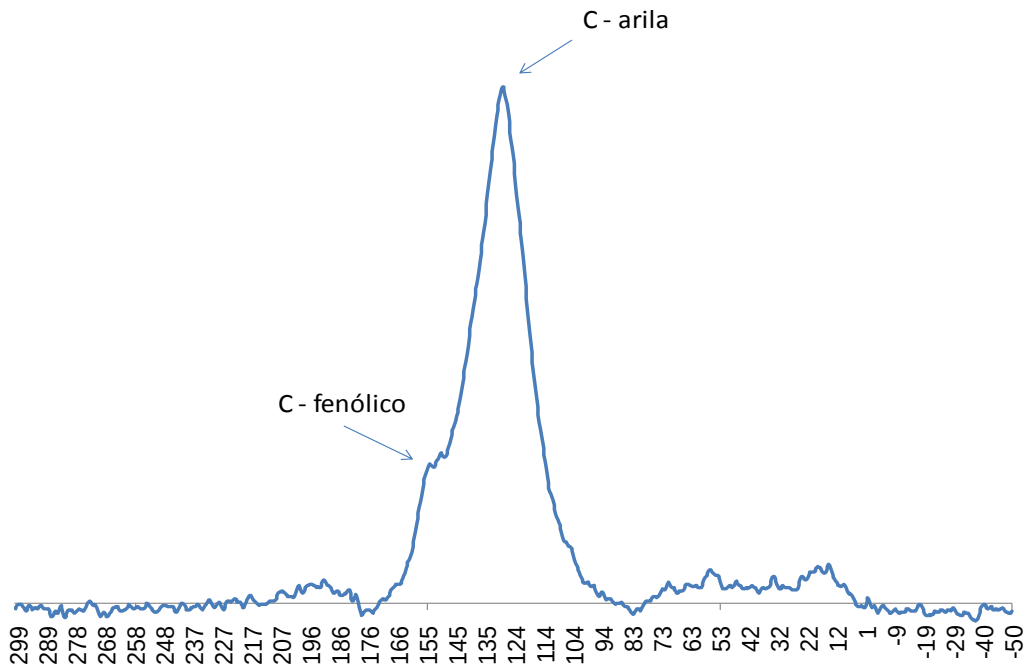

Figura 3.1. Espectro de ^{13}C RMN (VACP-TOSS) de amostra do carvão vegetal utilizado no experimento.

As avaliações dos tratamentos foram constituídas de análise fisiológica das plantas e atributos químicos do solo.

Plantas – nos estádios V4 (terceiro trifólio totalmente aberto) e R1 (plena floreção) foram realizadas as seguintes avaliações: biomassa seca e altura (cm) das plantas, coletando-se dez plantas por parcela. A fitomassa seca foi obtida secando-se as plantas (parte aérea) em estufa de ar com circulação forçada a 65°C por 72 horas e em seguida pesando-se os resíduos vegetais. Em pleno florescimento foram coletados dez trifólios por parcela sendo os mesmos secados como citado anteriormente e triturados em moinho tipo Willey (malha de 2 mm), para posterior determinação das concentrações de P, K, Ca e Mg, Fe, Cu, Zn e Mn a fim de analisar os teores de nutrientes nas folhas de acordo com metodologia de Embrapa (1997).

Solo – em pleno florescimento foram avaliadas as características químicas do solo (pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, M.O. e C total) utilizando métodos descritos pela Embrapa (1997), sendo as amostras coletadas nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. As amostras foram compostas por três sub-amostras coletadas

aleatóriamente dentro das parcelas. A matéria orgânica (M.O.) foi determinada pelo método de Walkley Black, sem aquecimento suplementar.

Por ocasião da colheita da soja, também se avaliou a produtividade de grãos, com posterior padronização da umidade dos grãos em 14%.

Durante o desenvolvimento da cultura foram realizados tratos fitossanitáros, com a aplicação do herbicida glyphosate (1.080 g ha^{-1} de equivalente ácido) visando o controle de plantas daninhas, do inseticida methamidophos (420 g ha^{-1}) para o controle de pragas e duas aplicações de fungicidas, sendo a primeira de trifloxistrobina + ciproconazol (65,63 + 28 g ha^{-1}) e a segunda com o fungicida tebuconazole (100 g ha^{-1}) visando o controle de doenças.

Houve diferença significativa na distribuição pluviométrica no decorrer das safras, principalmente na safra 2008/2009, sendo os dados apresentados na Figura 3.2.

Após a coleta e tabulação dos dados, efetuou-se a análise de variância utilizando o software Sisvar, Versão 5.3, sendo as médias das variáveis significativas agrupadas pelo critério de Tukey à 5% de significância.

Os métodos estatísticos de análise multivariada aplicados foram análise de agrupamento (AA) e análise de componentes principais (ACP), utilizando o software Statistica Versão 7.0. Na análise de componentes principais as variáveis independentes NPK e CARVÃO também foram plotadas, mas apenas como variáveis ilustrativas, ou seja, não distorcem a inércia dos dados nem contribuem para as CPs. Na análise de agrupamento utilizou se o algoritmo “k-means clustering”. As variáveis foram padronizadas antes de executar as análises na seguinte forma: valor padronizada=(valor do parâmetro – média de todos os dados desse parâmetro)/desvio padrão.

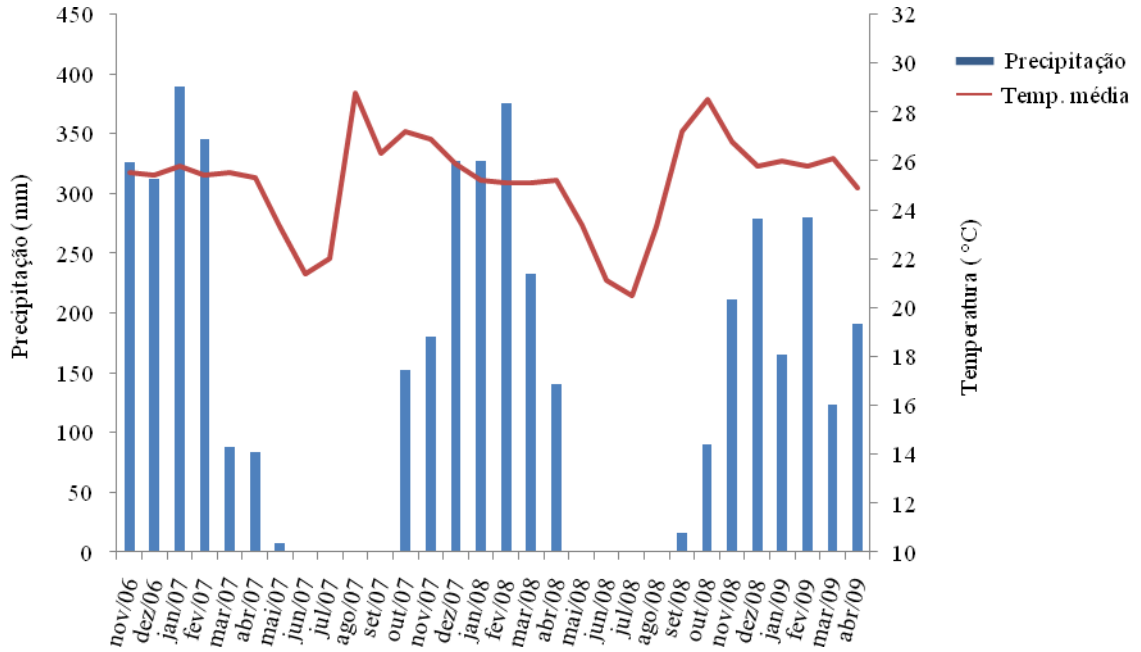

Figura 3.2. Precipitação (mm) e temperatura média (ºC) ocorrida em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento. Cada data de amostragem refere-se à média de três dias de coleta. Os dados de temperatura foram coletados na estação experimental do Inmet em Nova Xavantina, MT e a pluviosidade na sede da propriedade onde se realizou o experimento, utilizando-se o pluviômetro tipo cunha HD 306.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Análise exploratória do efeito dos tratamentos sobre a fertilidade do solo e os dados fisiológicos das plantas

De acordo com a análise de componentes principais (ACP), as variáveis fisiológicas das plantas e as variáveis de fertilidade do solo, obtem-se uma idéia geral sobre o efeito da aplicação do carvão vegetal ao solo em combinação com adubo mineral e sobre como essas variáveis se correlacionam. Como as variáveis independentes também são visíveis no “biplot”, foi possível visualizar o efeito da adubação (NPK) e da dosagem de carvão no solo (CARVÃO) nas variáveis dependentes. Os resultados foram discutidos primeiramente separados para os dados fisiolósicos (altura [ALTV4 E ALTR1], massa seca das plantas [MSV4 E MSR1] e produtividade [PROD]), considerado uma das variáveis mais importantes, e depois para os dados fisiológicos e de fertilidade na camada 0-20 cm do solo, em conjunto, o que permite observar efeitos interligados entre esses dados.

Na Figura 3.3 são apresentados os componentes principais (CP) dos dados fisiológicos no primeiro e terceiro ano após a aplicação do carvão. O CP1 (Fator 1) reteve 62,36% da inércia dos dados e o CP 2 16,92%, acumulando no gráfico 79,28% da informação da matriz original (Figura 3.3). No terceiro ano após a aplicação do carvão o CP 1 reteve 65,68% e o CP 2 15,71% da informação, totalizando 81,39%. A análise de componentes principais revelou um comportamento muito similar tanto do efeito do carvão quanto do NPK nos dois anos avaliados. Nos gráficos claramente pode ser identificado o efeito da adubação na semeadura (adubação de base) para os parâmetros de altura e massa seca das plantas da soja tanto no 1°, quanto no 3° ano. A diferença é que no 1° ano a análise indica efeito forte da adubação base enquanto que no 3° ano a altura e massa seca na fase vegetativa das plantas parecem ter também mais efeito do carvão vegetal. Para a produtividade a aplicação do carvão vegetal mostrou maior efeito do que a adubação de base, tanto no 1° quanto no 3° ano após a aplicação. O fator 2 é composto pelo variável PROD, em ambos os anos da avaliação, entretanto a sua participação nesse fator diminui, do 1° ano para o 3° de 0,8583 a 0,7730 (Tabela 3.2). Isso pode significar que o efeito do carvão do 3° ano fica mais "dividido" entre a produtividade (PROD) e ALTV4 e MSV4.

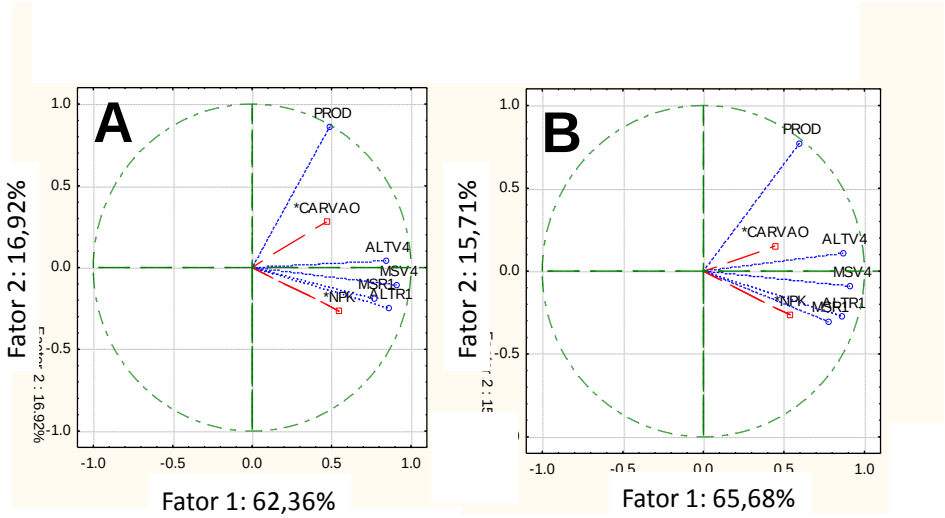

Figura 3.3. Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento no 1º (A) e 3° (B) ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (resultados da safra 2006/2007 e 2008/2009). ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja. ALT e MS são variáveis ativas, NPK e CARVÃO variáveis suplementares.

Tabela 3.2. Coordenadas (carregamentos) dos fatores das variáveis, em base de correlações no 1º e 3° ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (safras 2006/2007 e 2008/2009).

Variáveis	Ano 1		Ano 3	
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2
ALTV4	0,8414	0,0377	0,8667	0,1082
ALTR1	0,8616	-0,2500	0,8597	-0,2750
MSV4	0,9115	-0,1041	0,9139	-0,0901
MSR1	0,7713	-0,1861	0,7766	-0,3038
PROD	0,4919	0,8583	0,5964	0,7730
% da variância	62,36	16,92	65,68	15,71
*NPK	0,5494	-0,2681	0,5417	-0,2640
*CARVÃO	0,4694	0,2797	0,4454	0,1525

ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja. * variáveis suplementares.

Na Figura 3.4, observa-se uma separação mais definida das amostras dos tratamentos onde não houve aplicação (0 Mg ha^{-1}) e onde houve a aplicação da maior dose de carvão vegetal (16 Mg ha^{-1}) no eixo do fator 1 em ambos os anos. Esse fator é composto pelas variáveis ALTV4, ALTR1, MSV4 e MSR1 e mostra efeito do NPK e do carvão vegetal. No eixo do fator 2 (PROD, efeito principal do carvão vegetal) somente as amostras dos tratamento com a maior dose de carvão formam grupo mais definido na quadrante direito superior.

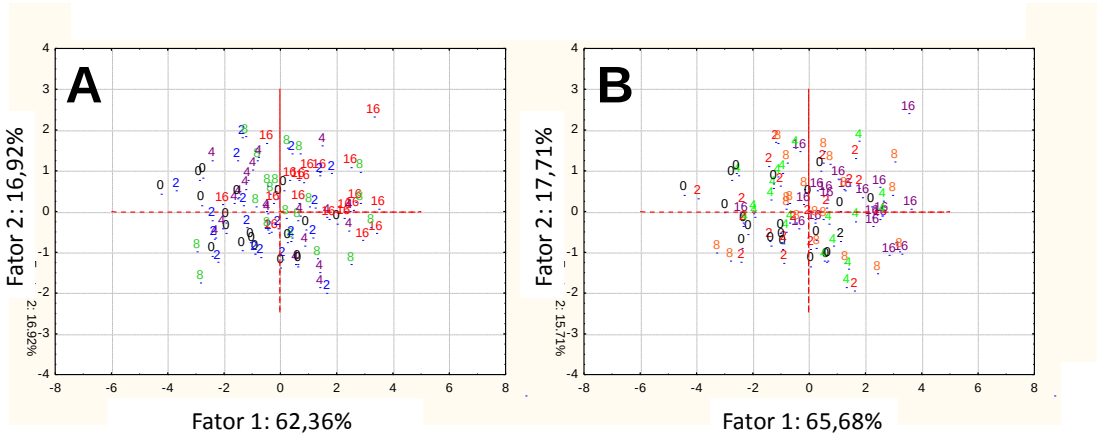

Figura 3.4. Projeção dos dados no biplot dos fatores 1 e 2 do experimento no 1º (A) e 3° (B) ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (resultados da safra 2006/2007 e 2008/2009). 0: 0 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 2: 2 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 4: 4 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 8: 8 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 16: 16 Mg ha^{-1} carvão vegetal.

Os componentes principais (CP) obtidos analisando os dados de fisiologia e de fertilidade do solo em conjunto, no primeiro ano após a aplicação do carvão, a CP1 (Fator 1) reteve 42,64% da inércia dos dados, a CP2 14,99%, acumulando no gráfico 57,63% da informação da matriz original (Figura 3.5). No terceiro ano após a aplicação do carvão, a CP1 reteve 39,60% e a CP2 16,72% da informação, totalizando 56,32%.

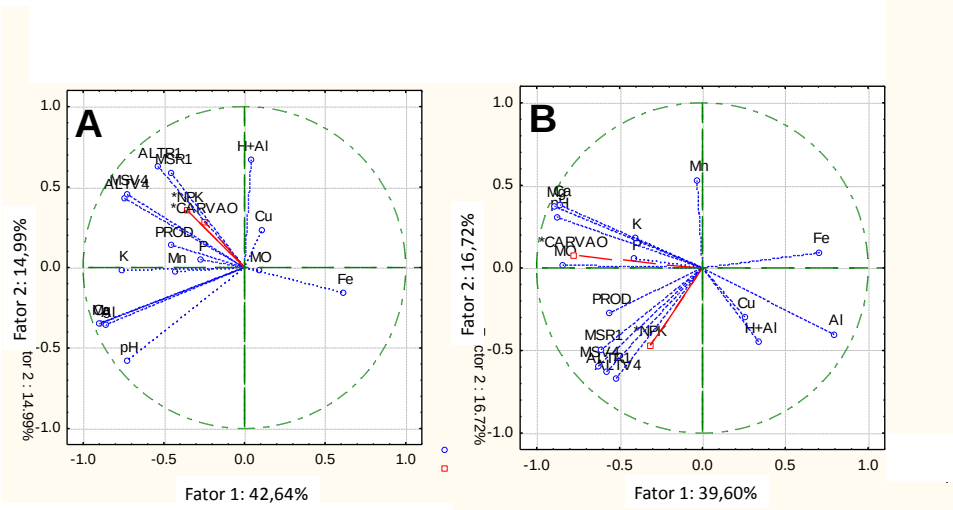

Figura 3.5. Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento no 1º (A) e 3° (B) ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (resultados da safra 2006/2007 e 2008/2009) da análise combinada de variáveis fisiológicas (ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm). NPK e CARVÃO são variáveis suplementares.

No primeiro ano, na CP1 percebe-se o efeito tóxico para as plantas e a deficiência nutricional do solo quando há alto teor de alumínio (Al). Com exceção de Fe e Cu que estão mais disponíveis em pH mais ácido (Fernandes, 2006), a fertilidade do solo e as respostas fisiológicas aumentam no mesmo sentido da adubação (NPK) e da dosagem de carvão no solo. A disponibilidade de Ca e Mg é adequada, de modo geral, quando os solos não são ácidos (pH 6,0 a 6,5) (Fernandes, 2006), isso é percebido, pois o pH está altamente correlacionado com esses minerais, respectivamente 0,85 e 0,86 de correlação, valores significativos com 95% de confiança para distribuição t.

Na CP2, com menor peso 14,99%, existe um comportamento diferenciado, onde as respostas fisiológicas da planta crescem no sentido oposto à fertilidade do solo. Vale lembrar que a acidez potencial (H+Al) é aumentada e também o pH diminuído no sentido de crescimento das respostas fisiológicas, o que indica maior dissolução dos nutrientes. Dessa maneira, a PC2 descreve um efeito de dissolução dos nutrientes, mas de forma gradativa, ou seja, efeito que, mesmo com uma leve diminuição da fertilidade do solo, consegue aumentar a produtividade (PROD), massa seca (MS) e altura (ALT) da planta. De maneira geral, as respostas da planta aumentam com o aumento de CARVAO e NPK.

Na análise de agrupamento (Tabela 3.3), distinguiram-se quatro principais grupos. Enfatizando a resposta fisiológica mais importante, PROD, tem se os grupos 2 e 4 abaixo da média (3021 kg ha^{-1}), o grupo 1 intermediário e o grupo 3 acima da média com PROD de 3284 kg ha^{-1}. Analisando as variáveis para esse grupo 3 tem-se que: com exceção do P, Fe e Cu, todas as outras variáveis de fertilidade do solo estão acima da média dos quatro grupos, os indivíduos desses grupos receberam carvão entre as doses 4 e 16 Mg ha^{-1}.

Tabela 3.3. Médias das variáveis de fisiologia e fertilidade do solo (0-20 cm) por agrupamento e média geral de todas as amostras, safra 2006/2007, em Nova Xavanrina, MT.

Variável	Médias				
	Grupo 1 (n=32)	Grupo 2 (n=25)	Grupo 3 (n=18)	Grupo 4 (n=25)	Geral (n=100)
ALTV4	20,15	18,93	20,22	18,46	19,44
ALTR1	84,10	80,63	82,54	78,76	81,62
MSV4	9,75	8,63	9,61	8,35	9,09
MSR1	90,12	86,33	91,63	84,41	88,02
PROD	3105,22	2952,96	3284,11	2791,24	3020,86
pH	5,90	5,85	5,97	5,71	5,85
Ca	2,44	2,11	2,54	1,64	2,18
Mg	0,74	0,66	0,80	0,53	0,68
Al	0,29	0,23	0,31	0,22	0,26
H+Al	4,56	4,25	4,53	4,59	4,48
P	9,89	10,96	8,73	10,88	10,20
K	116,00	102,00	110,75	82,50	103,18
Cu	1,54	1,60	1,53	1,63	1,58

Continua...

Tabela 3.3. Continuação.

Variável	Médias				
	Grupo 1 (n=32)	Grupo 2 (n=25)	Grupo 3 (n=18)	Grupo 4 (n=25)	Geral (n=32)
Fe	42,89	50,48	39,00	56,1	47,39
Mn	44,42	41,68	46,00	43,90	43,89
M.O.	13,67	13,88	13,72	13,62	13,72

ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja, pH: reação química do solo, Ca: cálcio (Ca^{2+}); Mg: magnésio (Mg^{2+}), Al: alumínio (Al^{3+}), H+Al: acidez potencial, P: fósforo disponível, K: potássio, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, M.O.: matéria orgânica. * variáveis suplementares.

O principal efeito de interesse é o do carvão, mas ele não pode ser explicado apenas por uma tendência principal (CP) na inércia dos dados, pois graficamente ele está descrito nas duas CPs, uma vez que está na diagonal do gráfico. Como uma componente é independente da outra, parece que o carvão causa dois efeitos independentes. Em CP1, seu efeito seria a retenção de minerais no solo, pois com o aumento de carvão aumenta-se a fertilidade do solo. Em CP2, seu efeito seria a disponibilização desses minerais para as plantas, esse efeito é gradativo, ou por gradiente de concentração, pois se a dissolução dos minerais fosse rápida a lixiviação ocorreria e a fertilidade cairia drasticamente. Isso explicaria porque as respostas fisiológicas aumentam no sentido da acidez potencial. O efeito duplo do carvão, representado nas duas CPs, pode ser parcialmente explicado pela composição química do carvão. Devido à oxidação parcial, as unidades aromáticas periféricas do carbono pirogênico contêm substituintes ácidos, principalmente carboxílicos (Glaser et al., 2002; Kramer et al., 2004; Novotny et al., 2007 e Figura 3.1). A aromaticidade confere estabilidade ao carvão e os grupos carregados eletronicamente conseguem reter os minerais, justificando os efeitos nas CPs. Outra possível explicação seria o efeito eletrofisiológico do carvão vegetal para as plantas, fenômeno similar observado para as substâncias húmicas (por ex. Nardi et al., 2002). Mais recentemente, Spokas et al. (2010) concluiram que biochar (biomassa carbonizada) pode induzir a produção de etileno (alias etileno é também produzido durante o processo de carbonização) no solo que é um importante hormônio vegetal e pode afetar o crescimento e produtividade das plantas e a atividade de microorganismos.

A matéria orgânica (M.O.) foi uma variável centralizada na ACP, isso significa que a adição de carvão, em curto prazo, não alterou o teor de matéria orgânica oxidável, determinável pelo método Walkley-Black, já que o carbono pirogênico é muito estável.

Na análise dos dados do 3º ano (Figura 3.5), a CP1 retém 39,60% da inércia dos dados, a CP2 16,72%, acumulando no gráfico 56,32% da informação da matriz original. O comportamento da fertilidade do solo e as respostas fisiológicas da planta em relação à adição de carvão e adubação seguem as mesmas tendências observadas no 1º ano. Existem apenas duas principais diferenças, representadas pelas variáveis H+Al e M.O. Na CP1 o H+Al é ligeiramente diminuído com o aumento de carvão, variável ortogonal (independente) a esta primeira componente no 1º ano. Ainda neste eixo, a M.O., que era centralizada no primeiro gráfico, agora passa a ter grande inércia, crescendo com o aumento de carvão. Isso é extremamente interessante para a fertilidade e qualidade do solo, sendo a M.O. um importante componente das mesmas. Esse efeito do carvão, em médio prazo, pode ser explicado pelo efeito elucidado em CP1, poder de retenção do carvão, ou pela transformação de parte do carbono pirogênico adicionado em moléculas orgânicas mais lábeis ou oxidáveis ou pelo efeito positivo do carvão no carbono da biomassa microbiana (Hamer et al., 2004) ou na dinâmica do carbono favorecendo mais rápida (e em maiores quantidades) a transformação da M.O. fresca em frações mais estáveis como foi observado por Sohi et al. (2008) em Terra Preta. A transformação do carvão no solo pode ser também qualitativo no nível molecular pela ação de diferentes grupos de microrganismos, enzimas, da fauna do solo e de fatores abióticos tais como: temperatura, irradiação solar e reações químicas (Madari et al., 2009).

A mudança da importância do carvão do 1° para o 3° ano do experimento pode ser observada também nos valores dos carregamentos de fatores (Tabela 3.4): no 1° ano o NPK e o carvão mostram efeito similar, o NPK um pouco maior que o carvão para, principalmente as variáveis fisiológicos na fase vegetativa da planta (ALTV4 e MSV4) e pH, Ca, Mg, Al e K. Não mostram efeito para a acidez potencial (H+Al) e para a matéria orgânica do solo (M.O.). No 3° ano, o carvão teve efeito mais forte que o NPK e principalmente para o pH, Ca, Mg, Al, Fe e M.O.

Tabela 3.4. Coordenadas (carregamentos) dos fatores das variáveis de fisiologia e da fertilidade do solo analisadas em conjunto, em base de correlações no 1º e 3° ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo(2008/2009).

Variáveis	Ano 1		Ano 3	
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2
ALTV4	-0,7426	0,04329	-0,5214	-0,6702

Continua...

Tabela 3.4. Continuação.

Variáveis	Ano 1		Ano 3	
	Fator	Fator 2	Fator 1	Fator 2
ALTR1	-0,5349	0,6270	-0,5771	-0,6281
MSV4	-0,7284	0,4581	-0,6312	-0,5938
MSR1	-0,4507	0,5876	-0,6077	-0,4923
PROD	-0,4506	0,1376	-0,5620	-0,2719
pH	-0,7306	-0,5814	-0,8758	0,3097
Ca	-0,8970	-0,3475	-0,8573	0,3811
Mg	-0,8976	-0,3491	-0,8926	0,3718
Al	-0.8566	-0,3592	0,7916	-0,4014
H+Al	0,0379	0,6711	0,3395	-0,4501
P	-0,2712	0,0506	-0,4107	0,0552
K	-0,7604	-0,0140	-0,4077	0,1829
Cu	0,1067	0,2346	0,2533	-0,2990
Fe	0,6150	-0,1575	0,7060	0,0940
Mn	-0,4300	-0,0255	-0,0329	0,5329
M.O.	0,0882	-0,0187	-0,8412	0,0170
% da variância	36,80	14,99	39,60	16,72
*NPK	-0,3535	0,3541	-0,3144	-0,4685
*CARVÃO	-0,2500	0,2831	-0,7793	0,0725

ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja, pH: reação química do solo, Ca: cálcio (Ca^{2+}); Mg: magnésio (Mg^{2+}), Al: alumínio (Al^{3+}), H+Al: acidez potencial, P: fósforo disponível, K: potássio, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, M.O.: matéria orgânica. * variáveis suplementares.

Na análise de agrupamento (Tabela 3.5), obteve-se três grupos principais, sendo o 1º grupo com características similares ao grupo de maior produtividade do 1º ano. Isto é, apresenta médias, em geral, maiores que a média geral para as diferentes variáveis, exceto para o K, Cu, Fe, Al e H+Al (sendo isso efeito positivo para as últimas duas variáveis).

O efeito no NPK é sinérgico ao carvão, contudo percebe-se, no experimento e na CP2 que indivíduos com o nível 5 de NPK não são os de maiores respostas fisiológicas. Depois que a concentração de um mineral essencial passa do ótimo, o ser vivo sofrerá

efeitos tóxicos (Roat-Malone, 2003). A regressão univariada entre produtividade e adição de NPK (00-18-18), para os mesmos dados, indicam máxima produção em 236 kg ha^{-1} (Madari et al., 2008), justamente na região acusada pela multivariada, que seria entre os níveis 3 e 5. Como não foi observado região de máxima produtividade para o carvão, estudos futuros deverão contemplar níveis acima de 16 Mg ha^{-1}.

Tabela 3.5. Médias das variáveis de fisiologia e fertilidade do solo (0-20 cm) por agrupamento e média geral de todas as amostras, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT**.**

Variável	Médias			
	Grupo 1 (n=28)	Grupo 2 (n=37)	Grupo 3 (n=35)	Geral (n=100)
ALTV4	20,07	19,02	17,70	18,85
ALTR1	81,40	81,35	76,62	79,71
MSV4	9,42	8,71	7,74	8,57
MSR1	88,34	85,43	80,34	84,46
PROD	2639,86	2410,65	2163,40	2388,29
pH	5,41	5,27	4,95	5,20
Ca	1,88	1,53	1,21	1,52
Mg	0,72	0,64	0,51	0,62
Al	0,13	0,19	0,22	0,18
H+Al	4,60	4,61	4,55	4,59
P	8,19	7,76	6,94	7,59
K	96,39	91,08	89,49	92,01
Cu	0,98	1,01	1,10	1,03
Fe	27,51	32,24	42,04	34,36
Mn	25,80	26,85	28,17	27,02
M.O.	17,11	15,81	14,37	15,67

ALTV4: altura da soja na fase vegetativa 4, ALTR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, MSV4: massa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, MSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, PROD: produtividade da soja, pH: reação química do solo, Ca: cálcio (Ca^{2+}); Mg: magnésio (Mg^{2+}), Al: alumínio (Al^{3+}), H+Al: acidez potencial, P: fósforo disponível, K: potássio, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, M.O.: matéria orgânica. * variáveis suplementares.

3.3.2 Efeito do carvão vegetal nas propriedades de fertilidade do solo no 1° ano

No 1° ano (safra 2006/2007) quando avaliados os atributos químicos do solo, houve diferença significativa para os teores de C total na profundidade de 0-10 cm, Ca, Mg e C (10-20 cm) e Mg (20-30cm) quando aplicado diferentes doses de carvão, e interação significativa entre os fatores doses de carvão e adubação de base para os nutrientes K e H+Al (0-10cm) e K e Mg (10-20 cm) (Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8). Esses dados corroboram

com os obtidos por Topoliantz et al. (2005) que verificaram níveis elevados de Ca e Mg e C total após a aplicação de carvão e por Novak et al. (2009) que observaram aumento nos teores de Ca, K e P. Assim como nesse experimento, esses mesmos autores não observaram efeito para os micronutrientes Cu, Mn e Zn, 67 dias após a aplicação de 0%, 5%, 1% e 2 % de biochar de serragem por volume, respectivamente.

Tabela 3.6. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm, cultivado com soja na safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	0,66^{ns}	4,68*	3,54**	3,81*	1,14^{ns}	1,84^{ns}	1,76^{ns}
Carvão vegetal	1,79^{ns}	0,07^{ns}	1,37^{ns}	1,37^{ns}	2,07***	1,46^{ns}	1,55^{ns}
Adubação x carvão	1,49^{ns}	0,09^{ns}	0,93^{ns}	1,81**	0,93^{ns}	1,02^{ns}	0,99^{ns}
C.V.	4,89	43,23	43,16	21,05	31,50	27,87	115,35
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	C	M.O.	
Adubação	0,59^{ns}	2,37**	0,29^{ns}	2,48**	3,64*	2,29***	-
Carvão vegetal	0,39^{ns}	0,42^{ns}	0,25^{ns}	0,09^{ns}	6,65*	0,42^{ns}	-
Adubação x carvão	1,81**	1,31^{ns}	0,48^{ns}	1,05^{ns}	1,05^{ns}	1,39^{ns}	-
C.V.	16,03	37,23	20,69	21,97	15,29	3,49	-

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Tabela 3.7. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm, cultivado com soja na safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	1,67^{ns}	3,13**	2,03***	6,87*	3,76*	1,94^{ns}	1,06^{ns}
Carvão vegetal	2,05***	1,82^{ns}	0,79^{ns}	0,77^{ns}	2,79**	2,67**	4,09*
Adubação x carvão	1,35^{ns}	0,64^{ns}	0,75^{ns}	2,98*	1,32^{ns}	1,80**	1,45^{ns}
C.V.	5,24	19,84	66,31	21,97	39,07	31,94	64,03
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	C	M.O.	
Adubação	0,35^{ns}	1,01^{ns}	0,76^{ns}	0,55^{ns}	2,50**	0,30^{ns}	-
Carvão vegetal	0,47^{ns}	0,34^{ns}	0,72^{ns}	1,56^{ns}	2,83**	1,45^{ns}	-

Continua...

Tabela 3.7. Continuação.

Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	C	M.O.	
Adubação x carvão	1,18^{ns}	0,66^{ns}	0,61^{ns}	1,14^{ns}	0,95^{ns}	1,39^{ns}	-
C.V.	17,13	33,97	24,64	19,35	18,95	3,93	-

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Tabela 3.8. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm, cultivado com soja na safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	1,65^{ns}	1,04^{ns}	0,35^{ns}	4,67*	3,83*	1,97^{ns}	0,47^{ns}
Carvão vegetal	2,48***	0,99^{ns}	0,55^{ns}	1,73^{ns}	1,92^{ns}	2,49**	2,33***
Adubação x carvão	1,43^{ns}	0,99^{ns}	0,86^{ns}	1,20^{ns}	0,91^{ns}	1,26^{ns}	1,60***
C.V.	4,67	546,55	44,43	24,02	44,60	30,48	53,09
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	C	M.O.	
Adubação	0,68^{ns}	0,85^{ns}	1,17^{ns}	0,81^{ns}	1,03^{ns}	0,24^{ns}	-
Carvão vegetal	0,84^{ns}	0,58^{ns}	0,53^{ns}	0,92^{ns}	0,98^{ns}	0,38^{ns}	-
Adubação x carvão	1,15^{ns}	1,11^{ns}	0,40^{ns}	0,79^{ns}	0,99^{ns}	1,19^{ns}	-
C.V.	15,35	34,08	14,94	23,34	367,45	7,27	-

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Com exceção do C total que teve seu teor no solo aumentado de 2,6% para 3,2% na profundidade de 0-10 cm com a aplicação de 8 t ha^{-1} e 16 t ha^{-1} de carvão (Figura 3.6), os demais nutrientes apesar de detectado diferença significativa na ANAVA, não foram significativos quando submetidos ao teste de médias (Tabelas 3.9, 3.10 e 3.11), isso ocorreu em função de altos valores de diferença mínima significativa (DMS). Esses dados corroboram os obtidos por Novak et al. (2009) que verificaram significativo aumento nos teores de C total com a aplicação de 1% e 2% de carvão, 67 dias após a aplicação, com níveis de C total em torno de 2,9% a 3,2%. Já, Oguntunde et al. (2004) não verificaram aumento no teor de C total na camada de 0-10 cm, após incorporação da queimada da vegetação, fato este deivido a queimada total da vegetação, virou cinzas, não havendo transformação do material em carbono pirogênico (grau de aromaticidade). Isso pode ter levado a uma perda de carbono na forma de CO_2 para a atmosfera.

Tabela 3.9. Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H_2O)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,97	A	0,41	A	14,14	A	120	A	3,05	A	0,93	A	0,05	A
2	5,80	A	0,40	A	16,52	A	116	A	2,51	A	0,79	A	0,05	A
4	5,88	A	0,39	A	12,81	A	131	A	2,50	A	0,81	A	0,05	A
8	6,00	A	0,42	A	15,53	A	132	A	3,09	A	0,92	A	0,03	A
16	5,99	A	0,41	A	12,91	A	127	A	2,83	A	0,92	A	0,02	A
	H+Al		Fe		Cu		Mn		C		M.O.			
	cmolc dm^{-3}				mg dm^{-3}				%		g dm^{-3}			
0	4,35	A	41,45	A	1,61	A	50,95	A	2,68	AB	16,25	A	-	-
2	4,55	A	39,70	A	1,53	A	50,60	A	2,66	A	16,15	A	-	-
4	4,46	A	40,70	A	1,54	A	49,35	A	2,63	A	16,10	A	-	-
8	4,41	A	37,30	A	1,55	A	51,35	A	3,05	BC	16,30	A	-	-
16	4,30	A	36,55	A	1,51	A	50,90	A	3,16	C	16,15	A	-	-

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3.10. Atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H_20)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,85	A	0,14	A	6,62	A	82,90	A	1,72	A	0,51	A	0,13	A
2	5,66	A	0,14	A	5,48	A	78,00	A	1,30	A	0,41	A	0,23	B
4	5,67	A	0,14	A	5,30	A	76,35	A	1,31	A	0,43	A	0,17	AB
8	5,85	A	0,16	A	7,09	A	84,30	A	1,75	A	0,50	A	0,13	A
16	5,82	A	0,16	A	5,55	A	82,60	A	1,66	A	0,54	A	0,11	A
	H+Al		Fe		Cu		Mn		C		M.O.			
	cmolc dm^{-3}				mg dm^{-3}				%		g dm^{-3}			
0	4,40	A	58,70	A	1,69	A	37,90	A	1,67	A	11,15	A	-	-
2	4,65	A	52,40	A	1,48	A	35,20	A	1,78	A	11,45	A	-	-
4	4,65	A	55,85	A	1,60	A	34,80	A	1,67	A	11,30	A	-	-
8	4,44	A	57,15	A	1,60	A	39,05	A	1,96	A	11,20	A	-	-
16	4,58	A	54,10	A	1,62	A	38,80	A	1,88	A	11,20	A	-	-

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3.11. Atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H_20)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,74	A	0,08	A	1,62	A	51,35	A	1,12	A	0,35	A	0,16	A
2	5,56	A	0,59	A	1,79	A	47,20	A	0,87	A	0,28	A	0,25	A
4	5,53	A	0,08	A	1,45	A	42,90	A	0,77	A	0,27	A	0,22	A
8	5,66	A	0,08	A	1,63	A	47,70	A	0,97	A	0,31	A	0,19	A
16	5,71	A	0,08	A	1,65	A	50,85	A	1,01	A	0,33	A	0,17	A
	H+Al		Fe		Cu		Mn		C		M.O.			
	cmolc dm^{-3}						mg dm^{-3}		%		g dm^{-3}			
0	3,70	A	62,70	A	1,60	A	32,15	A	1,22	A	8,15	A	-	-
2	3,93	A	62,95	A	1,57	A	29,15	A	4,64	A	8,20	A	-	-
4	3,99	A	59,20	A	1,56	A	28,40	A	1,14	A	8,20	A	-	-
8	3,77	A	69,45	A	1,64	A	30,65	A	1,18	A	8,15	A	-	-
16	3,94	A	64,60	A	1,64	A	31,20	A	1,28	A	8,00	A	-	-

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se na Figura 3.6 que os teores de C total tendem a aumentar à medida que se aumenta a quantidade aplicada de carvão, entanto no solo estudado (textura média) essas respostas ocorrem com aplicações acima de 5 Mg ha^{-1}. Lehmann et al. (2003) também observaram acréscimo nos níveis de C total no solo com a aplicação de carvão, sendo que estes valores foram aproximadamente 5 vezes maiores que na testemunha. Todavia foram utilizadas proporções de 10% e 20% de carvão, o que representa, considerando a densidade do Latossolo em torno de 1,3 g cm^{-3}, o mesmo que aplicar 260 Mg ha^{-1} e 520 Mg ha^{-1} de carvão, valores bem superiores aos utilizados nesse experimento. Diante disso, pode-se considerar o comportamento linear da Figura 3.6, em que à medida que se aumenta as doses de carvão aumenta os teores de C total no solo.

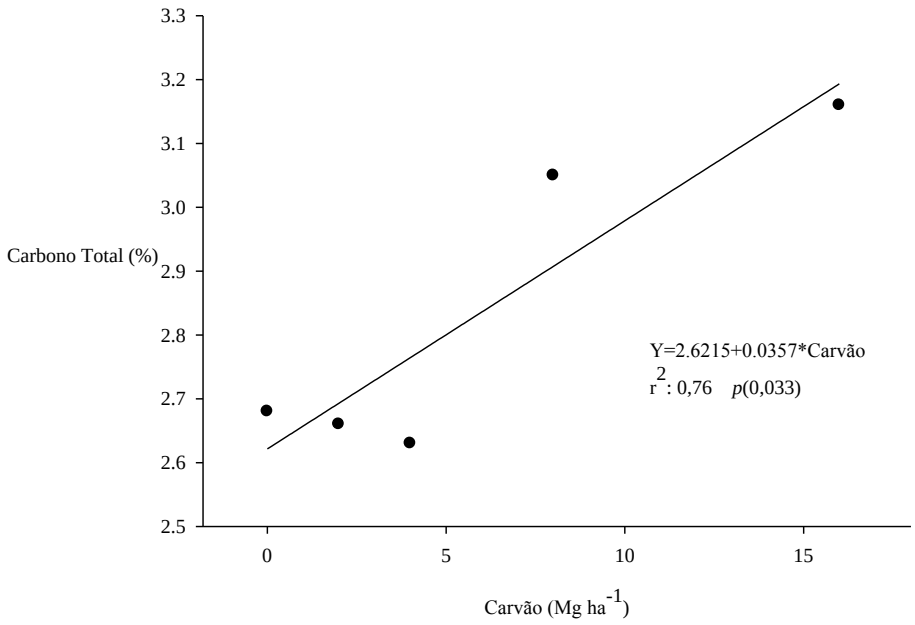

Figura 3.6. Teor de carbono no solo (0-10 cm) em função de diferentes doses de carvão pirogênico, safra 2006/2007.

As estruturas aromáticas do carvão (Madari et al., 2006), pode explicar esse aumento do teor de C total, devido a sua lenta degradação, mantendo-o persistente no solo. Apesar de altamente estável no solo, os carvões podem sofrer biodegradação e transformação (Madari et al., 2006) resultando no aumento da disponibilidade de sítios eletroquímicos. Vale ressaltar que o aumento, aliás, esperado no teor do C total na camada

de 0-10 cm do solo causado pela aplicação de carvão vegetal, não foi acompanhado pelo aumento do teor da matéria orgânica (M.O.). Isso pode ser explicado pela estabilidade do C contido no carvão vegetal que não é oxidável, ou somente pouco, pelo reagente utilizado na determinação da M.O., que é o dicromato de potássio, um agente oxidante, mas que não oxida o C nas estruturas aromáticas no carvão vegetal. Assim, com esse método (Walkley-Black modificado) não é possível medir o aumento no teor de C total no solo, somente do C que é oxidável com o dicromato.

Na interação dos fatores, observou-se diferença significativa para K (0-10 cm) apenas com a aplicação de carvão e ausência da adubação de base (Tabela 3.12). Junto com o carvão vegetal foi adicionado 5,48 kg; 10,96 kg; 21,92 kg e 43,84 kg K nos tratamentos com 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1} carvão. Isso provavelmente contribuiu para que o carvão apresentasse efeito significativo para os teores de K disponível onde não houve aplicação de NPK. Onde houve aplicação de adubo mineral, o efeito disso (K aplicado) desmascarou o efeito do K adicionado com o carvão. Já na profundidade de 10-20 cm observou-se maior disponibilidade de K na ausência de carvão e com aplicação de 200 kg ha^{-1} de adubo na base, com comportamento semelhante para as adubações de base de 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} (Tabela 3.12). Tal fato pode estar associado à maior retenção de K pelo carvão na camada de 0-10 cm, diminuindo a lixiviação do mesmo para a camada de 10-20 cm, explicando os maiores teores desse nutriente nessa camada quando não se aplicou o carvão. Segundo Kishimoto & Sugira (1985), o carvão apresenta uma superfície específica variando de 200 m^2 g^{-1} - 400 m^2 g^{-1} o que pode favorecer o aumento da CTC e conseqüentemente maior retenção de cátions.

Houve um decréscimo na acidez potencial (H+Al) (0-10 cm) na interação doses de carvão e adubo de base, com efeito significativo na dose de 8 Mg ha^{-1} de carvão combinada com 300 kg ha^{-1} de adubo de base (Tabela 3.12). Efeito semelhante foi relatado por Madari et al. (2006) com aplicação de 21 Mg ha^{-1} de carvão em solo argiloso, atribuindo este efeito ao poder tampão da matéria orgânica na forma de carvão. No entanto, de maneira geral, observa-se um aumento na acidez potencial à medida que se aumenta as quantidades de carvão até o máximo de 8 Mg ha^{-1}. Elevados teores de Al foram também observados por Rondon et al. (2006). Isso indica um efeito de dissolução de nutrientes na solução do solo, onde a maior retenção de nutrientes pelas estruturas de superfície do carvão levaria a um aumento na absorção de nutrientes e maiores disponibilidades de sítios reativos na superfície das argilas para se ligarem a H e Al. Efeito este que pode ser

elucidado pelos menores teores de Ca e Mg, a medida que se aumentou as quantidades de carvão, apesar de não apresentarem diferença estatística no teste de médias (Tabela 3.9). No mesmo trabalho, Rondon et al. (2006) encontraram menores níveis de Ca com aplicação de carvão ao solo e cultivo com feijão (*Phaseolus vulgaris*) com doses de até 30 Mg ha^{-1}. Comportamento semelhante ocorreu para Mg (10-20 cm), com o menor teor na dose de 4 Mg ha^{-1} e 8 Mg ha^{-1}, respectivamente, aplicados com 300 kg ha^{-1}de adubo de base (Tabela 3.12).

Tabela 3.12. Atributos químicos do solo em diferentes profundidades em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicada, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Adubação base NPK (kg ha^{-1})				
	0	100	200	300	400
	K (mg dm^{-3}) 0-10cm				
0	88 A	97 A	155 A	145 A	113 A
2	93 A	109 A	133 A	129 A	119 A
4	121 AB	114 A	152 A	126 A	144 A
8	154 B	102 A	120 A	130 A	152 A
16	117 AB	131 A	118 A	127 A	140 A
	H+Al (cmolc dm^{-3}) 0-10cm				
0	5,05 A	4,25 A	4,36 A	4,80 AB	3,32 A
2	4,19 A	4,46 A	4,83 A	4,62 AB	4,69 A
4	4,53 A	3,96 A	4,41 A	5,10 B	4,33 A
8	4,44 A	4,78 A	4,62 A	3,53 A	4,71 A
16	4,32 A	3,99 A	4,22 A	4,59 AB	4,37 A
	K (mg dm^{-3}) 10-20cm				
0	52 A	65 A	103 B	111 B	81 AB
2	62 A	81 A	62 A	92 AB	91 AB
4	62 A	87 A	83 AB	70 A	79 A
8	83 A	65 A	72 AB	85 AB	114 B
16	72 A	92 A	65 A	89 AB	93 AB
	Mg (cmolc dm^{-3}) 10-20cm				
0	0,33 A	0,36 A	0,59 A	0,63 AB	0,64 A
2	0,38 A	0,38 A	0,35 A	0,43 AB	0,51 A
4	0,47 A	0,44 A	0,45 A	0,37 A	0,41 A
8	0,49 A	0,35 A	0,40 A	0,72 B	0,55 A
16	0,52 A	0,57 A	0,64 A	0,50 AB	0,47 A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Doses elevadas (acima de 30 Mg ha^{-1}) são utilizadas na maioria dos trabalhos com carvão, no entanto doses abaixo deste valor podem não revelar efeitos significativos e tão evidentes a curto prazo, principalmente em solos com teores médios de argila (350 g kg^{-1}) e cultivados a vários anos. Contudo comportamento diferenciado pode ser observado

em solos arenosos, principalmente pH e disponibilidade de bases, como observado por Tryon, (1948) e Glaser et al. (2002).

3.3.3 Efeito do carvão vegetal nas propriedades de fertilidade do solo no 3° ano

Não houve efeito significativo do carvão nas propriedades de fertilidade do solo no 3° ano, nas profundidades avaliadas (Tabelas 3.13, 3.14 e 3.15). Efeito contrário do observado no 1° ano nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, apesar de não haver significância na camada de 0-10 cm (Tabela 3.12). Já, Kishimoto & Sugira (1985) observaram efeito positivo do carvão após três anos de sua aplicação, com efeito significativo na disponibilidade de bases (Ca, Mg e K) e pH. Vale ressaltar que a maior parte dos trabalhos com aplicação de carvão no solo relaciona-se a doses acima de 60 Mg ha^{-1} (Tryon, 1948; Kishimoto & Sugira ,1985; Mbagwu & Piccolo, 1997; Rondon et al., 2006; Gundale & DeLuca, 2007), bem acima das quantidades utilizadas nesse experimento e também há o fato desse ser realizado em solo cultivado há vários anos com soja, ou seja, um solo de boa fertilidade e com uma CTC não muito baixa. O efeito da aplicação de carvão fica mais evidente em ambientes que limitam o crescimento das plantas, como solos ácidos e com altos teores de Al (Van Zwieten et al., 2010), além de solos com baixa CTC, característica da maioria do solos arenosos devido sua baixa área superficial específica e mineralogia.

Tabela 3.13. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm, cultivado com soja na safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	5,44*	$0,75^{ns}$	4,91*	8,91*	4,68*	4,99*	3,98*
Carvão vegetal	$1,16^{ns}$	$0,94^{ns}$	$0,16^{ns}$	$0,64^{ns}$	$1,21^{ns}$	$1,96^{ns}$	$1,31^{ns}$
Adubação x carvão	$0,80^{ns}$	$0,88^{ns}$	$0,71^{ns}$	2,08**	$0,51^{ns}$	$0,54^{ns}$	$0,50^{ns}$
C.V.	7,01	22,03	43,90	22,62	30,50	26,24	66,72
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	Zn	C	M.O.
Adubação	2,39***	$1,07^{ns}$	4,27*	$1,61^{ns}$	$1,44^{ns}$	$0,54^{ns}$	3,60*
Carvão vegetal	$0,87^{ns}$	$1,45^{ns}$	$1,04^{ns}$	$0,53^{ns}$	$1,57^{ns}$	$1,08^{ns}$	$0,40^{ns}$
Adubação x carvão	$1,17^{ns}$	$0,87^{ns}$	$1,35^{ns}$	$0,62^{ns}$	$1,29^{ns}$	$1,06^{ns}$	$0,70^{ns}$
C.V.	16,53	24,14	36,42	25,67	41,46	22,76	9,73

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Tabela 3.14. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm, cultivado com soja na safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	4,94*	0,28^{ns}	0,50^{ns}	12,14*	2,45**	1,88^{ns}	2,31***
Carvão vegetal	0,64^{ns}	0,53^{ns}	0,59^{ns}	1,03^{ns}	0,92^{ns}	0,47^{ns}	0,45^{ns}
Adubação x carvão	0,58^{ns}	0,77^{ns}	0,74^{ns}	1,64***	0,33^{ns}	0,42^{ns}	0,41^{ns}
C.V.	7,66	25,02	61,33	24,41	46,09	37,68	63,88
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	Zn	C	M.O.
Adubação	1,71^{ns}	2,18***	1,98^{ns}	1,83^{ns}	1,70^{ns}	0,22^{ns}	1,13^{ns}
Carvão vegetal	0,33^{ns}	0,90^{ns}	0,16^{ns}	0,45^{ns}	1,33^{ns}	0,68^{ns}	0,35^{ns}
Adubação x carvão	0,58^{ns}	0,83^{ns}	1,12^{ns}	0,34^{ns}	1,28^{ns}	0,88^{ns}	0,65^{ns}
C.V.	17,81	30,10	21,82	30,41	87,79	24,90	6,48

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Tabela 3.15. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm, cultivado com soja na safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	3,58^{ns}	0,62^{ns}	2,30***	11,45*	2,98**	2,44***	2,54**
Carvão vegetal	1,48^{ns}	1,56^{ns}	1,05^{ns}	0,91^{ns}	1,62^{ns}	1,23^{ns}	1,10^{ns}
Adubação x carvão	0,67^{ns}	0,74^{ns}	0,74^{ns}	1,36^{ns}	0,56^{ns}	0,53^{ns}	0,41^{ns}
C.V.	6,28	23,27	66,60	26,79	52,59	35,55	52,70
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	Zn	C	M.O.
Adubação	0,24^{ns}	2,08***	1,63^{ns}	2,19***	2,05***	0,07^{ns}	1,58^{ns}
Carvão vegetal	1,42^{ns}	0,53^{ns}	0,63^{ns}	0,69^{ns}	0,79^{ns}	2,84**	0,17^{ns}
Adubação x carvão	1,00^{ns}	0,84^{ns}	0,44^{ns}	1,14^{ns}	0,56^{ns}	0,93^{ns}	0,51^{ns}
C.V.	17,95	36,59	20,13	45,29	33,41	22,37	11,42

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Tabela 3.16. Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H_20)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,24	A	0,26	A	11,33	A	113	A	2,54	A	0,76	A	0,14	A
2	5,09	A	0,26	A	10,53	A	107	A	2,25	A	0,68	A	0,16	A
4	5,09	A	0,27	A	11,41	A	119	A	2,20	A	0,70	A	0,14	A
8	5,28	A	0,26	A	11,55	A	117	A	2,58	A	0,79	A	0,12	A
16	5,21	A	0,24	A	10,80	A	113	A	2,56	A	0,83	A	0,10	A

	H+Al		Fe		Cu		Mn		Zn		C		M.O.	
	cmolc dm^{-3}						mg dm^{-3}				%		g dm^{-3}	
0	4,51	A	30,80	A	1,01	A	31,80	A	28,64	A	3,04	A	17,95	A
2	4,87	A	31,70	A	1,15	A	31,80	A	23,38	A	3,01	A	17,90	A
4	4,65	A	31,30	A	1,11	A	31,10	A	27,39	A	3,09	A	18,30	A
8	4,46	A	27,05	A	0,95	A	28,90	A	21,57	A	3,02	A	18,35	A
16	4,57	A	28,85	A	0,98	A	32,10	A	24,18	A	2,70	A	17,80	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3.17. Atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H_20)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,28	A	0,24	A	4,26	A	68,85	A	1,75	A	0,50	A	0,22	A
2	5,12	A	0,26	A	4,17	A	65,10	A	1,37	A	0,44	A	0,27	A
4	5,16	A	0,26	A	3,56	A	74,45	A	1,39	A	0,44	A	0,23	A
8	5,28	A	0,27	A	3,69	A	67,20	A	1,53	A	0,47	A	0,22	A
16	5,20	A	0,25	A	4,61	A	72,70	A	1,53	A	0,49	A	0,22	A

	H+Al		Fe		Cu		Mn		Zn		C		M.O.	
	cmolc dm^{-3}						mg dm^{-3}				%		g dm^{-3}	
0	4,64	A	40,10	A	1,03	A	23,65	A	14,08	A	2,79	A	13,40	A
2	4,54	A	39,00	A	1,03	A	23,35	A	11,46	A	3,11	A	13,30	A
4	4,51	A	42,05	A	0,99	A	23,75	A	12,51	A	3,05	A	13,25	A
8	4,42	A	35,70	A	1,01	A	21,25	A	18,78	A	3,11	A	13,35	A
16	4,67	A	37,10	A	1,04	A	22,50	A	11,27	A	2,92	A	13,10	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3.18. Atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H_20)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,27	A	0,24	A	1,43	A	43,95	A	1,10	A	0,36	A	0,22	A
2	5,11	A	0,27	A	1,26	A	42,75	A	0,81	A	0,31	A	0,26	A
4	5,05	A	0,28	A	1,51	A	49,10	A	0,76	A	0,29	A	0,27	A
8	5,21	A	0,25	A	1,39	A	46,50	A	1,00	A	0,35	A	0,20	A
16	5,11	A	0,27	A	1,86	A	47,80	A	0,94	A	0,34	A	0,22	A
	H+Al		Fe		Cu		Mn		Zn		C		M.O.	
	cmolc dm^{-3}				mg dm^{-3}						%		g dm^{-3}	
0	3,71	A	45,00	A	1,18	A	19,20	A	38,17	A	2,74	A	9,00	A
2	3,75	A	45,95	A	1,19	A	18,55	A	34,00	A	3,22	A	8,90	A
4	3,88	A	46,25	A	1,22	A	17,60	A	33,89	A	3,26	A	9,15	A
8	3,63	A	43,55	A	1,19	A	18,15	A	37,63	A	2,79	A	9,05	A
16	4,10	A	50,90	A	1,29	A	21,60	A	33,08	A	3,21	A	9,10	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Efeito significativo foi verificado para K (0-10 cm) na interação doses de carvão com adubo de base, com maior disponibilidade na dose de 4 Mg ha^{-1} em conjunto com 300 kg ha^{-1} de adubo de base (Tabela 3.19). Resultados semelhantes foram obtidos por Lehmann et al. (2003), com a aplicação de uma mistura de carvão e fertilizantes, onde verificaram aumento nos teores de K mas não verificaram aumento para Ca, Mg e P. O fato do K ser móvel no solo, passível de lixiviação, pode ter levado o mesmo a se ligar a superfície com carga do carvão, uma vez que estes autores verificaram que a relação absorção de nutrientes-lixiviação aumentou com a aplicação de carvão. Possivelmente, após esses três anos de aplicação do carvão ao solo, sítios quimicamente reativos foram criados em função da oxidação parcial das estruturas aromáticas e a degradação de compostos condensáveis de alcatrão e outros produtos da decomposição que estavam nos espaços porosos, retendo o K do adubo de base no momento de sua solubilização e evitando que o mesmo lixiviasse. Segundo Glaser et al. (2000, 2001a), a oxidação lenta das bordas das estruturas aromáticas do carvão levam a formação de grupos carboxílicos e fenólicos, responsáveis pela formação de complexos organo-minerais e aumento da CTC. O carvão vegetal apresenta uma elevada superfície interna que aumenta progressivamente à medida que suas estruturas são oxidadas (Carcaillet & Thinon, 1996; Chan et al., 1999).

Tabela 3.19. Teores de potássio no solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Adubação base NPK (kg ha^{-1})				
	0	100	200	300	400
	K (mg dm^{-3}) 0-10cm				
0	105 A	96 A	138 A	132 AB	96 A
2	101 A	68 A	116 A	119 A	130 A
4	94 A	83 A	118 A	176 B	124 A
8	124 A	98 A	120 A	124 A	121 A
16	81 A	115 A	106 A	126 AB	139 A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

3.3.4 Efeito do carvão vegetal no desenvolvimento e produtividade da soja

Os parâmetros fisiológicos (altura V4 e R1, biomassa seca V4 e R1 e produtividade) do 1° ano (safra 2006/2007) e 3° ano (safra 2008/2009) após incorporação do carvão vegetal ao solo foram significativamente influenciados pela aplicação de carvão, e como já esperado, também pela adubação de base, com comportamento semelhante em ambos os anos, contudo não houve efeito significativo na interação dos fatores doses de carvão e adubo de base até o nível de 5% (Tabelas 3.20 e 3.21). Esses resultados confirmam os obtidos por diversos autores (Tryon, 1948; Iswaran et al., 1980; Kishimoto & Sugira, 1985) os quais relatam efeito significativo da aplicação de carvão na fisiologia e produtividade da soja. Outras leguminosas como feijão também tiveram parâmetros fisiológicos influenciados pela aplicação de carvão (Topoliantz et al., 2005).

Para a altura e matéria seca das plantas, tanto no estágio V4 quanto no R1, a adubação de base teve maior efeito que o carvão (valores F nas Tabelas 3.20 e 3.21) que indica que apenas o carvão vegetal não fornece K, e principalmente P, para o desenvolvimento da parte vegetativa na mesma maneira que a adubação mineral. Entretanto, não necessariamente a maior altura e maior acúmulo de matéria seca levam a uma maior produtividade (Mitchel, 1979). Produções elevadas de matéria seca implicam em maior gasto de manutenção do dossel (Taiz & Zeiger, 2004), e menor alocação de fotoassimilados nos grãos.

O carvão vegetal teve maior efeito na produtividade da soja (Tabelas 3.20 e 3.21) ao longo dos dois anos da avaliação.

Tabela 3.20. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na produtividade e fisiologia da soja, safra 2006/2007, em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	Produtividade	Altura	
		V4	R1
Adubação	5,76*	11,86*	28,57*
Carvão vegetal	10,02*	8,42*	7,22*
Adubação x carvão	0,31^{ns}	0,61^{ns}	0,54^{ns}
C.V.	4,69	6,87	5,69
Causas da variação		Matéria seca	
		V4	R1
Adubação	-	14,93*	8,32*
Carvão vegetal	-	6,60*	8,24*
Adubação x carvão	-	0,43^{ns}	0,47^{ns}
C.V.	-	13,37	10,36

*, ** e *** significativo a 1%, 5% e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo.
V4 e R1 – estágios fenológicos da cultura da soja. V4: terceiro trifólio totalmente aberto; R1: plena floração.

Tabela 3.21. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na produtividade e fisiologia da soja, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	Produtividade	Altura	
		V4	R1
Adubação	6,31*	13,89*	29,17*
Carvão vegetal	9,71*	8,42*	7,18*
Adubação x carvão	0,32^{ns}	0,62^{ns}	0,53^{ns}
C.V.	6,08	7,08	5,85
Causas da variação		Matéria seca	
		V4	R1
Adubação	-	14,60*	8,91*
Carvão vegetal	-	6,85*	8,26*
Adubação x carvão	-	0,45^{ns}	0,47^{ns}
C.V.	-	13,93	10,78

*, ** e *** significativo a 1%, 5% e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo.
V4 e R1 – estágios fenológicos da cultura da soja. V4: terceiro trifólio totalmente aberto; R1: plena floração.

Analisando, todavia, a diferença entre as médias, as maiores doses de carvão aplicadas tiveram, na maioria dos casos, efeito significativo para a altura e matéria seca das plantas. No 1° e 3° ano as maiores alturas nas plantas de soja no estágio V4 foram verificados com a aplicação de 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1} de carvão, já no estágio R1

verificou-se efeito apenas com a dose de 16 Mg ha^{-1} (Tabelas 3.22 e 3.24). Resultados semelhantes foram obtidos por Topoliantz et al. (2005) na cultura do feijoeiro, no entanto foram avaliados outros parâmetros fisiológicos tais como número e peso de vagens, relação produtividade-massa de vagens, produtividade-massa de raiz e nódulos nas raízes.

Os acúmulos de matéria seca (V4 e R1) das plantas de soja no 1° e 3° ano foram significativamente superiores nas doses de 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1} (Tabelas 3.22 e 3.24). Em espécies com o metabolismo de fixação do carbono via C3, que geralmente compõe as leguminosas, diversos trabalhos comprovam esses resultados (Tryon, 1948; Iswaran et al., 1980; Kishimoto & Sugira, 1985; Chidumayo 1994; Glaser et al., 2002; Topoliantz et al., 2005; Van Zwieten et al., 2010), evidenciando uma maior produção de matéria seca de culturas anuais e perenes. O maior crescimento em altura e maior acúmulo de matéria seca podem estar relacionados ao fato de que o carvão pode ter contribuído para uma maior absorção de nutrientes do solo. Fato este que pode ser comprovado pelo teor dos nutrientes no solo e tecido vegetal, mesmo não detectado diferenças significativas, alguns nutrientes como Ca, Mg, P, Fe e Cu apresentaram seus teores diminuídos no solo e aumentados nas folhas respectivamente (Tabelas 3.9, 3.16 e 3.23), indicando portanto maior absorção dos mesmos pelas plantas, com exceção de Mn que teve suas concentrações reduzidas nos tecidos foliares. Resultado semelhante foi verificado por Rondon et al. (2006) com maiores teores de Ca, Mg, K, P, Fe e Cu e menores de Zn e Mn em folhas de feijoeiro. Outra possível explicação seria o efeito eletrofisiológico do carvão vegetal para as plantas, fenômeno similar observado para as substâncias húmicas (por ex. Nardi et al., 2002) que diminuiria a energia gasta pelas plantas para a absorção da quantidade necessária de nutrientes.

As baixas produtividades observadas no 3° ano (Tabela 3.24) são em função de um longo período de estiagem nessa safra, que ocorreu no florescimento e no enchimento de grãos da cultura (Figura 3.2), aumentando o abortamento de flores e diminuindo o peso dos mesmos. A estiagem ocorreu após o máximo acúmulo de matéria seca (inicio do florescimento), portanto não se observou um decréscimo acentuado nesse parâmetro quando comparado ao 1° ano. Segundo Taiz & Zeiger (2004) a partição de fotoassimilados seguem padrões anatômicos e de desenvolvimento, seguindo uma relação fonte-dreno. No entanto, os drenos (grãos) foram reduzidos em função do abortamento de flores causados pela estiagem e a matéria seca acumulada foi perdida na respiração ocasionada pelo aumento de temperatura (Figura 3.2).

Tabela 3.22. Produtividade, altura das plantas e matéria seca da soja em função das doses de carvão, safra 2006/2007em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Produtividade (Kg ha^{-1})		Altura (cm)			
			V4		R1	
0	2905	A	18,26	A	78,53	A
2	2959	AB	19,37	AB	80,22	A
4	3017	AB	19,26	AB	81,79	A
8	3052	BC	19,58	BC	81,49	A
16	3169	C	20,69	C	86,05	B
Carvão (Mg ha^{-1})			Matéria seca (g 10^{-1} plantas)			
			V4		R1	
0	-	-	8,33	A	83,23	A
2	-	-	8,65	AB	82,60	A
4	-	-	8,90	AB	87,02	A
8	-	-	9,44	BC	90,33	AB
16	-	-	10,10	C	96,88	B

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.
V4 e R1 – estágios fenológicos da cultura da soja. V4: terceiro trifólio totalmente aberto; R1: plena floração.

Tabela 3.23. Teor foliar dos nutrientes em função das doses de carvão aplicadas, safra 2006/2007 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Ca		Mg		P		K		Fe		Cu		Mn		Zn	
	g kg^{-1}								mg kg^{-1}							
0	10,1	A	3,41	A	3,10	A	22,6	A	116	A	12,8	A	82	A	50	A
2	10,0	A	3,48	A	3,13	A	22,9	A	117	A	12,9	A	82	A	50	A
4	9,94	A	3,33	A	3,15	A	22,8	A	115	A	13,3	A	83	A	50	A
8	10,3	A	3,45	A	3,16	A	23,7	A	119	A	13,7	A	82	A	48	A
16	10,5	A	3,41	A	3,48	A	24,0	A	118	A	14,2	A	78	A	48	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3.24. Produtividade, altura das plantas e matéria seca da soja em função das doses de carvão, safra 2008/2009em Nova Xavantina, MT.

Carvão (ton ha^{-1})	Produtividade (Kg ha^{-1})		Altura (cm)			
			V4		R1	
0	2271	A	17,65	A	76,63	A
2	2326	AB	18,83	AB	78,27	A
4	2383	AB	18,70	AB	79,89	A
8	2421	BC	18,99	BC	79,59	A
16	2538	C	20,09	C	84,15	B
Carvão (ton ha^{-1})			Matéria seca (g 10^{-1} plantas)			
			V4		R1	
0	-	-	7,81	A	79,05	A
2	-	-	8,13	AB	79,67	A
4	-	-	8,38	AB	83,47	A
8	-	-	8,92	BC	86,78	AB
16	-	-	9,58	C	93,32	B

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.
V4 e R1 – estágios fenológicos da cultura da soja. V4: terceiro trifólio totalmente aberto; R1: plena floração.

As baixas produtividades observadas no 3° ano (Tabela 3.24) são em função de um longo período de estiagem nessa safra, que ocorreu no florescimento e no enchimento de grãos da cultura (Figura 3.2), aumentando o abortamento de flores e diminuindo o peso dos mesmos. A estiagem ocorreu após o máximo acúmulo de matéria seca (inicio do florescimento), portanto não se observou um decréscimo acentuado nesse parâmetro quando comparado ao 1° ano. Segundo Taiz & Zeiger (2004) a partição de fotoassimilados seguem padrões anatômicos e de desenvolvimento, seguindo uma relação fonte-dreno. No entanto, os drenos (grãos) foram reduzidos em função do abortamento de flores causados pela estiagem e a matéria seca acumulada foi perdida na respiração ocasionada pelo aumento de temperatura (Figura 3.2).

Esses dados mostram um comportamento linear (Figuras 3.7 e 3.8) em relação à aplicação de carvão, ou seja, à medida que se aumentam as doses de carvão aumenta-se a altura e matéria seca das plantas. Comportamento diferenciado pode ser verificado para a produtividade, em que o aumento da mesma vai até certa dose de carvão, depois tende a reduzir como mostra a equação quadrática (Figuras 3.7 e 3.8). Reduções nas produtividades de soja e milho foram verificadas quando aplicadas altas doses de carvão (Kishimoto & Sugira, 1985) e na presença de elevados teores de ácidos húmicos (Mbagwu & Picollo 1997). Elevadas quantidades de carvão e de ácidos húmicos podem levar a um aumento do pH e conseqüentemente menor disponibilidade de micronutrientes para as plantas, reduzindo a produtividade. Esses autores, anteriormente citados, atribuem o fato à deficiência induzida de nutrientes pelo aumento de pH ou sensibilidade de algumas plantas ao pH elevado. Nesse estudo, entretanto, não foi observado efeito do carvão vegetal para o pH do solo, portanto a explicação acima citada não é plausível para as doses aqui estudadas. É possível que o carvão vegetal atinja um nível máximo de dose para a produtividade da soja por outros motivos, por exemplo, a capacidade genética do cultivar.

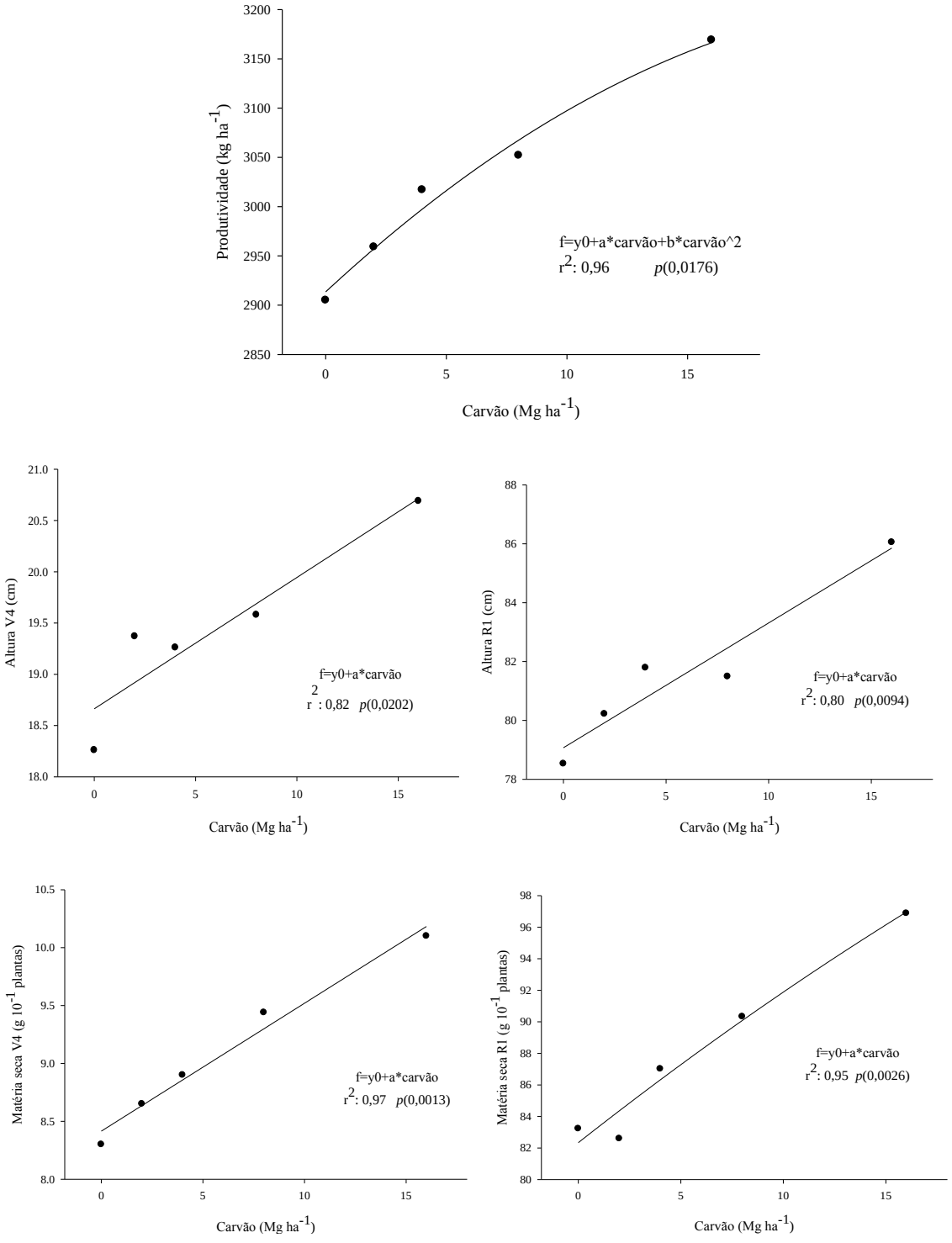

Figura 3.7. Produtividade, altura (V4 e R1) e matéria seca (V4 e R1) da soja em função de diferentes doses de carvão, ano 1, safra 2006/2007 em Nova Xavantina-MT.

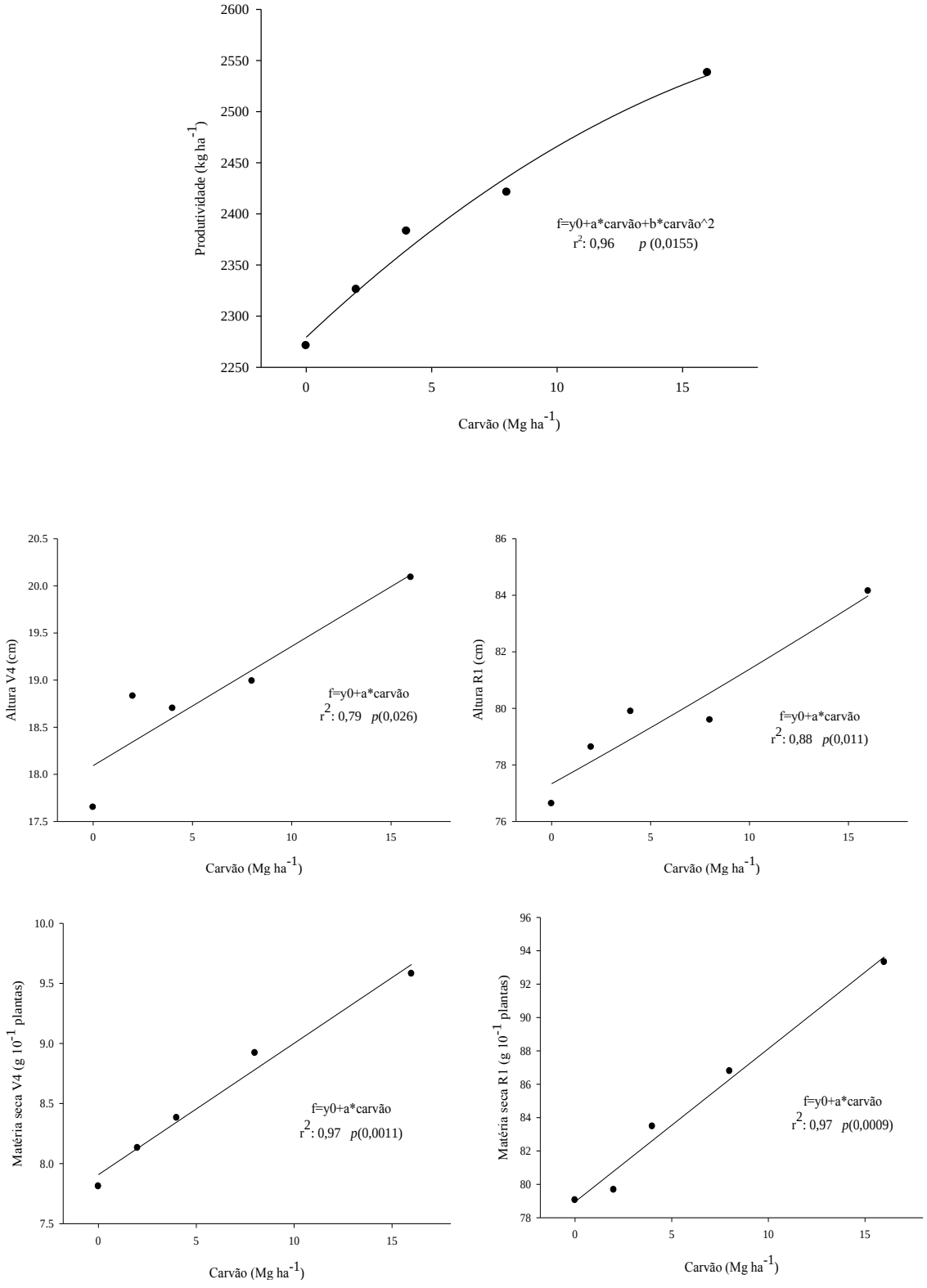

Figura 3.8. Produtividade, altura (V4 e R1) e matéria seca (V4 e R1) da soja em função de diferentes doses de carvão, ano 3, safra 2008-2009 em Nova Xavantina-MT.

3.4 CONCLUSÕES

1. O carvão vegetal teve efeito positivo para alguns componentes da fertilidade do solo no primeiro ano após aplicação. Esse efeito pode ser explicado com o aporte dos elementos levados ao solo junto com o carvão vegetal e com a sua dissolução regulada pelo carvão.

2. O desenvolvimento vegetativo das plantas também é positivamente influenciado pelo carvão, principalmente nas doses maiores, seguindo a mesma tendência no 1° e 3° ano após aplicação.

3. O carvão também influencia positivamente a produtividade da soja e esse efeito também se manteve durante os 3 anos do experimento.

4. A permanência do efeito do carvão na produtividade e o aumento do seu efeito na fertilidade do solo (pH, Ca, Mg, Al e M.O.) ao longo de 3 anos mostra que o ganho na fertilidade do solo no médio prazo não é decorrente da carga mineral do próprio carvão, mas sim pelo seu efeito na retenção e disponibilização de nutrientes.

5. O efeito do carvão vegetal adicionado ao solo para a produtividade das plantas não pode ser explicado inteiramente com seu efeito na fertilidade do solo. Outros efeitos do carvão vegetal são, provavelmente, de natureza eletrofisiológica, e ainda são inexplicados.

3.5 REFERÊNCIAS

BAEDE,A. P. M.; AHLONSOU, E.; DING, Y.; SCHIMEL, D. Climate Change 2001. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P. J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A., (eds). **The Scientific Basis.** Cambridge University Press: Cambridge, 2001, chap. 1.

CARCAILLET, C.; THINON, M. Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data. **Review Palaeobotany Palynology**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 399–416, 1996.

CHAN, M. L.; JONES, J. M.; POURKASHANIAN, M.; WILLIAMS, A. Oxidative reactivity of coal chars in relation to their structure. **Fuel**, Oxford, v. 78, n. 13, p. 1539–1552, 1999.

CHIDUMAYO, E. N. Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 70, n. 3, p. 353–357, 1994.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **11º Levantamento da Produção de Grãos – Safra 2008/09**. Brasília: CONAB, 2009. Disponível em:< http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/custodeproducao_safradeverao2 - Soja OGM-PR1versão - jan/ >. Acesso em: 12 jun. 2010

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos . 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de Solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. rev. atual. 1997. 212p.

FERNANDES, M.S. **Nutrição mineral de plantas**. 2006. Viçosa: SBCS. p. 432.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soil in the tropic with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 35, n. 4, p. 219-230. 2002.

GUNDALE, M. J.; DeLUCA, T. H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growthof Koeleria macrantha in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem. **Biology and Fertility of Soils,** Berlin, v. 43, n. 3, p. 303-311. 2007.

HAMER, U.; MARSCHNER, B.; BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. **Organic Goechemistry,** Oxford, v. 35, n. 7, p. 823-830, 2004.

ISWARAN, V.; JAUHRI, K. S.; SEN, A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.12, n. 2, p.191–192, 1980.

KISHIMOTO, S.; SUGIRA, G. Charcoal as a soil condition. In: SYMPOSIUM ON FOREST PRODUCT RESEARCH INTERNATIONAL: ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE, 1985, Pretoria. **Resumos...**Pretoria: National Timber Research Institute, 1985, v. 5, p. 22-26.

KRAMER, R.W.; KUJAWINSKI, E. B.; HATCHER, P.G. Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. **Environ mental Science and Technology**, Library, v. 38, n. 11, p.3387-3395, 2004.

LEHMANN, J.; SILVA, J. P. DA; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, The Hague, v. 249, n. 2, p. 343-357, 2003.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Comunicado Técnico 125**. Goiânia, GO**:** Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. 2006. 4 p.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (terra preta de índio). Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, E. N.; Woods, W. I. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1º. ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 2009. p. 172-188.

MADARI, B. E.; PETTER, F. A.; OLIVEIRA, J. P.; MACHADO, P. L. O. A.; COSTA, A. R.; SANTOS, J. L. S. 2008. The potential of biochar as soil amendment for grains production in the Brazilian Cerrado. In: 2nd ANNUAL INTERNATIONAL MEETING OF THE INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI), 2., 2008, Newcastle, UK. **Resumos…** Newcastle : IBI, 2008. p. 29.

MBAGWU, J. S. C.; PICCOLO, A. Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield. In: DROZD, J.; GONET, S. S.; SENESI, N.; WEBER, J. (eds) **The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection**. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland, 1997. p. 921–925.

MITCHELL, R. L. **Crop growth and culture**. Ames, Iowa State University Press, 1979. 349 p.

NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; MUSCOLO, A.; VIANELLO, A. Physiological effects of humic substances on higher plants. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 10, p. 1527-1536, 2002.

NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, A. S. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. **Soil Science**, Madison, v. 174, n. 2, p. 105-112, 2009.

NOVOTNY, E. H.; de AZEVEDO, E. R.; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; HAYES, M. H. B.. Studies of the Compositions of Humic Acids from Amazonian Dark Earth Soils. Environmental **Environmental Science and Technology**, Oxford, v. 41, n. 2, p. 400-405, 2007.

OGUNTUNDE, P. G.; FOSU, M.; AJAYI, A. E.; GIESEN, N. V. Effects of charcoal production on maize yeld, chemical properties and texture of soil. **Biology and Fertility of Soils,** Berlin, v. 39, n. 4, p. 296-299. 2004.

ROAT-MALONE, R. M. **Bioinorganic chemistry: a short course**. Washington: Wiley-Interscience, 2003, 266 p.

ROESSING, A. C.; MENEGHELO, D. G. Perspectiva de crescimento da produção de soja no Mato Grosso frente a política de subsídios dos Estados Unidos. In: EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja Região Central do Brasil 2001/2002**. Londrina, 2001. 267 p.

RONDON, M. A.; LEHMANN, J.; RAMÍREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biology and Fertility of Soils,** Berlin, v. 43, n. 6, p. 699-708. 2006.

SPOKAS, K. A.; BAKER, J. M.; REICOSKY, D. C. Ethylene: potential key for biochar amendment impacts. **Plant and Soil**, The Hague, DOI 10.1007/s11104-010-0359-5. Publicado on line: 30/03/2010.

SOHI, S.; YATES, H.; GAUNT, J.; LEHMANN, J. 2008. Evaluating mechanisms of organic matter-biochar interactions in soil. 2nd ANNUAL INTERNATIONAL MEETING OF THE INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI), 2., 2008, Newcastle, **Resumos…**UK. 2008. p. 30.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; de MACÊDO, J. J. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term efects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 291, n. 1-2, p.275-290, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fiosiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TOPOLIANTZ, S.; PONGE, J. F.; BALLOF, S. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 41, n. 1, p. 15-21. 2005.

TRYON, E. H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. **Ecology and Monograph**, New York, v.18, n. 1, p. 81–115, 1948.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, The Hague, v. 327, n. 1-2, p. 235-246, June. 2010.

VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos cerrados**. 1. Ed. EMBRAPA-CPAC, Planaltina, 1997. 524 p.

4 EFEITO DA BIOMASSA CARBONIZADA NA CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS, NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO E NA EMISSÃO DE N_2O

RESUMO

O fino do carvão vegetal de eucalipto é um subproduto da produção de carvão para a indústria metalúrgica e carvão de churrasco. Apresenta características físico-químicas e moleculares que quando aplicado ao solo pode proporcionar benefícios nos atributos químicos, físicos e biológicos, aumentando a produção das culturas e influenciando a emissão de gases de feito estufa. O trabalho foi realizado em Nova Xavantina, MT, em Cambissolo Háplico Tb distrófico, no período de novembro de 2008 a maio de 2009, com o objetivo de verificar o efeito da biomassa carbonizada nos atributos químicos e biológicos do solo, no desenvolvimento e produtividade do arroz e na emissão de óxido nitroso (N_2O). O delineamento experimental foi uma combinação de faixas e blocos ao acaso, em que 4 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1} e 300 kg ha^{-1}) de NPK (05-25-15) foram distribuídas em faixas, e 4 doses de carvão vegetal (0 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1}) ao acaso, em 4 repetições (blocos). Combinado com NPK foi realizada aplicação de 0 kg ha^{-1}, 15 kg ha^{-1}, 32 kg ha^{-1} e 50 kg ha^{-1} de N em cobertura respectivamente. O carvão foi aplicado uma única vez (safra 2008-2009), logo antes da semedura do arroz, e incorporado ao solo a uma profundidade de 0-15 cm. Para avaliação de fertilidade do solo foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm e analisados os seguintes atributos: pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, M.O., C e N total. Os parâmetros fisiológicos avaliados foram: altura e matéria seca aos 25, 40, 55, 70 dias após o plantio (DAP) e produtividade. A avaliação dos parâmetros biológicos do solo consistiu na determinação da taxa de respiração basal do solo ($C\text{-}CO_2$) e do carbono da biomassa microbiana (CBM). No contexto ambiental foram avaliados os fluxos de N_2O para a atmosfera. Todas as análises foram feitas dentro do primeiro ano após a aplicação do carvão vegetal. Houve aumento significativo nos teores de P, Ca e pH e redução de Al e acidez potencial (H+Al) na camada de 0-10 cm com a aplicação de 32 Mg ha^{-1}de carvão. Esse efeito se repetiu para H+Al na camada de 10-20 cm bem como aumentou os teores de K. Não houve efeito do carvão nos demais atributos do solo. Verificou-se efeito negativo do carvão na matéria seca aos 25 DAP e 55 DAP, todavia não influenciou a altura das plantas. A produtividade foi significativamente influenciada pela aplicação de carvão, seguindo uma função linear. De maneira geral, observou-se maior eficiência no uso do N, P e K na dose de 32 Mg ha^{-1}. Não se verificou efeito significativo do carvão no $C\text{-}CO_2$ e no CBM. Observou-se os maiores fluxos de N_2O para a atmosfera na presença de 32 Mg ha^{-1} no solo.

Palavras-chave: Biochar, carvão de eucalipto, *Oryza sativa,* produtividade, fertilidade do solo, eficiência no uso de nutrientes.

ABSTRACT

THE EFFECT OF BIOCHAR ON UPLAND RICE, ON SOIL CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES AND ON THE EMISSION OF N_2O

The fine of eucalypt charcoal is a by-product of charcoal production for the metallurgic industry and for barbecue. It has physico-chemical and molecular characteristics that enable it, when incorporated to the soil, to enhance soil chemical, physical and biological properties, increasing yields and affecting greenhouse gás emissions. The study was carried out in Nova Xavantina, Mato Grosso state between November 2008 and May 2009, in order to verificy the effect of carbonized biomass in chemical and biological attributes of soil, development and yeld of rice and nitous oxide (N_2O) emissions. The soil was a Dystric Cambisol. The experimental design was a combination of strips and random blocks where 4 doses (0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1} and 300 kg ha^{-1}) of NPK (05-25-15) were distributed in strips and 4 doses of biochar (0 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1} and 32 Mg ha^{-1}) in random a manner, in 4 replications (blocks). Urea was applied as top dressing corresponding the NPK doses: 0 kg ha^{-1}, 15 kg ha^{-1}, 32 kg ha^{-1} e 50 kg ha^{-1} de N, respectively. The biochar was applied only once, immediately before the instalation of the experiment the rice (sawing, November 2008), to the 0-15 cm soil layer. Soil fertility parameters were evaluated in samples collected at 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm and pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, SOM and total C and N were evaluated. Among physiological parameters the height and dry mass of plants were evaluated at 25, 40, 55, 70 days after planting (DAP) and yield. The evaluation of soil biological parameters included the basal respiration rate of the soil ($C\text{-}CO_2$) and the microbial biomass carbon (MBC). Nitrous oxide (N_2O) emissions were also evaluated. All analysis were done within the 1st year after the application of biochar. There was a significant increase in P, Ca, levels and pH, and Al and exchangeable acidity (H+Al) were reduced at 0-10 cm in the treatments with 32 Mg ha^{-1} biochar. Similar effect was observed for (H+Al) and K at 10-20 cm. Biochar had no effect on other soil chemical parameters. It negatively affected the dry mass of the plants at 25 DAP`and 55 DAP, however, did not have influence on plant height. Rice yield was directly and linearly influenced by biochar doses. Increase in nutrient use efficiency (N, P, K) was also observed at the highest biochar dose (32 Mg ha^{-1}). Biochar had no effect on $C\text{-}CO_2$ and MBC but seu uso resulted in higher emission rates of N_2O at the 32 Mg ha^{-1} dose in soil.

Key words: eucalypt charcoal, *Oryza sativa*, yield, soil fertility, nutrient use eficiency.

4.1 INTRODUÇÃO

Dentre as culturas anuais, o arroz ocupa um lugar de destaque no cenário nacional, tendo em vista que seu consumo faz parte hoje da maioria das dietas alimentares da população. No Brasil o crescimento do consumo de arroz está intimamente ligado ao crescimento populacional, uma vez que ao lado do feijão é o principal alimento.

Tanto a produção mundial quanto a do Brasil (~75% da produção) de arroz é, em grande parte, oriunda de sistemas irrigados por inundação ou de várzeas. Esse tipo de produção de arroz, todavia, vem sendo particularmente vulnerável às legislações ambientais devido ao excessivo uso de água e às altas emissões de gás metano, um importante gás de efeito estufa.

O arroz de terras altas, por outro lado, sempre ficou conhecido por ser a primeira cultura após a derrubada da vegetação nativa no Sul e Centro-Oeste brasileiros. Atualmente, esse tipo de cultivo vem sendo fortemente desestimulado pelos crescentes problemas da conversão de vegetação nativa em uso agropecuário no que concerne à mudança do uso da terra e seus reflexos nas mudanças climáticas globais. O desmatamento seguido de queimadas vem colocando o Brasil como o principal emissor de gás de efeito estufa por meio dessa atividade. Assim, o arroz deverá se inserir em sistemas de cultivo mais sustentáveis e conservacionistas como o Sistema Plantio Direto com rotação de culturas (SPD). Portanto, o arroz de terras altas passou a ser tratado não mais como cultura de abertura de área, mas sim como cultura principal no contexto de produção de grãos.

Os solos de cerrados predominam na região Centro-Oeste e caracterizam-se por elevada acidez, baixa fertilidade natural, com baixos teores de fósforo, potássio, baixa capacidade de troca catiônica e elevada saturação por alumínio (Fageria & Souza, 1995), além de intempéries climáticos como a ocorrência de períodos de estiagem (veranicos) durante o período de desenvolvimento das culturas. Diante disso a cultura do arroz em sistema de sequeiro passou a ser considerada como cultura de risco.

A introdução de técnicas que visam à melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo vem sendo estudado ao longo dos anos. O aumento da matéria orgânica dos solos tem contribuído para a melhoria dessas características, como comprovado por diversos autores, como o aumento da CTC e da ciclagem de nutrientes (Torres et al., 2005; Crusciol et al., 2005; Boer et al., 2007; Carpim et al., 2008) nas propriedades físicas do solo como a redução da densidade subsuperficial (Guimarães & Moreira, 2001), resistência a penetração (Carneiro et al., 2009) e o aumento da porosidade (Gonçalves et al., 2006).

Atualmente, esse aumento da matéria orgânica nos solos de cerrado se dá principalmente em função da adoção do Sistema de Plantio Direto (SPD). Entretanto, o cultivo de arroz de terras altas em SPD tem gerado frustrações de safra devido ao baixo vigor inicial da cultura (Stone et al., 1980; Santos et al., 1997).

Com o surgimento da bioenergia, novas formas de subprodutos da geração de energia são produzidas, entre eles o carvão vegetal que pode ter diferentes usos (que podem lhe agregar valor), como por exemplo, seu uso como condicionador visando à melhoria dos atributos do solo. Na combustão incompleta (em ambiente reduzido em oxigênio) da biomassa, como no procedimento da produção de carvão vegetal ou em diferentes processos de pirólise, forma se uma série de compostos genericamente denominados de carbono pirogênico. Esses compostos, pela sua recalcitrância, representam um importante reservatório de carbono estável, quando incorporando no solo, podendo mitigar a emissão atmosférica de CO_2, e também desempenhar importante papel na fertilidade dos solos, especialmente quando química e biologicamente alterados (Madari et al., 2009).

Já é fato conhecido que o carvão vegetal, devido as suas características físico-químicas e moleculares, tem efeito benéfico para as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Glaser et al., 2002; Lehmann et al., 2003; Oguntunde et al., 2004; Madari et al., 2006). Através desse efeito, o carvão vegetal pode proporcionar melhor desenvolvimento para as plantas que, em muitos casos, resulta em melhor produtividade e maior segurança na produção. A aplicação de carvão vegetal no solo é também vista como uma forma de seqüestro de C, uma vez que devido sua estrutura aromática é altamente estável no solo.

Pesquisas recentes com o uso de carvão vegetal demonstraram aumento da fertilidade do solo, como observado por (Lehmann et al., 2003a; Lehmann et al., 2003b) que apontaram a eficiência do carvão vegetal em aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, a formação de biomassa (matéria seca das plantas) e, em geral, o potencial produtivo do solo. Outros estudos têm avaliado o efeito da adubação com carvão sobre as propriedades físico-hídricas do solo (Glaser et al., 2002; Teixeira & Martins, 2003).

Segundo Madari et al. (2006), em estudos preliminares, a cultura do arroz de terras altas responde positivamente à aplicação de carvão vegetal (de *Eucalipto* sp.) ao solo. De acordo com esses autores foram observados maior crescimento inicial e acúmulo de biomassa seca das plantas, desenvolvimento melhor e mais uniforme, acúmulo de massa seca nos grãos e melhoria das características químicas do solo, tais como redução da acidez potencial e aumento dos teores de fósforo e potássio disponível.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito imediato (primeiro ano após a aplicação do carvão no solo) da incorporação de biomassa carbonizada (carvão vegetal de

eucalipto) na fertilidade do solo e resposta à adubação com NPK, no desenvolvimento e produtividade de arroz de terras altas (cv. Sertaneja), na atividade de microrganismos e na emissão de óxido nitroso (N_2O).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Um experimento em campo foi instalado em Nova Xavantina, Mato Grosso, no bioma Cerrado, em novembro de 2008. A localização geodésica é 14º 34´ 50" de latitude e 52º 24´ 01" de longitude e altitude de 310 m. O solo foi classificado como Cambissolo Háplico Tb distrófico (Embrapa, 1999). Antes da implantação a área do experimento era utilizada como pastagem e se encontrava em estado degradado. A espécie dominante era *Brachiaria decumbens*.

Na análise química e física do solo de amostras coletadas na profundidade de 0-20 cm, antes da aplicação dos tratamentos verificou-se: pH (H_2O): 5,6; Fósforo (P, método de Mehlich): 4,9 mg dm^{-3}; Potássio (K^+): 110,0 mg dm^{-3}; Cálcio (Ca^{2+}): 0,75 $cmol_c$ dm^{-3}; Magnésio (Mg^{2+}): 0,67 $cmol_c$ dm^{-3}; Alumínio (Al^{3+}): 0,15 $cmol_c$ dm^{-3}; Acidez potencial (H^++Al^{3+}): 2,35 $cmol_c$ dm^{-3}; Saturação por bases (V%): 41; Capacidade de troca catiônica (CTC): 4,05 $cmol_c$ dm^{-3}; Matéria orgânica (M.O.): 12,2 g kg^{-1}; Ferro (Fe): 39,6 mg dm^{-3}; Manganês (Mn): 22,2 mg dm^{-3}; Zinco (Zn): 9,26 mg dm^{-3}; Cobre (Cu): 0,57 mg dm^{-3}; Argila: 170 g kg^{-1}; Silte: 67 g kg^{-1}; Areia: 763 g kg^{-1}.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial 4 x 4 com quatro repetições, sendo que os tratamentos do experimento, num total de 16, foram compostos pela combinação de quatro níveis de adubação de base (0 kg ha^{-1}; 100 kg ha^{-1}; 200 kg ha^{-1} e 300 kg ha^{-1} NPK da fórmula 05-25-15) e quatro doses de carvão vegetal como fonte de carbono pirogênico (8 Mg ha^{-1}; 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1}) e a testemunha (0 Mg ha^{-1}). Cada parcela foi composta por nove linhas da cultura com 10 m de comprimento, totalizando 40,50 m^2, sendo a área útil para as avaliações de 25,20 m^2.

O carvão vegetal (de eucalipto) foi aplicado ao solo uma única vez (dezembro de 2008) antes do plantio e incorporado a uma profundidade de 0-15 cm, utilizando-se enxada rotativa. Antes da incorporação ao solo, o mesmo foi moído para passar em peneira de 2 mm.

A composição do carvão vegetal adicionado ao solo está demonstrada na Tabela 4.1. Entre os macroelementos esse carvão vegetal continha K, Ca e Mg em maior proporção, entre os microelementos Fe e Mn, 77,4% de C total e 0,33% N total.

Comparado com o carvão do cerrado, o carvão do eucalipto teve ~58% a mais C e 50% a menos N total devido, muito provávelmente, à técnica de produção do carvão. O carvão do cerrado foi produzido no local com a técnica chamada "rabo quente" e o carvão de eucalipto em forno cilíndrico, esse último sendo mais efetivo na transformação da biomassa em C estabilizado.

Tabela 4.1. Composição elementar (valores extraíveis) do carvão vegetal utilizado no experimento**.**

Carbono total (C)	g kg^{-1}	774,0
Nitrogênio total (N)		3,3
M.O.		56,9
Cálcio (Ca)	$cmol_c$ kg^{-1}	2,8
Magnésio (Mg)		2,3
Alumínio (Al)		0,0
Acidez potencial (H+Al)		0,0
Fósforo (P) disponível	mg dm^{-3}	137,3
Potássio (K)		1937,3
Cobre (Cu)		1,0
Ferro (Fe)		74,0
Manganês (Mn)		88,0
Zinco (Zn)		36,0
Relação C:N	---	273,6

O espectro por ^{13}C ressonância magnética nuclear (Figura 4.1) do carvão de eucalipto utilizado nesse experimento foi muito similar ao espectro do carvão do cerrado, tendo, assim, características moleculares-estruturais da mesma natureza em termos de estabilidade e reatividade. No espectro pode-se observar a presença de grupos O-aromáticos (C-arila, ~130 ppm), responsáveis pela estabilidade do material e também de grupos fenólicos (~150 ppm), embora em proporção bem menor que os grupos aromáticos, mas que podem ser responsáveis por alguma reatividade química no carvão vegetal.

A semeadura do arroz, cultivar BRS Sertaneja, foi realizada no dia 08 de janeiro de 2009, sendo distribuídos 100 kg ha^{-1} de sementes, observando-se espaçamento de 0,22 m entre linhas e profundidade de semeadura de 1-3 cm, sendo nessa mesma operação realizada a aplicação dos tratamentos de adubação de base. Aos 30 dias após o plantio (DAP) foi realizada adubação de cobertura nitrogenada, utilizando como fonte de N uréia, em doses combinadas com os tratamentos de adubação de base (0 kg ha^{-1}; 15 kg ha^{-1}; 32 kg ha^{-1} e 50 kg ha^{-1} N com 0 kg ha^{-1}; 100 kg ha^{-1}; 200 kg ha^{-1} e 300 kg ha^{-1} de adubação

de base respectivamente), totalizando 20 kg ha^{-1}, 42 kg ha^{-1} e 65 kg ha^{-1} de N nas faixas correspondentes a 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1} e 300 kg ha^{-1} de NPK respectivamente.

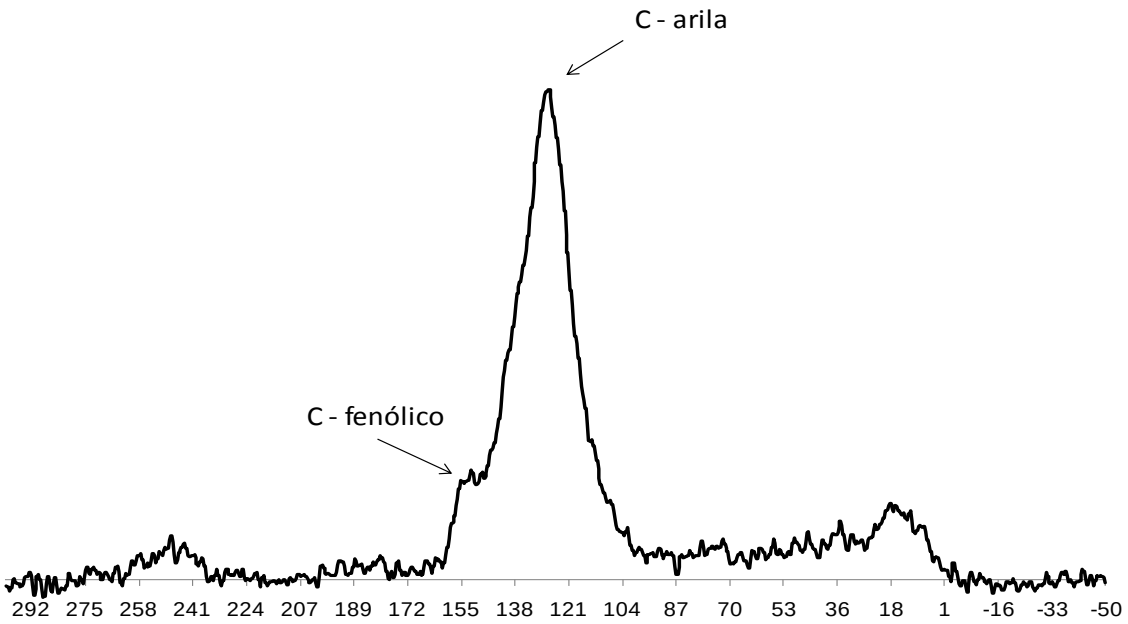

Figura 4.1. Espectro de ^{13}C RMN (VACP-TOSS) de amostra do carvão vegetal utilizado no experimento.

O efeito da biomassa carbonizada (carvão vegetal) foi avaliado utilizando parâmetros fisiológicos das plantas e atributos químicos do solo.

Foi avaliado, aos 25 DAP, 40 DAP, 55 DAP e 70 DAP, a acumulação da biomassa seca (g) e altura (cm) das plantas, coletando-se dez plantas por parcela para biomassa seca e vinte plantas para altura. A biomassa seca foi obtida secando-se as plantas em estufa de ar com circulação forçada a 65°C por 72 horas e em seguida pesando-se os resíduos vegetais. Por ocasião da colheita do arroz, também se avaliou a produtividade de grãos, com posterior padronização da umidade em 14%.

Em pleno florescimento, também foram avaliadas as características químicas do solo (pH, Ca, Mg, Al, H+Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, M.O.) utilizando métodos descritos pela Embrapa (1997), sendo as amostras coletadas nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. As amostras foram compostas por três sub-amostras coletadas aleatóriamente dentro das parcelas. Também no florescimento foi determinada a taxa de respiração basal ($C\text{-}CO_2$) do solo por método descrito por Anderson e Domsch (1993) e o carbono da biomassa microbiana (CBM) pelo método de fumigação-extração, descrito por

Vance et al. (1987) que consiste na quebra das células microbianas pelo clorofórmio e extração utilizando K_2SO_4 (0,5 M) com oxidação do C pelo $K_2Cr_2O_7$. Com os dados medidos nas análises de fertilidade e biológicas, procedeu-se a determinação do quociente metabólico (q_{CO2}). O q_{CO2} é a quantidade de C-CO_2 produzida por unidade de biomassa microbiana do solo por unidade de tempo (mg C-CO_2 mg^{-1} CBM $hora^{-1}$) (Anderson & Domsch, 1993). O q_{mic} é a relação entre o carbono microbiano (CBM) e o carbono orgânico total [(CBM/COT)*100] e fornece informação sobre a qualidade da matéria orgânica (Powlson et al., 1987).

Foi também determinado a eficiência agronômica dos nutrinetes N, P e K (EA) = (PG_{cf} - PG_{sf})/(QN_a), em kg kg^{-1}; onde: PG_{cf} = produtividade de grãos com fertilizante, PG_{sf} = produtividade de grãos sem fertilizante e QN_a = quantidade do nutriente aplicado, em kg.

As medições de fluxos de N_2O foram feitas com câmaras estáticas instaladas permanentemente durante o ciclo da cultura. Foi instalada uma câmara por parcela. As avaliações foram feitas nos tratamentos com as 4 doses de carvão vegetal, cada uma em 4 repetições) em combinação com a maior dose de uréia (111 kg ha^{-1}), na pastagem e em 4 parcelas testemunhas (0 carvão, 0 N). As coletas de gases na interface solo-atmosfera foram realizadas a cada sete dias após semeadura do arroz e em cinco dias consecutivos, sempre após fertilização nitrogenada, sempre entre 8:00 e 12:00 horas. Cada câmara era composta por uma base de metal retangular de 38 cm x 58 cm, inserida no solo até 5 cm de profundidade, onde permaneceu durante todo período de avaliação. Na parte superior da base metálica existe uma calha com cerca de 1 cm de largura, onde, no momento da amostragem, uma bandeja plástica com 9 cm de altura e com as mesmas dimensões de largura e espessura da base metálica, foi acoplada. Para garantir a vedação do sistema colocava-se água na canaleta da base de metal. Após o fechamento das câmaras, retirava-se a amostra inicial (T_0) e, depois de 20 minutos, uma nova amostra para o cálculo da taxa de emissão do N_2O. As amostras de gás do interior das câmaras foram coletadas com o auxílio de uma bomba de vácuo manual, que transfere o gás das câmaras para frasquinhos de vidro, após vácuo à 80 kPa. A concentração de N_2O das amostras de gás foram analisadas por cromatografia gasosa. O cálculo dos fluxos de N_2O é dado pela equação:

$FN_2O = \delta C/\delta dt\ (V/A)\ M/Vm$, em que:

$\delta C/\delta dt$=é a mudança de concentração de N_2O na câmara no intervalo de incubação;

V=volume da câmara;

A=área do solo coberto pela câmara;

M=peso molecular de N_2O;

Vm=volume molecular na temperatura de amostragem.

Durante o desenvolvimento da cultura foram realizados tratos fitossanitáros, com a aplicação de 241,8 g e.a. ha^{-1} de 2,4–D, visando o controle de plantas daninhas, do inseticida methamidophos (420 g ha^{-1}) para o controle de pragas e uma aplicação do fungicida Triciclazole (225 g ha^{-1}) visando o controle de doenças.

Os dados de distribuição pluviométrica e temperatura na área do experimento estão apresentados na Figura 4.2. Verificam-se períodos significativos de estiagem durante o desenvolvimento do arroz.

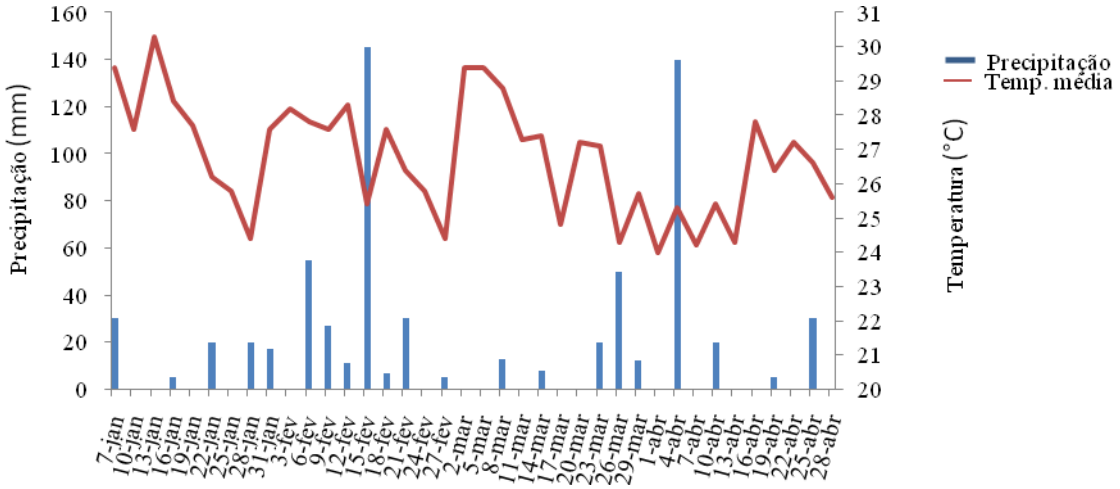

Figura 4.2. Precipitação (mm) e temperatura média (ºC) ocorrida em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento. Cada data de amostragem refere-se a média de três dias de coleta. Os dados de temperatura foram coletados na estação experimental do Inmet em Nova Xavantina, MT e a pluviosidade na sede da propriedade onde se realizou o experimento, utilizando-se o pluviômetro tipo cunha HD 306.

Após a coleta e tabulação dos dados, efetuou-se a análise de variância utilizando o software Sisvar, Versão 5.3, sendo as médias das variáveis significativas agrupadas pelo critério de Tukey à 5% de significância.

Foi feito também análise de componentes principais (ACP) utilizando o software Statistica Versão 7.0. Na análise de componentes principais as variáveis independentes NPK e CARVÃO também foram plotadas, mas apenas como variáveis

ilustrativas, ou seja, não distorcem a inércia dos dados nem contribuem para as CPs. As variáveis foram padronizadas antes de executar as análises na seguinte forma: valor padronizado = (valor do parâmetro – média de todos os dados desse parâmetro)/desvio padrão.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Análise exploratória do efeito dos tratamentos sobre os dados fisiológicos das plantas, fertilidade e biologia do solo

De acordo com a análise de componentes principais (ACP) as variáveis fisiológicas da planta e de fertilidade do solo, obtem-se uma idéia geral sobre o efeito da aplicação do carvão vegetal ao solo em combinação com adubo mineral e sobre como essas variáveis se correlacionam. Como as variáveis independentes também são visíveis no "biplot", é possível visualizar o efeito da adubação (NPK) e da dosagem de carvão no solo (CARVÃO) nas variáveis dependentes. Os resultados foram discutidos separadamente para os dados fisiológicos (altura [ALT1 a 4], massa seca das plantas [MS1 a 4] e produtividade [PROD]), considerado uma das variáveis mais importantes, e depois para os dados de fertilidade na camada 0-20 cm do solo, em conjunto com os dados fisiológicos.

Os componentes principais (CP) dos dados fisiológicos, o CP 1 (Fator 1) reteve 47,02% da inércia dos dados, a CP 2 15,59%, acumulando no gráfico 62,61% da informação da matriz original (Figura 4.3). No gráfico claramente pode ser identificado o efeito da adubação mineral na altura das plantas em todas as fases da avaliação (aos 25, 40, 55 e 70 dias após a semeadura). A adubação mineral também teve efeito para a acumulação de massa seca nas plantas, principalmente, nas primeiras duas fases de avaliação. O carvão vegetal não mostra correlação nem com os parâmetros de altura nem com os da massa seca, exceto no caso da variável MS1 (matéria seca aos 25 DAP) onde houve baixa correlação. Analisando as variáveis que compõem os componentes também pode ser observado que o carvão mostra efeito antagonista para as variáveis descrevendo a acumulação de massa seca (Tabelas 4.2 e 4.3). Isso pode ser devido ao acentuado evento de seca no período da avaliação, como explicado nos capítulos subseqüentes desse texto. Para a produtividade, a aplicação do carvão vegetal mostrou principal, e, praticamente, único efeito. O efeito do carvão vegetal na cultura do arroz foi muito similar ao efeito na

soja, principalmente no 3° ano após aplicação do carvão, e para as variáveis de altura e massa seca, tendo o efeito da adubação para eles maior que o do carvão. Já para a produtividade o efeito do carvão vegetal foi mais acentuado no caso do arroz. Isso pode ser devido à diferença na resposta das duas espécies ou devido à diferença na textura entre os solos dos dois experimentos, o do arroz sendo mais arenoso, mostrou o efeito do carvão vegetal em maior magnitude.

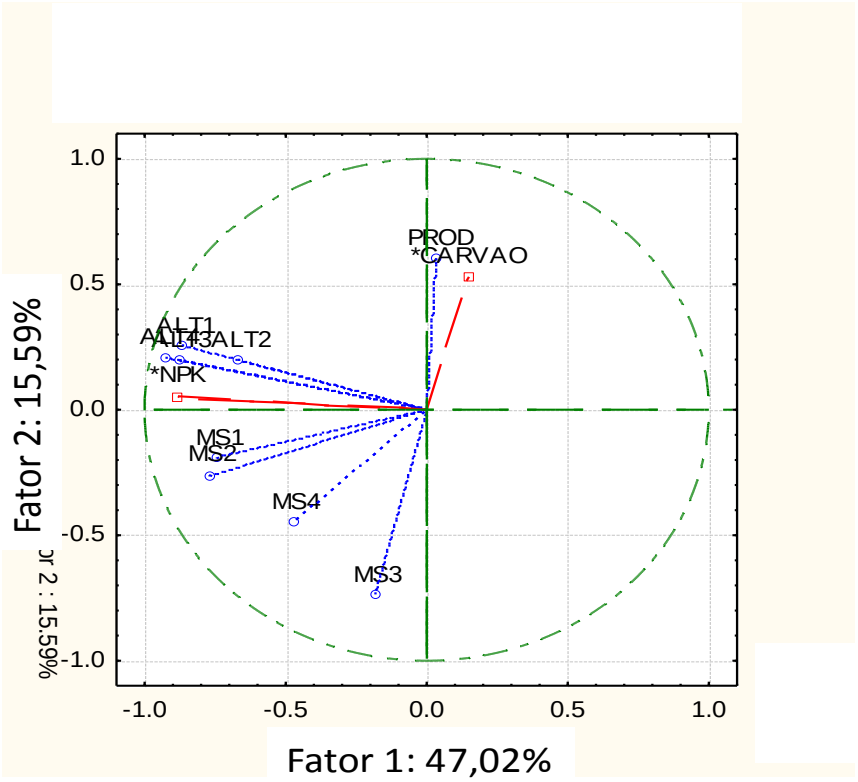

Figura 4.3. Gráfico das duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento. ALT1, ALT2, ALT3, ALT4 e MS1, MS2, MS3, MS4 são a altura (cm) e a massa seca (g 10 plantas^{-1}) das plantas aos 25, 40, 55 e 70 dias após plantio, respectivamente. PROD: produtividade da soja. ALT1 a 4 e MS1 a 4 são variáveis ativos, NPK e CARVÃO variáveis suplementares.

Tabela 4.2. Correlação entre as variáveis fisiológicas e as doses de adubo mineral (NPK) e carvão vegetal (CARVÃO).

Correlação com:	NPK	CARVÃO
ALT1	0,7459*	-0,0991
ALT2	0,4768*	-0,1771
ALT3	0,8208*	-0,1389
ALT4	0,8578*	-0,1370
MS1	0,6420*	-0,3503*
MS2	0,7686*	-0,0968
MS3	0,1475	-0,1498
MS4	0,3132*	-0,1869
PROD	0,0881	0,8806

* significante a p<0,05, Spearman "Rank Order" correlações.

Tabela 4.3. Coordenadas (carregamentos) dos fatores das variáveis, em base de correlações.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3
ALT1	-0,8657	0,2529	-0,0972
ALT2	-0,6687	0,1970	-0,2616
ALT3	-0,8802	0,1965	0,1216
ALT4	-0,9223	0,2091	0,0359
MS1	-0,7443	-0,1942	-0,2559
MS2	-0,7717	-0,2604	0,2573
MS3	-0,1850	-0,7398	0,4696
MS4	-0,4743	-0,4488	0,0971
PROD	0,0352	0,6034	*0,7491*
% da variância	47,02	15,59	12,63
*NPK	-0,8821	0,0537	0,1340
*CARVÃO	0,1498	0,5298	0,6570

ALT1, ALT2, ALT3, ALT4 e MS1, MS2, MS3, MS4 são a altura (cm) e a massa seca (g 10 plantas^{-1}) das plantas aos 25, 40, 55 e 70 dias após plantio, respectivamente. * variáveis suplementares.

Na figura de componentes principais (CPs) obtidos analisando os dados de fisiologia e de fertilidade do solo em conjunto, a CP 1 (Fator 1) reteve 26,36% da inércia dos dados, a CP 2 15,35%, acumulando no gráfico 41,65% da informação da matriz

original (Figura 4.4). Embora a informação acumulada nos primeiros dois componentes principais ser relativamente baixa, é possível identificar algumas tendências entre os dados.

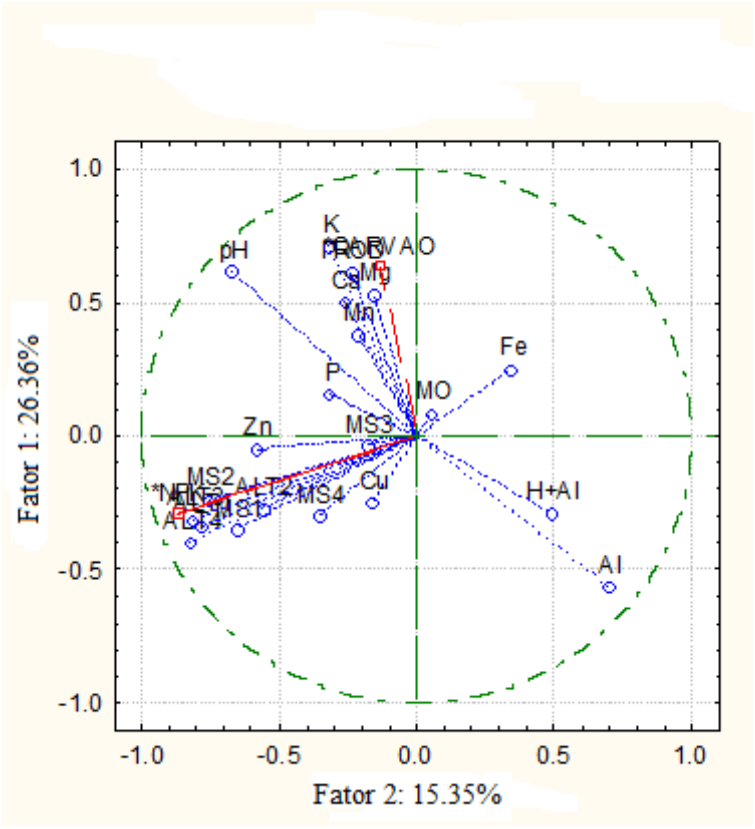

Figura 4.4. Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento da análise da fertilidade do solo (0-20 cm) em conjunto com os dados fisiológicos. ALT1, ALT2, ALT3, ALT4 e MS1, MS2, MS3, MS4 são a altura (cm) e a massa seca (g 10 plantas^{-1}) das plantas aos 25, 40, 55 e 70 dias após plantio, respectivamente. PROD: produtividade do arroz. ALT1 a 4 e MS1 a 4 são variáveis ativas, NPK e CARVÃO variáveis suplementares.

Entre as variáveis de fertilidade do solo, o carvão teve efeito para a disponibilidade de, principalmente K e teve efeito, em conjunto com a adubação mineral para Al, acidez potencial e pH do solo (Figura 4.4 e Tabela 4.4). Entretanto, a tendência da M.O. não mostra ligação com o carvão, nem adubo mineral, conforme no primeiro ano após aplicação no experimento da soja.

Tabela 4.4. Correlação entre as variáveis de fertilidade do solo (0-20 cm) e as doses de adubo mineral (NPK) e carvão vegetal (CARVÃO).

Variáveis	NPK	CARVÃO
pH	0,4181	0,5051
Ca	*-0,0461*	*0,2168*
Mg	*-0,0644*	0,0939
Al	-0,4458	-0,3262
H+Al	*-0,3477*	-0,3900
P	0,4517	0,3432
K	0,0647	0,4340
Cu	0,1072	-0,0949
Zn	0,6503	-0,1332
Fe	-0,3445	-0,1037
Mn	-0,0878	0,0654
M.O.	-0,1153	0,2278

Com base nas variáveis de fertilidade do solo (0-20 cm), no gráfico da Figura 4.5, é bem visível uma separação mais definida das amostras dos tratamentos onde houve aplicação de 32 Mg ha^{-1}, onde houve o maior efeito do NPK e carvão vegetal, pelo Fator 1. Esse fator é composto, principalmente, pelas variáveis pH, Al e K. Entre os solos que receberam doses intermediárias, os com 16 Mg ha^{-1} também formam um grupo, mas os que receberam 8 Mg ha^{-1} estão dispersas entre os outros três grupos. Esse comportamento é esperado, sendo que com doses crescentes o efeito é melhor manifestado.

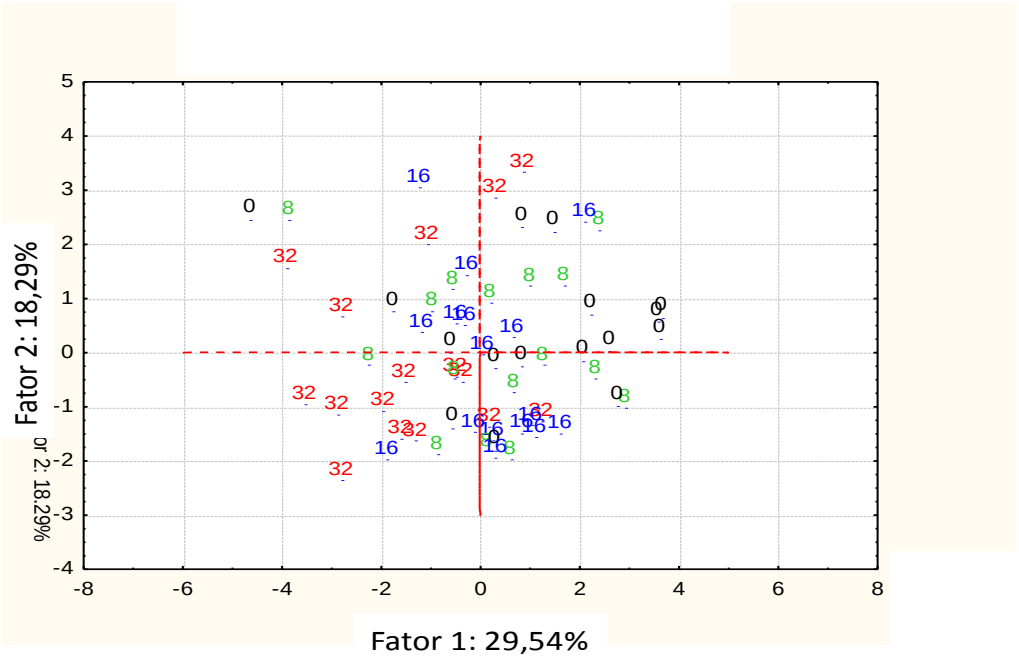

Figura 4.5. Projeção dos dados de fertilidade do solo (0-20 cm) no biplot dos fatores 1 e 2 do experimento. 0: 0 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 8: 8 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 16: 16 Mg ha^{-1} carvão vegetal, 32: 32 Mg ha^{-1} carvão vegetal.

Pode ser observado na Figura 4.6 e na Tabela 4.5 que o teor do carbono orgânico total (COT) e relação C:N são influenciados pelas doses de carvão vegetal (r=0,6048 e 0,6709), devido à recente adição do carvão que possui alta razão C:N. Por outro lado, o CWB, o carbono oxidável com dicromato, mostra correlação baixa com as doses de carvão (r=0,3629), embora significativa, sendo que alguns meses não foram o suficiente para o carvão poder influenciar a dinâmica da M.O.. Com base nos resultados apresentados na mesma figura e tabela, não podemos esperar efeito do carvão no CBM, nem na respiração basal, que, por sua vez, foi influenciada pela adubação mineral. Esses dados serão discutidos mais adiante.

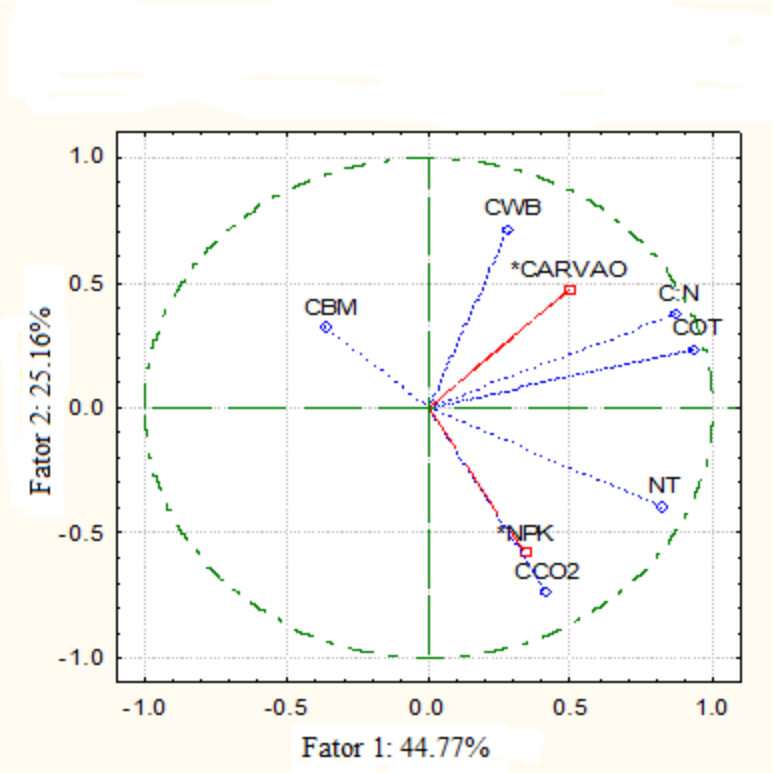

Figura 4.6. Duas primeiras componentes principais (CPs) do experimento em base das variáveis biológicas do solo. CBM: carbono da biomassa microbiana, CCO2: respiração basal, COT: carbono orgânico total (C), NT: nitrogênio total, CWB: carbono medido pelo método Walkley-Black (carbono oxidável), C:N: relação COT e NT. NPK e CARVÃO são variáveis suplementares.

Tabela 4.5. Correlação entre as variáveis da biologia do solo (0-10 cm) e as doses de adubo mineral (NPK) e carvão vegetal (CARVÃO).

Variáveis	NPK	CARVÃO
C-CO_2	0,7823*	-0,0775
CBM	-0,0658	-0,0930
COT	0,1503	0,6048*
NT	0,6132*	0,1026
C:N	-0,1168	0,6709*
CWB	-0,0937	0,3629*

* significante a p<0,05, Spearman "Rank Order" correlações.

4.3.2 Efeito do carvão vegetal e adubação mineral na fertilidade do solo

A fertilidade do solo foi influenciada pela aplicação de carvão, com efeito significativo para pH, P, K, Ca, Al, acidez potencial (H+Al), Zn e C na profundidade de 0-10 cm (Tabela 4.6). Já na profundidade de 10-20 cm, apenas pH e K foram influenciados (Tabela 4.7) e na de 20-30 cm não houve efeito significativo (Tabela 4.8). Houve interação

significativa dos fatores doses de carvão e adubação de base apenas na profundidade de 0-10 cm para pH, K, Mg e acidez potencial (H+Al) (Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8). Esses dados corroboram os obtido por Tryon (1948) que observou efeito sobre Ca, Mg, K e P, por Oguntunde et al. (2004) que verificaram efeito sobre pH, Ca, Mg, K e P e por Novak et al. (2009) que verificaram efeito nos teores de Ca, Mg, C, K e P. Esses trabalhos foram realizados em solos arenosos, com baixo teor de argila, indo de encontro com a premissa de que solos arenosos são mais influenciados com a aplicação de carvão (Glaser et al., 2002).

Tabela 4.6. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	2,04^{ns}	5,72**	0,63^{ns}	4,32*	0,34^{ns}	3,28**	7,33*
Carvão vegetal	23,17*	0,85^{ns}	3,73**	17,60*	16,12*	2,14^{ns}	9,06*
Adubação x carvão	1,90***	0,74^{ns}	0,78^{ns}	2,50**	0,98^{ns}	2,59**	1,45^{ns}
C.V.	2,61	19,61	33,07	13,07	13,70	6,97	80,50
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	Zn	C	M.O.
Adubação	6,92*	16,13*	0,22^{ns}	18,55*	7,55*	0,57^{ns}	1,88^{ns}
Carvão vegetal	27,53*	0,30^{ns}	0,68^{ns}	1,89^{ns}	2,77**	10,22*	1,75^{ns}
Adubação x carvão	2,76**	0,25^{ns}	0,57^{ns}	0,33^{ns}	1,71^{ns}	0,74^{ns}	1,14^{ns}
C.V.	6,95	23,90	25,61	10,92	39,44	62,68	3,96

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Tabela 4.7. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	12,74*	7,60*	8,91*	2,58***	1,13^{ns}	2,95**	5,11**
Carvão vegetal	2,67**	0,56^{ns}	1,37^{ns}	2,77**	1,28^{ns}	0,64^{ns}	1,33^{ns}
Adubação x carvão	1,17^{ns}	1,59^{ns}	1,32^{ns}	0,74^{ns}	1,33^{ns}	1,06^{ns}	1,36^{ns}
C.V.	2,89	27,52	20,91	18,84	28,02	10,39	56,70

Continua...

Tabela 4.7. Continuação.

Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	Zn	C	M.O.
Adubação	8,22**	1,75^{ns}	2,63***	9,18*	13,04*	2,15^{ns}	0,58^{ns}
Carvão vegetal	2,03^{ns}	0,27^{ns}	0,42^{ns}	1,71^{ns}	0,54ns	1,71^{ns}	1,85^{ns}
Adubação x carvão	1,10^{ns}	0,93^{ns}	0,67^{ns}	1,19^{ns}	0,40^{ns}	1,10^{ns}	1,58^{ns}
C.V.	10,69	26,06	24,40	17,17	102,34	39,47	5,75

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Tabela 4.8. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos nos atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al
Adubação	1,45^{ns}	2,47***	3,73*	6,20*	2,08^{ns}	3,94**	3,45**
Carvão vegetal	0,69^{ns}	1,43^{ns}	1,95^{ns}	0,31^{ns}	0,63^{ns}	1,31^{ns}	0,09^{ns}
Adubação x carvão	1,16^{ns}	0,83^{ns}	1,46^{ns}	0,95^{ns}	0,81^{ns}	0,61^{ns}	0,88^{ns}
C.V.	2,85	21,69	46,12	32,69	29,92	14,80	50,55
Causas da variação	H+Al	Fe	Cu	Mn	Zn	C	M.O.
Adubação	3,46**	1,19^{ns}	3,25**	6,30*	1,37^{ns}	3,42**	0,03^{ns}
Carvão vegetal	0,54^{ns}	0,84^{ns}	2,41***	0,40^{ns}	0,20^{ns}	0,12^{ns}	0,12^{ns}
Adubação x carvão	0,69^{ns}	0,94^{ns}	1,41^{ns}	1,45^{ns}	1,53^{ns}	1,45^{ns}	0,76^{ns}
C.V.	11,45	43,52	20,50	16,55	31,66	35,47	9,74

*, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. Doses da adubação base: 0 kg ha^{-1}, 100 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1}, 300 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1} NPK (0-18-18). Doses de carvão vegetal: 0 Mg ha^{-1}, 2 Mg ha^{-1}, 4 Mg ha^{-1}, 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1}. C.V.: coeficiente de variação.

Na profundidade de 0-10 cm, o pH foi influenciado pela aplicação de carvão em todos os níveis, sendo que a acidez foi reduzida conforme aumento nas doses aplicadas (Tabela 4.9). Na camada de 10-20 cm somente a dose de 32 Mg ha^{-1} influenciou significativamente o pH (Tabela 4.10), já na camada de 20-30 cm não houve efeito da adição do carvão (Tabela 4.11). Houve interação significativa dos fatores doses de carvão e níveis de adubação de base, com exceção da dose 200 kg ha^{-1} (Tabela 4.12) na profundidade de 0-10 cm. Resultado semelhante foi obtido por Lehmann et al. (2003), em que observaram redução da acidez em 0,75 unidades de pH (de 5,14 para 5,89) com adição de 20% de biochar em um Latossolo. O efeito não significativo na interação doses

de carvão e 200 kg de adubo de base para pH, corroboram com os efeitos de Ca e Mg, os quais também não foram influenciados pela interação (Tabela 4.12). A redução da acidez está associada ao aumento de bases trocáveis (Ca e K) e redução dos teores de Al.

Tabela 4.9. Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H_2O)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,74	A	0,13	A	6,53	A	100	A	0,76	A	0,65	A	0,11	B
8	5,93	B	0,13	A	6,95	AB	112	A	0,82	AB	0,64	A	0,05	A
16	5,97	B	0,13	A	7,99	AB	112	A	0,88	B	0,66	A	0,05	A
32	6,20	C	0,14	A	9,29	B	137	B	1,04	C	0,68	A	0,02	A
	H+Al		Fe		Cu		Mn		Zn		C		M.O.	
	cmolc dm^{-3}				mg dm^{-3}						%		g dm^{-3}	
0	2,25	B	32,25	A	0,58	A	22,37	A	18,90	A	1,12	A	14,06	A
8	2,16	B	30,06	A	0,62	A	23,81	A	17,76	A	1,27	A	14,18	A
16	1,96	A	31,75	A	0,61	A	23,18	A	13,35	A	1,54	A	14,18	A
32	1,83	A	32,25	A	0,55	A	24,43	A	14,41	A	3,02	B	14,50	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 4.10. Atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H20)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,75	A	0,09	A	5,40	A	102	A	0,75	A	0,57	A	0,15	A
8	5,79	AB	0,08	A	5,56	A	113	AB	0,69	A	0,55	A	0,13	A
16	5,81	AB	0,09	A	5,88	A	110	AB	0,66	A	0,55	A	0,13	A
32	5,91	B	0,09	A	6,20	A	123	B	0,62	A	0,56	A	0,10	A
	H+Al		Fe		Cu		Mn		Zn		C		M.O.	
	cmolc dm^{-3}				mg dm^{-3}						%		g dm^{-3}	
0	2,08	A	36,68	A	0,67	A	21,93	A	23,70	A	1,21	A	10,68	A
8	2,11	A	35,81	A	0,71	A	22,62	A	22,98	A	1,12	A	10,93	A
16	1,99	A	35,31	A	0,65	A	19,81	A	15,38	A	1,12	A	11,18	A
32	1,94	A	33,81	A	0,70	A	21,81	A	19,23	A	1,46	A	10,81	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 4.11. Atributos químicos do solo na profundidade de 20-30 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	pH		N		P		K		Ca		Mg		Al	
	(H20)		%		mg dm^{-3}				cmolc dm^{-3}					
0	5,72	A	0,08	A	3,46	A	78	A	0,70	A	0,49	A	0,23	A
8	5,70	A	0,09	A	3,31	A	81	A	0,77	A	0,47	A	0,25	A
16	5,69	A	0,09	A	3,35	A	85	A	0,67	A	0,44	A	0,25	A
32	5,76	A	0,08	A	4,55	A	85	A	0,74	A	0,47	A	0,23	A
	H+Al		Fe		Cu		Mn		Zn		C		M.O.	
	cmolc dm^{-3}				mg dm^{-3}						%		g dm^{-3}	
0	2,17	A	46,56	A	0,61	A	15,50	A	35,56	A	0,99	A	7,00	A
8	2,16	A	57,25	A	0,60	A	16,00	A	33,50	A	0,98	A	6,93	A
16	2,26	A	50,00	A	0,60	A	15,25	A	32,75	A	0,92	A	6,87	A
32	2,20	A	46,62	A	0,70	A	16,12	A	33,75	A	0,96	A	6,87	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 4.12. Atributos químicos do solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicada, safra 2008-2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Adubação base (kg.ha^{-1})			
	0	100	200	300
	pH (H_2O)			
0	5,67 A	5,62 A	5,87 A	5,80 A
8	5,75 A	5,87 AB	6,10 A	6,00 AB
16	6,05 B	5,92 B	5,95 A	5,97 AB
32	6,12 B	6,30 C	6,12 A	6,25 B
	K (mg dm^{-3})			
0	115 A	74 A	91 A	120 A
8	109 A	112 B	119 AB	108 A
16	116 A	116 B	103 AB	116 AB
32	148 B	132 B	123 B	148 B
	Mg (cmolc dm^{-3})			
0	0,73 A	0,61 A	0,65 A	0,62 A
8	0,65 A	0,66 AB	0,60 A	0,66 A
16	0,67 A	0,70 B	0,64 A	0,63 A
32	0,68 A	0,72 B	0,65 A	0,70 A
	H+Al (cmolc dm^{-3})			
0	2,41 A	2,44 A	2,06 A	2,10 A
8	2,27 A	2,15 AB	2,17 AB	2,04 AB
16	1,89 B	2,00 B	2,13 AB	1,83 B
32	1,93 B	1,81 C	1,90 B	1,69 B

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O efeito do carvão na disponibilidade do P foi verificado somente na camada de 0-10 cm, que aumentou conforme se aumentou as doses de carvão, no entanto este

efeito foi verificado apenas para a dose de 32 Mg ha^{-1} (Tabela 4.9), aumentando em 42% sua disponibilidade. Esses dados estão de acordo com os obtido por Novak et al. (2009) que verificaram na camada de 0-10 cm aumento de 16% na disponibilidade de P em um solo com 730 g kg^{-1} de areia, por Gundale & De Luca (2007) que observaram aumento nos teores de fosfato (PO_4^-) com a aplicação de 2% de carvão em solo arenoso (8% argila), mas no entanto diferem dos encontrados por Lehmann et al. (2003) que não verificaram efeito das adições de carvão na disponibilidade de P em Latossolo. Esse efeito de maior disponibilidade do P em solos arenosos, comparado a solos argilosos, pode estar relacionado à maior adsorção pelos complexos minerais, como óxidos de ferro e alumínio presentes na maioria dos latossolos argilosos, indisponibilizando o mesmo na solução do solo. Segundo Santos et al. (2008), em solos tropicais e subtropicais os óxidos de ferro e as quantidades de Al substituindo o Fe são os principais responsáveis pela adsorção de P ao solo. No trabalho de Lehmann et al. (2003) observa-se aumento na disponibilidade de P com a aplicação de carvão, no entanto não houve diferença significativa, sugerindo que novos trabalhos devem ser conduzidos com maiores doses de carvão para solos com maiores teores de argila, uma vez que a composição mineralógica desses solos diferem dos solos arenosos. Isso vem a sustentar a hipótese de Glaser et al. (2002) quanto ao maior efeito da aplicação de carvão em solos arenosos.

A disponibilidade de K nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm foi significativamente influenciada com a aplicação de 32 Mg ha^{-1} de carvão (Tabelas 4.9 e 4.10) e não houve efeito na camada de 20-30 cm (Tabela 4.11). Houve interação significativa na camada de 0-10 cm para os fatores doses de carvão e adubação de base, sendo os teores de K aumentados com a aplicação de 32 Mg ha^{-1} de carvão em todos os níveis de adubação de base (Tabela 4.12). De maneira geral, o maior efeito do carvão é verificado quando aplicados 100 kg ha^{-1} de adubo de base, em que a maior dose de carvão proporcionou aumento de 78% na disponibilidade de K (Tabela 4.12). Resultados semelhantes foram verificados por Tryon (1948) com aplicação de carvão em solos arenosos e confirmado por Novak et al. (2009) com aumento de aproximadamente 88% na disponibilidade de K quando aplicados 1% de carvão em solo arenoso, que se considerado a densidade desse solo em torno de 1,4 g cm^{-3}, seria o mesmo que aplicar 28 Mg ha^{-1}, valor muito próximo do utilizados nesse experimento. Verifica-se que a disponibilidade de K nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm é 53% superior em relação à camada de 20-30 cm na dose de 32 Mg ha^{-1}, no entanto, esses teores de K nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm não

diferem entre si (Tabelas 4.9 e 4.10), isso se deve ao fato de que o carvão foi incorporado até uma profundidade de 10-15 cm. Comportamento semelhante foi verificado no solo que não recebeu aplicação de carvão, em que os teores de K nas camadas de 0-10 e 10-20 cm não diferiram entre si, contudo a disponibilidade nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm foi 29% superior comparado a 20-30 cm. Portanto, ao analisar separadamente os dados das profundidades de 0-20 cm em relação a 20-30 cm para o solo que recebeu aplicação de carvão e o que não recebeu, a disponibilidade de K foi superior 53% e 29% respectivamente, uma diferença de 24%. Diante disso, fica evidente o efeito do carvão na maior retenção de K em solos com aplicação de carvão, evitando a lixiviação do mesmo para as camadas mais profundas. Lehmann et al. (2003) verificaram significativa redução na lixiviação de K com a aplicação de carvão + fertilizante em um Latossolo.

O Ca teve os teores no solo aumentados com a aplicação de 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1} de carvão, apenas na profundidade de 0-10 cm (Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11). Não houve interação entre as doses de carvão e adubo de base quanto à disponibilidade de Ca (Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8). Os dados mostram um aumento nos níveis de Ca na ordem de 36% quando utilizado 32 Mg ha^{-1} em relação a testemunha. Essas observações vão de encontro com os encontrados por Van Zwieten et al. (2010), no qual a aplicação de carvão aumentou os níveis de Ca e por Steiner et al. (2007) que verificaram aumento na disponibilidade de Ca com a aplicação de carvão + fertilizante. No entanto, Rondon et al. (2006) observaram redução na disponibilidade de Ca com aplicações de 60 Mg ha^{-1} a 180 Mg ha^{-1} de carvão em solo com textura argilosa (latossolo), atribuindo este efeito às baixas quantidades de carvão aplicadas quando comparadas com as utilizadas por Lehmann et al. (2003) (200 Mg ha^{-1} a 400 Mg ha^{-1}) em latossolo. Estes dados novamente reforçam a hipótese de Glaser et al. (2002) sobre a maior eficiência do uso do carvão em solos arenosos. Portanto, esses dados demonstram o comportamento diferenciado dos solos de diferentes texturas, levando a conclusão de que quanto mais argiloso for o solo, maior deve ser a quantidade de carvão a ser aplicada.

Todas as doses de carvão reduziram os teores de Al na camada de 0-10 cm, chegando a mais de 100% (Tabela 4.9), todavia não se verificou efeito nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm (Tabelas 4.10 e 4.11. Esses dados corroboram com os obtido por Cochrane & Sánchez (1980) e Mbagwu & Picollo (1997) e confirmados por Topoliantz et al. (2005) que verificaram redução nos teores de Al de aproximadamente 100% com a aplicação de carvão. A disponibilidade de Al está

diretamente relacionada ao pH (Escosteguy & Bissani, 1999), em que o aumento de pH resulta em redução na disponibilidade de Al, e esta relação se dá quase sempre de forma logarítmica ou exponencial, e também aos níveis de Ca como observado por Gatiboni et al. (2003). O aumento no pH leva à formação de complexos de Al que precipitam ao longo do perfil do solo. O Ca pode se ligar a compostos hidrossolúveis os quais podem ser trocados por Al, diminuindo seu teor no solo e aumentando os teores de Ca (Haynes & Mokolobate, 2001).

Comportamento semelhante foi verificado para a acidez potencial (H + Al) que foi reduzida na camada de 0-10 cm com a adição de 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1} (Tabela 4.9) e não verificou-se efeito para as profundidades de 10-20 cm e 20-30 cm (Tabelas 4.10 e 4.11). Houve interação significativa entre os fatores doses de carvão e adubo de base para o mesmo parâmetro (Tabela 4.12), sendo que as doses de 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1} reduziram a acidez potencial em todos os níveis de adubação de base concordando com os dados obtidos por Madari et al. (2006). Segundo esses autores o fato se deve ao efeito do poder tampão da matéria orgânica na forma de carvão. Esses dados já eram esperados em função do aumento de pH e diminuição dos teores de Al. Os teores de Mg foram significativamente influenciados pela interação doses de carvão e adubo de base na camada de 0-10 cm (Tabela 4.12).

A interação que resultou em efeito foi verificada com a aplicação de 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1} de carvão combinadas com 100 kg ha^{-1} de adubo de base. A aplicação de carvão junto com fertilizante também aumentou os níveis de Mg em trabalhos conduzidos por Steiner et al. (2007). Essas observações vão de encontro com os encontrados por Van Zwieten et al. (2010), que observaram aumento nos teores de Mg com a aplicação de carvão. De maneira geral, não se observa efeitos do carvão na disponibilidade de Mg (Tabelas 4.9, 4.10, e 4.12) nas diferentes camadas. Novak et al. (2009) verificaram efeitos semelhantes para Mg, em que até reduziu os teores no solo após a aplicação de 0,5%, 1% e 2% de carvão. Os cátions bivalentes (Ca, Mg) são mais fortemente adsorvidos às superfícies de troca que os monovalentes, todavia o efeito observado para Ca não aconteceu para Mg, e a explicação pode estar associado ao raio iônico diferenciado do Ca em relação ao Mg, explicando a série liotrófica de adsorção de cátions, em que o Ca é mais facilmente adsorvido à superfície de carga do que o Mg. Portanto as superfícies de carga do carvão mostraram-se mais eficientes em se ligarem ao Ca do que ao Mg.

4.3.3 Efeito do carvão vegetal no desenvolvimento e produtividade do arroz

A biomassa seca aos 25 e 55 dias após o plantio (DAP) e produtividade foram significativamente influenciados pela aplicação de carvão (Tabela 4.13) e como já esperados, também pela adubação de base, contudo o efeito foi significativo em todos os parâmetros fisiológicos e em todas as épocas (Tabela 4.13). A interação doses de carvão e adubo de base influenciou significativamente a altura de plantas aos 25 DAP, 55 DAP e 70 DAP e a produtividade. Esses dados diferem dos obtidos por Madari et al. (2006) na cultura do arroz em experimentos em casa de vegetação com a aplicação de carvão em solo argiloso, que verificaram efeito na altura e biomassa seca das plantas de arroz. Esses dados são confirmados por Nehls (2002) com aplicação de 7,9 Mg ha^{-1} de C, equivalente a mais de 14 Mg ha^{-1} de carvão. Vários trabalhos (Yamato et al., 2006; Rondon et al., 2006; Kimetu et al., 2008) mostram efeito significativo na produtividade do arroz e outras gramíneas com a aplicação de carvão ao solo, corroborando com os dados desse trabalho.

Tabela 4.13. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na produtividade e fisiologia do arroz, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	Produtividade	Altura – DAP (cm)			
		25	40	55	70
Adubação	6,45*	113,29*	8,62*	15,66*	21,30*
Carvão vegetal	133,48*	0,18^{ns}	0,68^{ns}	1,42^{ns}	0,65^{ns}
Adubação x carvão	5,76*	4,56*	0,96^{ns}	3,66**	2,89*
C.V.	10,73	4,81	6,00	4,73	4,53
Causas da variação		Matéria seca – DAP			
		25	40	55	70
Adubação		18,49*	38,66*	33,86*	3,75**
Carvão vegetal		5,93*	1,38^{ns}	6,04*	1,76^{ns}
Adubação x carvão		1,30^{ns}	1,33^{ns}	0,67^{ns}	0,19^{ns}
C.V.		14,92	18,03	15,43	14,15

DAP: dias após plantio. C.V.: coeficiente de variância (%). *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente; ^{ns} - não significativo. DAP - Dias após o plantio.

Não houve efeito da aplicação de carvão na altura das plantas de arroz aos 25 DAP, 40 DAP, 55 DAP e 70 DAP (teste F na análise de variância e teste de médias Tabelas 4.13 e 4.14). O mesmo foi observado por Alves (2006) em testes feitos na cultura do milho (*Zea mays*), com aplicação de quatro doses de Biochar ao solo (0%; 3%; 6%; 12% e 24% do volume), onde as modificações provocadas pela adição de Biochar não

influenciaram significativamente o desenvolvimento das plantas. Já, Madari et al. (2006) verificou efeito contrário, em que observaram aumento na altura das plantas de arroz (cv. Primavera) principalmente nos estágios iniciais de desenvolvimento da cultura com a aplicação de 21 Mg ha^{-1}de carvão em solo argiloso em ambiente controlado, o mesmo acontecendo em trabalho realizado por Steiner et al. (2007) também na cultura do arroz, onde a aplicação de uma mistura de carvão e fertilizante aumentou a altura das plantas. Tal efeito pode ser explicado pelo fato da cultura ter sido instalada logo após (sete dias) a incorporação do carvão ao solo, não havendo tempo para que as estruturas aromáticas do carvão sofressem algum tipo de oxidação e assim liberando sítios quimicamente reativos para se ligarem aos nutrientes ou aumentar a absorção de água e por conseguinte se tornar habitat de microrganismos do solo.

A matéria seca foi negativamente influenciada pela aplicação de carvão ao solo (Tabela 4.14) aos 25 e 55 DAP. Efeitos totalmente contrários foram observados por Madari et al. (2006) que verificaram aumento de biomassa seca na cultura do arroz principalmente nos estágios inicias de desenvolvimento da cultura (embora em solo argiloso e casa de vegetação) e por Nehls (2002) que relatou aumento de 100% - 320% na biomassa seca de plantas de arroz com a aplicação superior a 14 Mg ha^{-1} de carvão.

Tabela 4.14. Produtividade, altura e matéria seca do arroz, safra 2008/2009, em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Produtividade (kg ha^{-1})	Altura (cm)							
		25		40		55		70	
0	497 A	31,48	A	58,42	A	66,01	A	67,57	A
8	670 B	31,47	A	57,51	A	64,33	A	66,11	A
16	816 C	31,41	A	57,02	A	64,60	A	66,71	A
32	1053 D	31,13	A	56,83	A	66,09	A	66,58	A
Carvão (Mg ha^{-1})		Matéria seca (g 10 $plantas^{-1}$)							
		25		40		55		70	
0		2,16	B	5,33	A	13,75	B	19,07	A
8		1,97	AB	5,78	A	11,95	A	19,01	A
16		1,84	A	5,35	A	11,25	A	17,96	A
32		1,75	A	5,09	A	11,42	A	17,29	A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. 25, 40, 55 e 70: dias após o plantio (DAP).

A redução na matéria seca das plantas de arroz observadas no presente trabalho foi muito provavelmente, em função do período de estiagem (falta de chuva, veranico) ocorrido justamente no período do início do desenvolvimento da cultura e no florescimento da cultura (Figura 4.2), correspondendo às épocas de avaliações aos 25 e 55 DAP desses parâmetros. Essa influência negativa do carvão na produção de matéria seca nos períodos de estiagem se deve ao fato de que por ter sido aplicado e incorporado ao solo dias antes do plantio o mesmo não sofreu alterações em suas estruturas aromáticas, não contribuindo com o efeito que se esperava do mesmo que é a retenção de umidade. Pelo contrário, o efeito foi de hidrofobicidade, contribuindo para o aumento da água livre na solução do solo e conseqüentemente, sua evaporação nos dias sem precipitação e aumento na transpiração das plantas em função de altas temperaturas ocorridas nesse mesmo período (Figura 4.2).

Devido sua estabilidade no solo e hidrofobicidade (Madari et al., 2009; Cunha et al., 2009) o efeito inicial na retenção de água após a aplicação ao solo pode não ser expressado. Vale lembrar que, no momento da combustão da madeira, compostos condensados de alcatrão e outros produtos podem ser acumulados nos poros, obstruindo a entrada de água e conseqüentemente sua retenção. Para liberar esses espaços porosos e conseqüentemente os sítios reativos é necessários a oxidação das bordas das estruturas aromáticas (Glaser et al., 2000, 2001) e isso pode levar algum tempo. Cheng et al. (2006) observaram oxidação das estruturas aromáticas do carvão após quatro meses de incubação do carvão a 30°C. De acordo com Carcaillet & Thinon (1996) e Chan et al. (1999), a superfície interna aumenta progressivamente à medida que suas estruturas são oxidadas.

Observa-se efeito significativo da aplicação de carvão na produtividade de grãos, sendo o efeito crescente à medida que se aumentam as doses de carvão (Tabela 4.14). A produtividade aumentou em 34%, 64% e 112% com a aplicação de 8 Mg ha^{-1}, 16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1} de carvão, respectivamente, quando comparado à testemunha, corroborando com os resultados de Steiner et al. (2007), que observaram o dobro de aumento na produtividade de arroz quando aplicado carvão vegetal junto com fertilizante e confirmados por Oguntunde et al. (2004) no cultivo do milho em solo com carvão e carvão + fertilizante, observando produtividades superiores à testemunha em 91% e 278 % respectivamente.

A Figura 4.7 mostra uma alta correlação e com tendência linear entre a aplicação de carvão e produtividade, ou seja, à medida que se aumentam as doses de carvão aplicado, aumenta-se a produtividade.

As baixas produtividades observadas são em função de períodos de estiagem nessa safra, que ocorreram no período que coincidiu com o início do desenvolvimento da cultura e no florescimento (Figura 4.2) A cultura do arroz é altamente sensível ao déficit hídrico na fase reprodutiva, especialmente na floração.

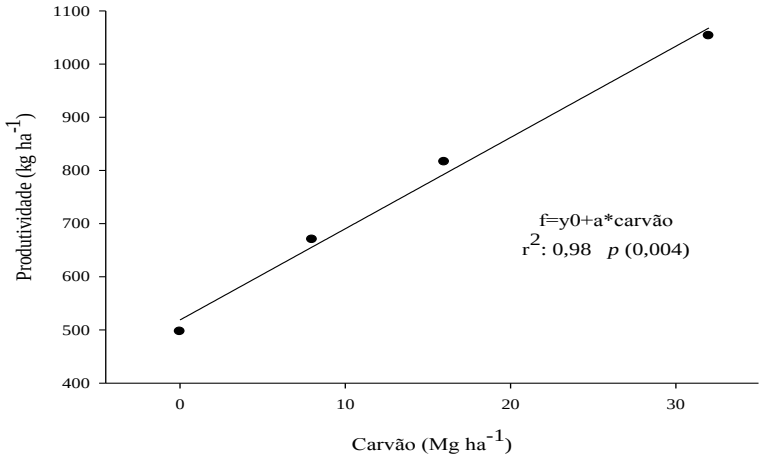

Figura 4.7. Produtividade do arroz em função de diferentes doses de carvão, safra 2008/2009 em Nova Xavantina-MT.

De maneira geral, apesar dos parâmetros fisiológicos não serem fortemente influenciados pela aplicação de carvão, a resposta em produtividade ficou claramente evidenciada. Essa resposta pode estar associada a um possível efeito eletrofisiológico do carvão vegetal para as plantas, fenômeno similar observado para as substâncias húmicas (Nardi et al., 2002), o que diminuiria a energia necessária gasta pelas plantas para a absorção da quantidade necessária de nutrientes. Segundo este mesmo autor, o efeito eletrofisiológico se daria posssivelmente em nível celular, em que compostos de baixo peso molecular oriundos do carvão vegetal atravessam a membrana plasmática com facilidade, carreando junto com si nutrientes, hormônios e outros compostos orgânicos. Outro fato pode estar relacionado com o aumento na absorção de nutrientes, uma vez que alguns nutrientes tinham sua disponibilidade no solo aumentada como P, K e Ca. Vale ressaltar que a redução de forma significativa dos teores de Al no solo, também pode ter contribuído para diminuir o efeito fitotóxico às raízes aumentando assim a absorção de nutrientes.

Houve interação significativa entre os fatores doses de carvão e adubo de base para produtividade (Tabela 4.15). Observa-se efeito significativo das doses de carvão em todos os níveis de adubação de base. Esses dados assemelham-se com os obtidos por

Steiner et al. (2007), os quais verificaram o efeito sinérgico do carvão aplicado juntamente com fertilizantes. Diversos trabalhos (Lehmann et al., 2003; Oguntunde et al., 2004; Van Zwieten et al., 2010) demonstram o efeito sinérgico da aplicação de carvão e fertilizantes, onde a maioria dos autores atribue o efeito à capacidade do carvão em reter os nutrientes em função de sua alta CTC, que com o tempo tende a aumentar a medida que as bordas das estruturas aromáticas são oxidadas. Mesmo que a oxidação das estruturas aromáticas demande um tempo para ocorrer, naturalmente o carvão já apresenta elevada superfície especifica (Kishimoto & Sugira, 1985) e conseqüentemente elevada CTC. Esse efeito se torna mais evidente em solos arenosos como reportado por Glaser et al. (2002).

De maneira geral, o efeito da interação doses de carvão e adubo de base na altura de plantas foi verificado, exceto aos 40 DAP, com a aplicação de 32 Mg ha^{-1} de carvão e sem adubo de base (Tabela 4.15), com aumento na altura das plantas de 16, 14 e 10% aos 25, 55 e 70 DAP respectivamente. Em trabalho realizado em casa de vegetação Madari et al. (2006) também observaram aumento na altura das plantas de arroz com a aplicação de 21 Mg ha^{-1} de carvão. Esses mesmos autores relatam que o efeito do carvão na altura das plantas reduz à medida que avança o estágio fenológico da cultura, confirmando os dados observados nesse trabalho, em que o aumento na altura das plantas reduziu de 16% para 10% dos 25 aos 70 DAP.

Tabela 4.15. Produtividade e altura em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Adubação base (kg ha^{-1})			
	0	100	200	300
	Produtividade (kg ha^{-1})			
0	425 A	440 A	567 A	558 A
8	516 A	702 B	841 B	619 A
16	911 B	775 B	880 B	697 A
32	1.092 C	954 C	1049 C	1.118 B
	Altura (cm) 25 DAP			
0	23,85 A	32,95 A	32,95 B	35,05 A
8	25,75 AB	32,85 A	32,05 AB	35,25 A
16	24,85 AB	32,20 A	34,25 B	34,35 A
32	27,70 B	33,05 A	29,55 A	34,25 A
	Altura (cm) 55 DAP			
0	58,05 A	67,45 A	69,00 A	69,55 A
8	57,25 A	66,90 A	66,85 A	66,35 A
16	61,95 AB	62,72 A	66,95 A	66,80 A
32	66,57 B	64,55 A	64,15 A	69,10 A

Continua...

Tabela 4.15. Continuação.

	Altura (cm) 70 DAP			
0	59,70 A	67,60 A	70,80 A	72,20 A
8	61,30 A	68,10 A	66,15 A	68,90 A
16	60,40 AB	65,05 A	70,55 A	70,85 A
32	66,12 B	66,45 A	65,95 A	67,80 A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. DAP: dia após o plantio.

4.3.4 Eficiência agronômica do uso do nitrogênio, fósforo e potássio

A eficiência agronômica da aplicação de nitrogênio, fósforo e potássio foi significativamente influenciada pelas aplicações de carvão ao solo (Tabela 4.16). A eficiência agronômica visa vislumbrar o efeito da quantidade aplicada de nutrientes sobre a produtividade, e neste caso verificou que o carvão vegetal influencia na eficiência dos fertilizantes inorgânicos. O carvão vegetal funciona nesse caso como um otimizador da eficiência nutricional que, segundo Baligar et al. (2001) e Fageria & Baligar (2001) é fundamental para aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção. De acordo com Fageria (2001), a otimização da eficiência nutricional pode ser obtida com o manejo integrado de nutrientes (MIN) que, segundo o autor, nada mais é que um "pacote de práticas que manipulam o meio de crescimento das plantas para suprimento de nutrientes essenciais na quantidade e nas proporções adequadas, visando altas produtividades sem danos ao meio ambiente".

Tabela 4.16. Análise de variância (valores de F) para os diferentes efeitos na eficiência agronômica, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	N	P	K
Adubação	50,48*	55,89*	55,86*
Carvão vegetal	23,11*	21,83*	21,84*
Adubação x carvão	$1,07^{ns}$	$1,24^{ns}$	$1,24^{ns}$
C.V.	31,45	32,01	32,01

* e** significativo a 1 e 5% respectivamente; ^{ns} - não significativo.

A eficiência agronômica do nitrogênio foi aumentada com a aplicação de 32 Mg ha^{-1} de carvão (Tabela 4.17). Observam-se as maiores eficiências no uso do nitrogênio em doses menores de aplicação dos mesmos, ou seja, quanto maior a dose de nitrogênio

aplicada menor sua eficiência em função da aplicação do carvão. Comportamento semelhante ocorre para fósforo e potássio (Tabela 4.17).

Tabela 4.17. Eficiência agronômica da aplicação de N, P e K em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Nitrogênio (kg ha^{-1})		
	20	42	65
8	13,11 A	7,41 A	1,10 A
16	16,76 A	8,47 A	2,53 A
32	25,67 B	13,04 A	10,17 B
	Fósforo (kg ha^{-1})		
	10,91	21,83	32,75
8	24,03 A	12,56 A	1,85 A
16	30,72 A	14,36 A	4,25 A
32	47,06 B	22,10 A	17,08 B
	Potássio (kg ha^{-1})		
	12,45	24,90	37,35
8	21,06 A	11,01 A	1,62 A
16	26,92 A	12,59 A	3,72 A
32	41,24 B	19,37 A	14,97 B

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Eficiência agronômica (EA) = $(PG_{cf} - PG_{sf})/(QN_a)$, em kg kg^{-1}; onde: PG_{cf} = produtividade de grãos com fertilizante, PG_{sf} = produtividade de grãos sem fertilizante e QN_a = quantidade do nutriente aplicado, em kg.

A tendência de reduzir a eficiência dos fertilizantes já era esperada, uma vez que a cultura responde bem até certa quantidade de nutrientes aplicados, depois há normalmente um decréscimo onde a eficiência se torna negativa, ou seja, não adianta mais aplicar nutrientes que a produtividade não aumentará. Trabalhos clássicos conduzidos no início do século citados por Westerman & Tucker (1987) como os de Robertson (1907), Mitscherlich (1909) e Spillman & Lang (1924) já apontavam para uma menor influência de determinado nutriente conforme se aumentava a dose aplicada. De acordo com Fageria (2006), os trabalhos de Mitscherlich e Spillman levaram ao desenvolvimento da lei dos

“incrementos decrescentes”, ou seja, ao aplicar quantidades sucessivas de um determinado nutriente, o maior incremento em produção é obtido com a primeira aplicação e que o incremento de produção é cada vez menor quanto mais se aplica um determinado nutriente. Esses dados corroboram perfeitamente com a proposição da “lei dos incrementos decrescentes”.

Portanto, doses elevadas de fertilizantes suprem a necessidade das plantas e mascaram o efeito benéfico do carvão, ou seja, as melhorias nos atributos químicos do solo com a aplicação de carvão passam a não mais fazer efeito sobre a produtividade de grãos uma vez que com a aplicação de doses elevadas dos fertilizantes, os nutrientes já estão disponíveis em quantidades satisfatórias para as plantas. Vale ressaltar ainda que em função dos períodos de estiagem ocorridos durante o ciclo da cultura, seu potencial produtivo foi reduzido significativamente em função do menor número de panículas e grãos (drenos) e conseqüentemente da necessidade de nutrientes. Esse fato reforça a hipótese que baixas quantidades de nutrientes foram suficientes para a produção estabelecida no presente trabalho. Entretanto, caso o desenvolvimento da cultura fosse normal, quantidades maiores de nutrientes se fariam necessários, o que poderia ter aumentado o efeito do carvão na aplicação de doses mais elevadas de fertilizantes.

4.3.5 Efeito do carvão vegetal na respiração e carbono da biomassa microbiana

Não houve diferença significativa na Respiração (C-CO_2) e Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) em função da aplicação de carvão ao solo (Tabela 4.18) assim como interação dos fatores carvão vegetal e adubo de base. Efeito foi verificado apenas para adubo de base. Esses resultados estão de acordo com os obtido por Gundale & DeLuca (2007), onde também não se observaram efeito do carvão na respiração do solo após a aplicação de carvão ao solo nas proporções de 0,5%; 1,0%; 2,0%; 5% e 10%. No entanto a aplicação de carvão com uma mistura de extrato de folhas de *Arctostaphylos uva-ursi* teve efeito significativo na respiração do solo. Segundo esses autores tal efeito se deve ao fato de compostos amina contidos no extrato aceleraram o processo de degradação das estruturas de carbono do carvão e de uma maior adsorção dos compostos fenólicos pelo mesmo. Essa adsorção de compostos fenólicos levaria a um melhor aproveitamento das aminas e conseqüentemente maior atividade de microorganismos. Diante disso percebe-se que os compostos fenólicos podem prejudicar a atividade microbiana.

Tabela 4.18. Análise de variância (valores de F) para Respiração e Biomassa Microbiana no solo na profundidade de 0-10cm, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Causas da variação	C-CO_2 (mg g solo^{-1} h^{-1})	C-BM (ug g solo^{-1})
Adubação	27,79*	5,51*
Carvão vegetal	0,25^{ns}	0,37^{ns}
Adubação x carvão	0,04^{ns}	1,25^{ns}
C.V.	45,11	51,49

* e ** significativo a 1 e 5% respectivamente; ^{ns} - não significativo.

A aplicação de doses até 32 Mg ha^{-1} de carvão não alterou significativamente a atividade microbiana no solo (respiração e CBM). No entanto apesar de não haver o efeito significativo, de maneira geral observa-se que a dose de 32 Mg ha^{-1} reduziu a respiração microbiana (Tabela 4.19).

Tabela 4.19. Respiração e Biomassa Microbiana no solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão aplicadas, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Respiração (C-CO_2 µg g solo^{-1} h^{-1})	Biomassa Microbiana (C-BM µg g solo^{-1})	qCO_2
0	7,98 A	462 A	31,70 A
8	8,47 A	452 A	25,94 A
16	7,92 A	474 A	22,33 A
32	7,37 A	395 A	38,52 A
Adubo base (kg ha^{-1})			
0	3,38 A	362 A	12,54 A
100	4,44 A	521 AB	11,86 A
200	11,08 B	595 B	31,56 AB
300	12,83 B	305 A	62,53 B

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.
qCO_2: (µg C-CO_2 g^{-1}. µg de C-biomassa. h^{-1}) x 10^{-3}

Esses dados corroboram com os obtidos por Jin et al., (2008) que verificaram redução na respiração com a aplicação de 12 Mg ha^{-1} e 30 Mg ha^{-1} de carvão e confirmados por Liang (2006) que também observou redução na respiração com a aplicação de carvão. Todavia esse autor observou aumento no CBM, e, conseqüentemente aumento na eficiência metabólica dos microorganismos, uma vez que o quociente

metabólico (qCO_2), que é a relação de CO_2 evoluído por unidade de CBM, reduziu de forma significativa. Nesse trabalho a redução da respiração poderia de certa forma ser um indicativo de melhoria na eficiência metabólica dos microorganismos caso a mesma dose também não reduzisse a biomassa microbiana (Tabela 4.19). Todavia verifica-se que a aplicação de 8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}, mesmo não sendo significativo aumentou a eficiência metabólica. A redução da biomassa microbiana observada nesse trabalho pode estar associada ao fato que os períodos de estiagem e as altas temperaturas ocorridas na fase de floração (reprodutiva) (Figura 4.2), que foi a época de coleta das amostras de solo. A alta dose de carvão pode ter efeito hidrofóbico diminuindo a disponibilidade de água e conseqüentemente a atividade desses microrganismos, refletindo, portanto na redução da respiração, o que ocorreu com bem menos intensidade para a dose de 16 Mg ha^{-1}. Fato este que pode ser comprovado pelos altos teores de C-total com a aplicação de 32 Mg ha^{-1} no solo na camada de 0-10 cm (Tabela 4.9). Steiner et al. (2006) verificaram redução da biomassa microbiana com aplicação de carvão ao solo, atribuindo tais resultados à natureza refratária do carvão. Segundo Vargas & Scholles (2000), os microrganismos do solo são muito sensíveis a fatores bióticos e abióticos. De acordo com Santos & Camargo (1999), as variáveis climáticas que mais influenciam a atividade dos microrganismos é a precipitação e a temperatura.

Mesmo não apresentando diferenças significativas, ao se analisar a Tabela 4.20 observa-se um comportamento de aumento na biomassa microbiana nas doses intermediárias de carvão (8 Mg ha^{-1} e 16 Mg ha^{-1}) associada às doses de 200 kg ha^{-1} e 300 kg ha^{-1} de adubo de base o que, mesmo também não apresentando efeito significativo, resulta em uma redução do quociente metabólico e conseqüentemente maior eficiência metabólica dos microrganismos. Portanto, a redução da respiração parece estar mais associada ao fato da diminuição da atividade microbiana no solo em função dos intempéries climáticos, do que pela melhoria na eficiência do metabolismo dos microorganismos.

Tabela 4.20. Respiração e Biomassa Microbiana no solo na profundidade de 0-10 cm em função das doses de carvão e níveis de adubação de base aplicada, safra 2008/2009 em Nova Xavantina, MT.

Carvão (Mg ha^{-1})	Adubação base ($kg.ha^{-1}$)			
	0	100	200	300
		Respiração ($C\text{-}CO_2$ µg g $solo^{-1}$ h^{-1})		
0	3,29 A	4,33 A	10,86 A	13,44 A
8	3,85 A	5,53 A	11,58 A	12,94 A
16	3,43 A	4,52 A	10,99 A	12,74 A
32	2,97 A	3,39 A	10,90 A	12,22 A
		Biomassa Microbiana (CBM µg g $solo^{-1}$)		
0	479 A	631 A	491 A	248 A
8	185 A	535 A	690 A	399 A
16	372 A	400 A	714 A	409 A
32	413 A	517 A	485 A	164 A

Médias seguidas pelas mesmas letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Houve aumento significativo da respiração e do C-biomassa microbiana em função da aduboação de base (Tabelas 4.18 e 4.19). Todavia, o CBM reduziu com a aplicação de 300 kg ha^{-1} de adubo de base. Elevadas aplicações de fertilizantes químicos reduzem a eficiência metabólica (Tabela 4.19). Tais resultados já eram esperados, uma vez que o fertilizante utilizado continha nitrogênio em sua formulação (05-25-15 NPK) e ainda foi complementado no tratamento com aplicação de 300 kg ha^{-1} de NPK em cobertura com 55 kg ha^{-1} de nitrogênio, o que contribuiu para o aumento na atividade dos microrganismos principalmente na decomposição de restos vegetais de alta relação C:N e diminuição do CBM. Esses dados estão de acordo com os obtidos por Assis et al. (2003), os quais verificaram redução de 20% na biomassa microbiana em função da aplicação de nitrogênio. O aumento do CBM nas doses de 100 kg ha^{-1} e 200 kg ha^{-1} de NPK que continham ainda em cobertura 15 kg ha^{-1} e 37 kg ha^{-1} de N, respectivamente, pode ser atribuído ao fato de que estas doses apenas estimularam em menor escala a atividade microbiana, o que não aconteceu com a dose mais elevada em função das altas doses de N.

4.3.6 Efeito da biomassa carbonizada (carvão vegetal) na emissão de óxido nitroso (N_2O)

Os fluxos (emissões) de N_2O do solo dependem, principalmente, além da quantidade do adubo nitrogenado a ele adicionado, das condições edáficas e climáticas. Logo após eventos pluviométricos, por exemplo, pode haver aumento de fluxos. Na Figura 4.8 verifica-se que os fluxos da testemunha e do pasto foram baixos durante todo o período da medição. Onde foi aplicado N, como esperado, os maiores fluxos aconteceram logo depois da aplicação do adubo nitrogenado. A avaliação de efeito da aplicação de carvão vegetal sobre os fluxos de N_2O é complexo devido às inconsistências observadas. Depois da aplicação do N na base, a maior dose de carvão provocou grande fluxo do gás para a atmosfera. Nesse contexto, não houve consistência no efeito das demais doses, sendo que a dose de 16 Mg ha^{-1} houve fluxo menor que a dose de 8 Mg ha^{-1} ou a testemunha (0 Mg ha^{-1}). Na ocasião da aplicação do N em cobertura, logo depois a testemunha emitiu menos e a dose 8 Mg ha^{-1} mais. Logo depois da aplicação do N teve um evento relativamente forte de chuva que provocou maiores fluxos. Nesse evento, de novo, a testemunha emitiu menos gás e as demais doses emitiram similarmente entre si. Há também uma leve defasagem, principalmente após a aplicação do adubo base, entre os picos de emissão, observado, principalmente, no caso da dose 32 Mg ha^{-1}. No caso dessa dose há uma maior emissão durante 12 dias, comparado com as outras doses e testemunha.

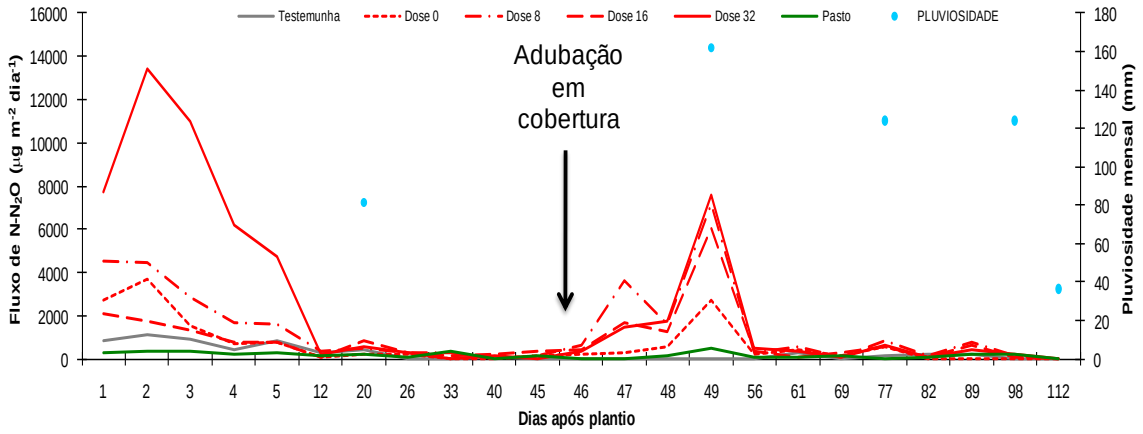

Figura 4.8. Fluxos do gás de efeito estufa óxido nitroso (N_2O) durante o ciclo da cultura do arroz de terras altas. As doses de N foram fixas a 111 kg uréia ha^{-1} durante todo o ciclo da cultura distribuídas em duas partes, aproximadamente 50% logo antes da semeadura e 50% em cobertura, na forma de uréia. Testemunha: parcelas sem N e sem carvão para o cálculo do fator de emissão; dose 0: 0 Mg ha^{-1} carvão vegetal; dose 8: 8 Mg ha^{-1} carvão vegetal; dose 16: Mg ha^{-1} carvão vegetal; dose 32: Mg ha^{-1} carvão vegetal; Pasto: pastagem original (na condição de antes da instalação do experimento).

As emissões totais durante os 113 dias da cultura do arroz estão apresentadas na Tabela 4.21.

Tabela 4.21. Emissões totais do gás óxido nitroso (N_2O) durante o ciclo completo (113 dias) da cultura do arroz de terras altas. F=11,34; CV=37,94%, safra 2008-2009 em Nova Xavantina, MT

Tratamento	Emissão total de N_2O, μg N-N_2O m^{-2} dia^{-1}	Fator de emissão, %
Testemunha	7600,0 c	-
Pasto	7017,0 c	-
0	14429,6 bc	0,3
8	33868,7 ab	1,0
16	24915,6 bc	0,7
32	47474,8 a	1,6

0: Dose 0 Mg ha^{-1} carvão vegetal; 8: Dose 8 Mg ha^{-1} carvão vegetal; 16: Dose 16 Mg ha^{-1} carvão vegetal; 32: Dose 32 Mg ha^{-1} carvão vegetal.

As emissões totais observadas na testemunha e pasto são comparáveis com os dados encontrados na literatura (Tabela 4.22), embora em solo diferente. As emissões encontradas nos tratamentos com a aplicação de carvão vegetal são, no mínimo, quatro vezes maiores do que os valores geralmente encontrados no Brasil. Os fatores de emissão nos tratamentos onde houve adição de carvão ao solo também são mais altos do que é observado, em geral, para os solos no Brasil (por ex. Madari et al., 2006 e dados ainda não publicados), principalmente na maior dose de carvão vegetal (dose 32). Os maiores fatores de emissão podem estar relacionados à maior permanência do adubo nitrogenado (N) no solo na presença do carvão vegetal. É conhecido que o N aplicado na forma de uréia é perdido, em grandes quantidades por volatilização na forma de NH_3. Uma explicação provável é que o carvão vegetal é capaz de reter parte do N no solo, liberando-o aos poucos e assim esse N entra no processo de transformação biológica, que por sua vez libera óxido nitroso. Assim, o carvão vegetal pode ter aumentado a emissão direta desse gás, mas ao mesmo tempo diminuído a emissão indireta (por evolução de amônia). É muito difícil de obterem-se dados confiáveis a respeito de emissões indiretas.

Tabela 4.22. Fluxos de N_2O observados em estudos realizados no Brasil.

Referência	Local	Tipo de Solo	Época	Fontes de Nitrogênio	Cultura	Fluxo N-N_2O* (ug. $m^{-2}.d^{-1}$)	
						SPD	SPC
Carvalho et. al. 2008	St. Antonio de Goiás, GO.	Latossolo	Inverno	Uréia	Feijão	1.700	-
Giacomini et. al. 2006	Sta. Maria, RS	Argissolo	Verão	Dejeto líquido de suíno	Palhada de aveia	7.100	7.100
Jantalia et. al. 2008	Passo Fundo, RS	Latossolo	Verão/ inverno	N mineral	Soja/Trigo	2.400	3.720
					Soja	1.680	3.072
					Trigo	2.352	2.640
Jantalia et. al. 2006	Londrina, PR	Latossolo	Verão/ inverno	FBN + N.mineral	Soja/ Tremoço	840	720
					Milho/ Aveia	504	528
Zanatta, 2009	Porto Alegre, RS	Argissolo	Verão	Sem N mineral	Aveia preta/Milho	1.200	2.880
					Ervilhaca /Milho	4.560	3.840
Gonçalves, 2002	Taubaté, SP	Latossolo	Inverno	Sulfato de Amônio	Feijão	1.872	-
				Lodo de esgoto	Feijão	480	-

Maiores fluxos de N_2O ao longo do ciclo da cultura, todos os valores foram convertidos para ug. $m^{-2}.d^{-1}$, sendo 1 ug = 10^{-6} g. SPD = sistema plantio direto; SPC = sistema plantio convencional.
Fonte: Adaptado de Costa et al. (2009).

Devido à complexidade das causas das emissões de óxido nitroso há várias possíveis explicações dos fatos observados.

Fatores envolvidos nas emissões de óxido nitroso (N_2O): A nitrificação e a desnitrificação são os processos que dão origem às emissões de N_2O do solo, porém são processos que funcionam em condições redox opostas. Por ser um processo aeróbico, solos bem drenados favorecem a nitrificação, enquanto que solos saturados com água favorecem a desnitrificação. Porém, adequada disponibilidade de água e temperatura do solo são importantes para otimizar a nitrificação (Jantalia et al., 2006).

A disponibilidade de matéria orgânica no solo é essencial para a ocorrência do processo de desnitrificação. Muitos organismos podem desnitrificar, desde que ocorram condições anaeróbicas no solo, sendo a temperatura do solo um fator de grande importância (Smith et al., 2003).

O aumento da temperatura do solo leva a um acréscimo no tamanho das zonas anaeróbicas, pois eleva as taxas respiratórias, e conseqüentemente, o gradiente de

concentração de oxigênio é aumentado, deixando o volume do poro ainda mais desprovido de oxigênio (Li et al., 2000).

A umidade ou grau de saturação de água no solo também tem efeito sobre as emissões de N_2O. A nitrificação é um processo aeróbico, mas como organismos envolvidos no processo podem atuar na desnitrificação do NO_2, quando o oxigênio se torna limitante, (Poth & Focht, 1985), a elevação da saturação do solo com água promove a produção de N_2O associado à nitrificação (Goodroad & Keeney, 1984). Além da temperatura e umidade do solo, a disponibilidade de nitrogênio mineral no solo é outro fator importante para as emissões de N_2O do solo (Smith et al., 2003).

Considerando isso, o efeito observado do carvão vegetal sobre a emissão de N_2O (indução de emissão) pode ser devido a, entre outros fatores;

Aumento da porosidade do solo e da água disponível;

Aumento do teor e estoque de C no solo e, como também conseqüência desses;

Estimulação da atividade microbiana do solo e subseqüente atividade enzimática. O carvão vegetal fornece "habitat" para o crescimento da população microbiana (Hamer et al., 2004);

Entre esses fatores, nesse estudo não houve efeito do carvão vegetal para a atividade microbiana no solo e também não foi encontrado correlação entre a emissão de N_2O e a atividade microbiana ($C\text{-}CO_2$: r=-0,22; qCO_2: r=0,06, CBM: r=-0,05, qmic: r=0,02), entretanto, falta ainda verificar se o carvão vegetal teve efeito na emissão desse gás através seu efeito nas propriedades físicas do solo.

4.4 CONCLUSÃO

Como efeito imediato (de curto prazo) após incorporação em solo arenoso

1. O carvão vegetal melhorou as propriedades de fertilidade do solo (pH, P, K, Ca,Mg, Al, H+Al) o que pode ser, parcialmente, devido à adição de nutrientes ao solo junto com o carvão;

2. O carvão vegetal não teve efeito sobre o crescimento (altura) das plantas e na acumulação de matéria seca da parte aérea de arroz de terras altas mas teve efeito positivo e linear na produtividade do arroz;

3. A adição do carvão vegetal ao solo aumenta a eficiência agronômica dos fertilizantes minerais, podendo contribuir para sua utilização racional;

4. O carvão vegetal nas doses e condições avaliadas não interferiu na atividade microbiana;

5. O carvão estimulou a emissão do gás de efeito estufa óxido nitroso para acima de valores normalmente encontrados em sistemas agrícolas no Brasil.

4.5 REFERÊNCIAS

ALVES, M. **Impactos da utilização de fino de carvão e extrato pirolenhoso na agricultura.** 2006. 52 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, São Paulo, 2006.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such pH, on the microbial of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.

ASSIS, E. P. M.; CORDEIRO, M. A. S.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C. Efeito da aplicação de nitrogênio na atividade microbiana e na decomposição da palhada de sorgo em solo de cerrado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 33, n. 2, p. 107-112, 2003.

BALIGAR, V. C. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v. 32, n. 7/8, p. 921-950, 2001.

BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F. R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1269-1276, 2007.

CARCAILLET, C.; THINON, M. Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data. **Review Palaeobotany and Palynology**, Amsterdam , v. 91, n. 1-2, p. 399–416, 1996.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CARPIM, L.; ASSIS, R. L.; BRAZ, A. J. B. P.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R.; PEREIRA, V. C.; GOMES, G. V.; SILVA, A. G. Liberação de nutrientes pela palhada de milheto em

diferentes estádios fenológicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. spe, p. 2813-2819, 2008.

CHAN, M. L.; JONES, J. M.; POURKASHANIAN, M.; WILLIAMS, A. Oxidative reactivity of coal chars in relation to their structure. **Fuel**, Oxford, v. 78, n. 13, p. 1539–1552, 1999.

CHENG, C-H.; LEHMANN, J.; THIES, J. E.; BURTON, S. D.; ENGELHARD, M. H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1477–1488, 2006.

COSTA, A. R.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDES, T. G.; SILVEIRA, P. M. Uso do nitrogênio na agricultura e suas implicações sobre a emissão do gás de efeito estufa óxido nitroso (N_2O). Série documentos da Embrapa Arroz e Feijão (in press)

COCHRANE, T. T.; SANCHEZ, P. A. Land resources, soil properties and their management in the Amazon region: a state of knowl-edge report. In: **International Conference on Amazon Land Use and Agricultural Research**, CIAT, Cali, Colombia. 1980.

CRUSCIOL, C. A. C.; COTTICA, R. L.; LIMA, E. V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 2, p. 161-168, 2005.

CUNHA, T. J. F; NOVOTNY, E. H.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; MARTIN-NETO, L.; SANTOS, G. A. CARBONO PIROGÊNICO. In TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, E. N.; Woods, W. I. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1º ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 2009. p. 263-284.

ESCOSTEGUY, P. A.; BISSANI, C. A. Estimativa de H+Al pelo pH SMP em solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 175-179, 1999.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de Solo.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2ed. rev. atual., 1997. 212 p.

FAGERIA, N. K. Adubação e calagem. In: EMBRAPA – CNPAF. SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. de A. (Ed). **A cultura do Arroz no Brasil**. Santo Antonio de Goiás. 2006. p. 425-450.

FAGERIA, N. K. Nutrient management folr improving upland rice productivity and sustainaibability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v. 32, n.15/16, p. 2603-2629, 2001.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sutainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v. 32, n.7/8, p. 1303-1319, 2001.

FAGERIA, N. K.; SOUZA, N. P. Resposta das culturas de arroz e feijão em sucessão à adubação em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n. 3, p.359-368, mar. 1995.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. dos S.; KAMINSKI, L. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n. 2, p.283-290, mar-abr, 2003.

GLASER B,; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.31, n. 7-8, p. 669–678, 2000.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The Terra Preta phenomenon – a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften,** Berlin, v. 88, n. 1, p. 37–41, 2001.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soil in the tropic with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 35, n. 4, p. 219-230. 2002.

GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação de solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 67-75, 2006.

GOODROAD, L. L.; KEENEY, D. R. Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 16, n. 1, p. 39-43, 1984.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p.703-707, 2001.

GUNDALE, M. J.; DeLUCA, T. H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growthof Koeleria macrantha in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem. **Biology and Fertility of Soils,** Berlin, v. 43, n. 3, p. 303-311. 2007.

HAMER, U.; MARSCHNER, B.; BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. **Organic Goechemistry,** Oxford, v. 35, n. 7, p. 823-830, 2004.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agoecosystems**, Dordrecht, v. 59, n. 1, p. 47-63, 2001.

JANTALIA, C. P.; ZOTARELLI, L.; SANTOS, H. P.; TORRES, E.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Em busca da mitigação da produção de óxido nitroso em sistemas agrícolas: avaliação de práticas usadas na produção de grãos do sul do País. In: ALVES et al (eds) **Manejo de Sistemas Agrícolas: Impacto no Seqüestro de C e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Genesis, Porto Alegre, 2006.

JIN, H.; LEHMANN, J.; THIES, J. E. Soil microbial community response to amending corn soils with corn stover charcoal. In: 2008 CONFERENCE OF INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, 2.,2008, Newcastle. **Resumo**s…Newcastle: IBI, 2008.

KIMETU, J. M.; LEHMANN, J.; NGOZE, S.; MUGENDI, D. N.; KINYANGI, J.; RIHA, S., VERCHOT, L.; RECHA, J. W.; PELL, A. Reversibility of productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. **Ecosystems,** New York, v. 11, n. 5, p. 726-739, 2008.

KISHIMOTO, S.; SUGIRA, G. Charcoal as a soil condition. In: SYMPOSIUM ON FOREST PRODUCT RESEARCH INTERNATIONAL: ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE, 1985, Pretoria. **Resumos...**Pretoria: National Timber Research Institute, 1985, v. 5, p. 22-26.

LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GERMAN, L. A.; MCCANN, J.; MARTINS, G. C.; MOREIRA, A. Soil Fertility and Production Potential. In LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (eds) **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003b. p. 105-124.

LEHMANN, J.; SILVA, J. P. DA; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, The Hague, v. 249, n. 2, p. 343-357, 2003a.

LI, C.; ABER, J.; BUTTERBACH-BAHL, K. P. H. A process-oriented model of N_2O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. **Journal of Geophysical Research**, Washington,v. 105, n. 4, p. 4369-4384, 2000.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZÃO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 1719–1730, 2006.

MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Comunicado Técnico 125**. EMBRAPA: Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. Goiânia, GO. 2006. 4 p.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (terra preta de índio). Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B.

E.; LIMA, E. N.; Woods, W. I. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1º ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 2009. p. 172-188.

MBAGWU, J. S. C.; PICCOLO, A. Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield. In: DROZD J, GONET SS, SENESI N, WEBER J (eds) **The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection**. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland, 1997. p. 921–925.

NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; MUSCOLO, A.; VIANELLO, A. Physiological effects of humic substances on higher plants. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 10, p. 1527-1536, 2002.

NEHLS, T. **Fertility improvement of a Terra Firme Oxisol in central Amazonia by charcoal applications**. 2002. MSc thesis, University of Bayreuth, Germany.

NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, A. S. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. **Soil Science**, Madison, v. 174, n. 2, p. 105-112, 2009.

OGUNTUNDE, P. G.; FOSU, M.; AJAYI, A. E.; GIESEN, N. V. Effects of charcoal production on maize yeld, chemical properties and texture of soil. **Biology and Fertility of Soils,** Berlin, v. 39, n. 4, p. 296-299. 2004.

POTH, M.; FOCTH, D. D. ^{15}N kinetic analysis of N_2O production by Nitrossomonas europeae: an examination of nitrifier-denitrification. **Applied Environmental Microbiology**, Washington, v. 49, n. 5, p. 1134-1141, 1985.

POWLSON, D. S.; BROOKES, P. C.; CHRISTESEN, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 159-164, 1987.

RONDON, M. A.; LEHMANN, J.; RAMÍREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biology and Fertility of Soils,** Berlin, v. 43, n. 6, p. 699-708. Sep. 2006.

SANTOS, A. B.; SILVA, O. F.; FERREIRA, E. Avaliação de práticas culturais em um sistema agrícola irrigado por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasilia, v. 32, n. 3, p. 317-327. 1997.

SANTOS, D. R,; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sitema plantio direto. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.** 1.ed. Porto Alegre: Genesis Edições, 1999.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J., REY A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical

factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, Aberystwyth v. 54, n. 4, p. 779-791. 2003.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; de MACÊDO, J. J. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term efects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 291, n. 1-2, p.275-290, 2007.

STEINER, J.; ZECH, W. TEIXEIRA, W. G. Microbial activity as soil quality indicator in annual and perennial plantations treated with charcoal, mineral or organic fertilizer in a highly weathered Amazonian upland soil. In: 18th WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE. 18., 2006. Philadelphia, Pennsylvania. **Resumos...** Philadelphia, Pennsylvania: SSSA, 2006.

STONE, L. F.; SANTOS, A. B.; STEINMETZ, S. Influência de práticas culturais na capacidade de retenção de água do solo e no rendimento do arroz-de-sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 1, p. 63-68, 1980.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C. Soil physical characterization. In LEHMANN, J., KERN, D. C., GLASER, B., WOODS, W.I. (eds) **Amazonian dark earths. Origin, properties, management**. Kluwer: Dordrecht. 2003. p. 271-286.

TOPOLIANTZ, S.; PONGE, J. F.; BALLOF, S. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 41, n. 1, p. 15-21. 2005.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 609-618, 2005.

TRYON, E. H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. **Ecology Monography**, New York, v. 18, n. 2, p. 81–115, 1948.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, The Hague, v. 327, n. 1-2, p. 235-246, 2010.

VANCE, E. D.; BOOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology Bio-chemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.

VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO_2 e N mineral de um podzólico vermelho-escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 24, n. 1, p. 35-42. 2000.

WASTERMAN, R. J.; TUCKER, T. C. Soil fertility conceps: past, present, and future. In: BOERSMA, L. L. (ed). **Future development in soil science research**. Madison: SSSA, 1987. p. 169-179.

YAMATO, M.; OKIMORI, Y.; WIBOWO, I. F.; ANSHORI, S.; OGAWA, M. Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea, peanut and soil chemical properties in south Sumatra, Indonesia. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 52, n. 4, p. 489-495, 2006.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados demonstram que a aplicação de biomassa carbonizada ou carvão vegetal (biochar) melhora as propriedades de fertilidade do solo, influencia positivamente na produtividade da soja e do arroz de terras altas e aumenta a eficiência dos nutrientes como o nitrogênio, fósforo e potássio contido nos fertilizantes químicos. O carvão aumenta a capacidade do solo em reter nutrientes e disponibilizá-los para as plantas, exercendo influencia, principalmente no pH, Ca, Mg, K, P, Al e na matéria orgânica. Os teores de Ca, Mg, K e P são aumentados com a aplicação de altas doses de carvão vegetal ao solo (16 Mg ha^{-1} e 32 Mg ha^{-1}), enquanto os teores de Al são reduzidos assim como a acidez do solo.

Com a aplicação de carvão ao solo, aumentou-se a produtividade da soja e do arroz, em que o comportamento para a produtividade da soja segue um comportamento quadrático, ou seja, a produtividade aumenta até certa dose de carvão e depois tende a não mais haver resposta. Já para a cultura do arroz o comportamento da produtividade segue uma tendência linear com a aplicação de carvão. Entretanto, o efeito do carvão vegetal adicionado ao solo na produtividade das culturas da soja e do arroz não pode ser explicado inteiramente pelo seu efeito na fertilidade do solo. Possivelmente outros efeitos do carvão vegetal, provavelmente de natureza eletrofisiológica, contudo ainda não explicados, estejam exercendo influência.

O carvão vegetal nas doses e condições estudadas não interfere na atividade microbiana. Todavia, de maneira geral, há tendência de redução da respiração e aumento na biomassa microbiana e conseqüentemente maior eficiência metabólica dos microrganismos. Os fluxos de emissão de N_2O são estimulados pela aplicação de carvão ao solo, com aumento significativo e acima da média normalmente observada nos sistemas agrícolas no Brasil.

Há aumento na eficiência do uso dos nutrientes contidos nos fertilizantes químicos formulados (NPK) com a aplicação de carvão no solo. Os maiores índices de

eficiência agronômica de nitrogênio, fósforo e potássio foram obtidas com a aplicação de 32 Mg ha^{-1} de carvão.

A permanência do efeito do carvão na produtividade e o aumento do seu efeito na fertilidade do solo ao longo de 3 anos mostra que o ganho na fertilidade do solo, a médio prazo, não é decorrente da carga mineral do próprio carvão, mas sim pelo seu efeito na retenção e disponibilização de nutrientes. A matéria orgânica oxidável com dicromato (M.O.) ficou inalterada com a adição de carbono pirogênico no 1º ano, mas no 3º ano houve relação positiva entre o carvão e a M.O.

Fica claramente evidenciado maior efeito benéfico do carvão vegetal quando aplicado em solos arenosos, quando comparado aos solos de textura média.

APÊNDICES

Apêncice A Vista geral da área experimental com a cultura da soja em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em Nova Xavantina, MT, safra 2006/2007..... 127

Apêndice B Incorporação do carvão vegetal na área experimental com a cultura da soja em Latossolo Veremelho-Amarelo distrófico em Nova Xavantina, MT, safra 2006/2007.. 127

Apêndice C Vista geral da área experimental com a cultura do arroz em Cambissolo Háplico Tb distrófico em Nova Xavantina, MT, safra 2008/2009..... 128

Apêndice D Vista carvão de eucalipto utilizado no experimento com a cultura do arroz em Nova Xavantina, MT, safra 2008/2009..... 128

Apêndice E Vista área do experimento com a cultura da soja em Nova Xavantina, MT, safra 2008/2009.. 129

Apêncice A Vista geral da área experimental com a cultura da soja em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em Nova Xavantina, MT, safra 2006/2007.

Apêncice B Incorporação do carvão vegetal na área experimental com a cultura da soja em Latossolo Veremelho-Amarelo distrófico em Nova Xavantina, MT, safra 2006/2007.

Apêncice C Vista geral da área experimental com a cultura do arroz em Cambissolo Háplico Tb distrófico em Nova Xavantina, MT, safra 2008/2009.

Apêncice D Vista carvão de eucalipto utilizado no experimento com a cultura do arroz em Nova Xavantina, MT, safra 2008/2009.

Apêncice E Vista área do experimento com a cultura da soja em Nova Xavantina, MT, safra 2008/2009.