

LARISSA BORGES DE LIMA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA SOJA, FERTILIDADE E DINÂMICA DA
MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLO SOB APLICAÇÃO DE BIOCHAR NO
CERRADO BRASILEIRO**

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: Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro

Co-orientador:

Prof. Dr. Fabiano André Petter

Goiânia, GO – Brasil

L732d

Lima, Larissa Borges de.

Desempenho agrônomo da soja, fertilidade e dinâmica da matéria orgânica em solo sob aplicação de biochar no cerrado brasileiro / Larissa Borges de Lima – Goiânia: UFG, 2014.

78 f. : il., figs, tabs.


Orientador: Prof^o. Dr. Wilson Mozena Leandro:

Co-orientador: Prof^o . Dr. Fabiano André Petter


LARISSA BORGES DE LIMA

**Desempenho agrônomo da soja, fertilidade e dinâmica da matéria orgânica
em solos sob aplicação de biochar no Cerrado Brasileiro**

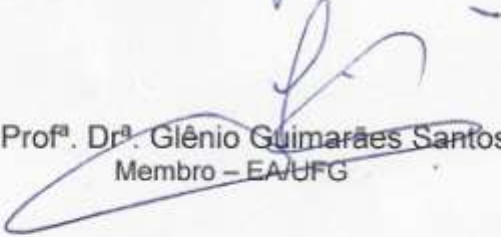
Tese DEFENDIDA em 23 de maio de 2014, e APROVADA pela Banca
Examinadora constituída pelos membros:



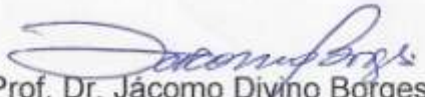
Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro
Presidente da Banca – EA/UFMG



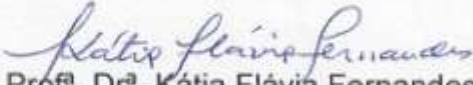
Prof. Dr. Fabiano André Petter
Membro – UFMT




Prof. Dr. Glênio Guimarães Santos
Membro – EA/UFMG



Prof. Dr. Jácomo Divino Borges
Membro – EA/UFMG



Prof. Dr. Kátia Flávia Fernandes
Membro – ICB/UFMG



Prof. Dr. Adriana Aparecida Ribon
Membro – UEG/Palmeiras - GO

Goiânia - Goiás
Brasil

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Larissa Borges de Lima		
E-mail:	lima.larissab@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor	Não possui		
Agência de fomento:	CAPES	Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	GO CNPJ:
Título:	Desempenho agrônomo da soja, fertilidade e dinâmica da matéria orgânica em solo sob aplicação de biochar no cerrado brasileiro.		
Palavras-chave:	Carvão vegetal, substâncias húmicas, produtividade.		
Título em outra língua:	Agronomic performance of soybean, fertility and organic matter dynamics in soil under application of Biochar in the Brazilian Cerrado.		
Palavras-chave em outra língua:	Charcoal, humic substances, productivity.		
Área de concentração:	Solo e Água		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	23/05/2014		
Programa de Pós-Graduação:	Agronomia		
Orientador:	Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro		
E-mail:	wilsonufg@gmail.com		
Co-orientador*	Fabiano André Petter		
E-mail:	petter@ufmt.br		

*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Larissa Borges de Lima
Assinatura do (a) autor (a)

Data: 20 / 06 / 2014

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

DEDICATÓRIA

À minha mãe *Cleide* e às minhas tias *Gláucia* e *Emilce*, aos meus irmãos *Lorena* e *Heitor*,
ao meu pai *Francisco* e ao tio *Victor*, e em especial ao meu noivo *Fabiano*, dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador ***Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro***, por estar sempre disponível, e me ajudar grandemente nessa conquista.

Ao meu co-orientador ***Prof. Dr. Fabiano André Petter***, por assumir esse projeto.

Ao ***Welinton***, pelos seus esclarecimentos e auxílios.

À Dra. ***Beáta***, ao ***Leidimar, Diogo, Fabrício e Bem Hur***, por auxiliarem no levantamento de dados.

E à ***Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes)*** e ao ***Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)*** pela concessão da bolsa e auxílio financeiro para execução deste projeto.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
RESUMO GERAL.....	10
GENERAL ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2 REVISÃO.....	15
2.1 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS).....	15
2.2 CARVÃO VEGETAL.....	17
2.3 PERSPECTIVAS DO USO DE BIOCHAR NA AGRICULTURA.....	20
2.4 TÉCNICAS DE ANÁLISE PARA QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	22
2.5 REFERÊNCIAS.....	26
3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA DESCREVER O EFEITO DO BIOCHAR NA FERTILIDADE DO SOLO E DESEMPENHO AGRONÔMICO DA SOJA.....	34
RESUMO.....	34
ABSTRACT.....	34
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
3.4 CONCLUSÕES.....	52
3.5 REFERÊNCIAS.....	52
4 COMPARTIMENTOS DE CARBONO EM SOLOS DE CERRADO SOB APLICAÇÃO DE BIOCHAR EM LONGO PRAZO.....	57
RESUMO.....	57
ABSTRACT.....	57
4.1 INTRODUÇÃO.....	58

4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	59
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.4	CONCLUSÕES.....	75
4.5	REFERÊNCIAS.....	75
5	CONCLUSÕES GERAIS.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição elementar (valores totais) do carvão vegetal utilizado no experimento.....	39
Tabela 3.2. Coordenadas (carregamentos) dos fatores das variáveis de fisiologia e da fertilidade do solo analisadas em conjunto, em base de correlações no 1º, 3º, 4º 7º e 8º ano após a aplicação de carvão vegetal ao solo (safras 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010, 2012/2013 e 2013/2014).....	50
Tabela 4.1. Composição elementar (valores totais) do biochar vegetal utilizado nos experimentos I e II.....	61
Tabela 4.2. Densidade na profundidade de 0-10 cm dos solos utilizados nos experimentos.....	63
Tabela 4.3. Acúmulo médio de fitomassa seca da soja após a aplicação de biochar ao solo na presença e ausência de adubação NPK, em um Latossolo Vermelho-Amarelo em Nova Xavantina-MT.....	68

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1.** Precipitação (mm) e temperatura média (°C) ocorrida em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento de 2006 a 2010..... 37
- Figura 3.2.** Precipitação (mm) e temperatura média (°C) ocorrida em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento de 2010 a 2014..... 38
- Figura 3.3.** Espectro de RMN ¹³C do biochar de eucalipto utilizado no experimento..... 40
- Figura 3.4.** Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento no 1º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2006/2007). NPK e Biochar são variáveis suplementares..... 43
- Figura 3.5.** Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento no 3º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2008/2009). NPK e Biochar são variáveis suplementares. 44
- Figura 3.6.** Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento no 4º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2009/2010). NPK e Biochar são variáveis suplementares. 46
- Figura 3.7.** Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento. (A) no 7º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2012/2013) e (B) no 8º ano após a aplicação de biochar ao solo

	(safra 2013/2014). NPK e Biochar são variáveis suplementares.	48
Figura 3.8.	Produtividade de grãos de soja em função de diferentes doses de biochar, no 1° (safra 2006/2007), 3° (safra 2008/2009), 4° (safra 2009/2010), 7° (safra 2012/2013) e 8° (safra 2013/2014) ano, em Nova Xavantina-MT.....	51
Figura 4.1.	Espectro de ¹³ C RMN (VACP-TOSS) de amostra do biochar utilizado no experimento I.....	61
Figura 4.2.	Espectro de ¹³ C RMN (VACP-TOSS) de amostra do biochar utilizado no experimento II.....	62
Figura 4.3.	Porcentagem e estoque de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo em função de doses de biochar com adubação NPK 0 e 200 Kg ha ⁻¹ , em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste F. ^{ns} não significativo.	66
Figura 4.4.	Porcentagem e estoque de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-10 cm em um Plintossolo Háplico em função de doses de biochar com adubação NPK 0 e 200 Kg ha ⁻¹ , em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste F. ^{ns} não significativo.....	67
Figura 4.5.	Carbono orgânico pelo método Walkley-Black (COT-WB) e CHN (Dumas) (COT-CHN) na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e Plintossolo Háplico.....	69
Figura 4.6.	Teor de ácido fúlvico na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 e 200 Kg ha ⁻¹ e 0 e 300 Kg ha ⁻¹ , em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste F. ^{ns} não significativo.....	71
Figura 4.7.	Teor de ácido húmico na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 e 200 Kg ha ⁻¹ e 0 e 300 Kg ha ⁻¹ , em Nova Xavantina - MT, 2013. * significativo a 5% de probabilidade respectivamente pelo teste F. ^{ns} não significativo.....	72
Figura 4.8.	Teor de humina na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 e 200 Kg ha ⁻¹ e 0 e 300 Kg ha ⁻¹ , em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade	

respectivamente pelo teste F..... 73

Figura 4.9. Índice de humificação na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 e 200 Kg ha⁻¹ e 0 e 300 Kg ha⁻¹, em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste F..... 74

RESUMO GERAL

LIMA, L. B. **Desempenho agronômico da soja, fertilidade e dinâmica da matéria orgânica do solo sob aplicação de biochar no Cerrado brasileiro.** 2014. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.¹

Objetivou-se com este trabalho verificar o efeito em longo prazo da aplicação de biochar sobre os atributos químicos do solo e no desenvolvimento e produtividade da soja, e nos compartimentos de carbono em um Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento I) e Plintossolo Háplico (Experimento II) no bioma cerrado. Ambos experimentos foram conduzido a campo em Nova Xavantina – MT. Os experimentos foram instalados em delineamento de blocos casualizados, composto pela combinação de níveis de adubação de base (NPK) e doses de biochar. Para a avaliação de fertilidade do solo foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20 cm e analisados os seguintes atributos: pH, Ca, Mg, H+Al, P, K e matéria orgânica (MOS). As variáveis agronômicas estudadas foram: altura das plantas e fitomassa seca em V4 e R1, e produtividade. Para as avaliações nos compartimentos de carbono foram determinados os teores e estoques totais de carbono orgânico (COT) e nitrogênio (NT), os teores de C nas frações ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HU), e índice de humificação (IH). De maneira geral, constatou-se sinergismo entre o efeito da adubação mineral e a aplicação de biochar nos atributos químicos do solo ao longo dos quatro anos após a aplicação. À medida que as estruturas aromáticas do biochar são oxidadas, observa efeito positivo nos teores de MO. A produtividade foi significativamente aumentada em razão principalmente da aplicação de 16 Mg ha⁻¹ de biochar, nos 1º, 3º e 4º anos, sendo a equação com comportamento quadrático. Nos 7º e 8º anos o efeito direto do biochar foi reduzido com baixa variação da produtividade de grãos. Houve aumento nos estoques de COT e nos teores de carbono aromático com o aumento da aplicação de biochar, evidenciando que o método Walkley-black não é eficaz para a determinação de COT em solos sob aplicação de biochar. Houve redução do C-AF e C-AH com a aplicação de biochar, sendo este efeito mais evidente na presença de NPK. O C-HU aumentou significativamente com o aumento das doses de biochar. Altas doses de biochar (>16 Mg ha⁻¹) proporcionaram aumento no IH. Em ambos os experimentos (I e II), o biochar contribuiu para o aumento do C na fração mais estável da MOS que é a humina, o que é desejável do ponto de vista ambiental e de fertilidade.

Palavras-chave: carvão vegetal, substâncias húmicas, produtividade.

¹Orientador: Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro. EA – UFG.
Co-orientador: Prof. Dr. Fabiano André Petter. ICAA - UFMT.

ABSTRACT

LIMA, L. B. **Agronomic performance of soybean, fertility and organic matter dynamics in soil under application of Biochar in the Brazilian Cerrado.** 2014. 78 f. Thesis (Ph.D. in Agronomy: Soil and Water) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.¹

The objective of this work was to verify the long-term effect of biochar application on soil chemical properties and the development and soybean yield and carbon pools in a Oxisol (Experiment I) and Haplic Plinthosol (Experiment II) in the cerrado biome. Both experiments were conducted under field conditions in Nova Xavantina-MT . Settled experiments in a randomized block design, consisting of the combination of levels of the fertilizer (NPK) and doses of biochar. For evaluation of soil fertility soil samples were collected at 0-20 cm and analyzed the following attributes: pH, Ca, Mg, H+Al, P, K, and organic matter (OM). Agronomic variables were: height and dry matter of V4 and R1 and productivity. For evaluations in carbon pools contents were determined and total organic carbon (TOC) and nitrogen (TN), the concentrations of C in fractions fulvic acids (FA) , humic acids (HA) and humin (HU) , and , humification index (HI) . In general , there was synergy between the effect of mineral fertilization and application of biochar on soil chemical over the four years after the application attributes. As the aromatic structures are oxidized biochar notes positive effect on the contents of OM. The productivity was significantly increased mainly due to the application of 16 Mg ha⁻¹ of biochar on 1st 3rd and 4th year , with an equation with quadratic behavior . In the 7th and 8th grade direct effect of biochar was reduced with low variation of grain yield. An increase in TOC stocks and aromatic contents with increasing carbon biochar application, showing that Walkley-black method is not effective for the determination of TOC in soils under application of biochar. There was a reduction in C-AF and C-AH with the application of biochar , more evident effect in the presence of NPK . The C-HU increased significantly with increasing doses of biochar. High doses of biochar (>16 Mg ha⁻¹) provide increased IH. In both experiments I and II, biochar contributes to increasing C more stable OM of soil fraction is humin , which is desirable from an environmental standpoint and fertility.

Key words: charcoal, humic substances, productivity.

¹Orientador: Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro. EA – UFG.
Co-orientador: Prof. Dr. Fabiano André Petter. ICAA – UFMT.

1 INTRODUÇÃO

O cerrado brasileiro destaca-se por apresentar grande potencial produtivo de culturas anuais como soja, milho, arroz e feijão. Na safra 2013/2014, a região se destacou na produção de grãos, com mais de 50% da produção de soja do Brasil (CONAB, 2014). Alguns fatores têm contribuído para o avanço rápido da agricultura nesta região, como a grande disponibilidade de terras, o predomínio de uma topografia favorável à agricultura mecanizada e à irrigação, o desenvolvimento de técnicas para a correção da acidez dos solos e variedades adaptadas (Queiroz, 2009). No entanto, o manejo inadequado dos solos tem ocasionado processos degradativos como a erosão, perda de matéria orgânica, compactação e desestruturação do solo (Kluthcouski et al., 2004) reduzindo o potencial produtivo dessas áreas.

A matéria orgânica do solo (MOS) é considerada o principal componente do solo responsável por promover a sustentabilidade agrícola. É constituída principalmente por C, H, O, N, S e P, sendo que o C compreende cerca de 60% (Santos, 2007). Em virtude dos baixos teores de matéria orgânica, os solos de cerrado apresentam algumas características marcantes, como o baixo teor de nutrientes, com alto poder de adsorção de fósforo (Sousa et al., 1997). Nesse sentido, é evidente a importância e a contribuição da matéria orgânica para a disponibilidade de nutrientes para as plantas. É importante ressaltar, que a baixa eficiência no uso de nutrientes implica diretamente no maior uso de recursos ambientais, pois, as fontes para a fabricação de fertilizantes químicos constituem-se de um recurso não renovável, exigindo, assim, um consumo consciente desses nutrientes para garantir a sustentabilidade da agricultura (Araújo & Machado, 2006).

A matéria orgânica do solo (MOS) apresenta um papel importante no condicionamento de propriedades físicas, químicas e biológicas em solos tropicais, além de constituir o principal compartimento para o carbono orgânico sequestrado no solo (Orjuela, 1989; Batijes & Sombroek, 1997; Madari et al., 2009). A matéria orgânica do solo possui potencial para ser utilizada como atributo chave da qualidade do solo (Doran & Parkin, 1994), pois, além de satisfazer o requisito básico de ser sensível a modificações pelo manejo do solo, é ainda fonte primária de nutrientes para as plantas. Ela também atua sobre

outros atributos, como ciclagem de nutrientes, complexação de elementos tóxicos e estruturação do solo (Gregorich et al., 1994).

O estudo das substâncias húmicas tem ganhado nova importância devido ao seu papel extremamente importante na proteção ambiental. O desequilíbrio proporcionado pela retirada da vegetação natural, e o posterior estabelecimento da produção agrícola, promoveram a degradação do solo e diminuíram sua capacidade de sustentabilidade no longo prazo (Mielniczuk et al., 2003).

Em solos antropizados, de regiões como o Cerrado, onde a atividade microbiana é acelerada pelas condições edafoclimáticas, além de queimadas que ocorrem naturalmente ou são praticadas, a qualidade e a quantidade de MOS são baixas comparadas às das regiões de florestas, o que compromete, em parte, a viabilidade de cultivos agrícolas. Diante disso, o cultivo de grandes culturas, como a soja e o milho, vem ao longo dos anos passando por mudanças, como alterações nas técnicas de manejo. Dentre as inovações, está a introdução do sistema plantio direto (SPD), que preconiza a rotação de culturas, não revolvimento do solo e o uso de plantas de cobertura. A adoção do (SPD) tem proporcionado a manutenção dos estoques de carbono no solo (Prior et al., 2004) e, conseqüentemente, melhorando os atributos químicos (Heinrichs et al., 2005), físicos e biológicos do solo (Silva et al., 2007). Todavia, há regiões no Bioma Cerrado, que a distribuição pluviométrica é irregular, o que compromete o estabelecimento do SPD em função da dificuldade de formação e manutenção de plantas de cobertura, principalmente na entressafra (Pacheco et al., 2011).

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 sequestro do excesso de carbono na atmosfera, podem favorecer a redução dos problemas anteriormente citados (Petter, 2010). A utilização de materiais orgânicos de alta estabilidade pode contribuir para a manutenção e o aumento dos teores de carbono orgânico no solo e, conseqüentemente, melhoram a qualidade da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes. Nesse sentido, a fixação de carbono no solo e, conseqüentemente, a melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo pode ser obtida utilizando-se o chamado biochar (biomassa carbonizada), que pode ser produto ou subproduto de diferentes processos de pirólise (Petter & Madari, 2012).

Devido a algumas características do carvão, como reatividade, tempo de

degradação, estrutura química da molécula, superfície específica, 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 do solo (Petter & Madari, 2012).

Estudos recentes apontam a eficiência do carvão vegetal em aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, à produção de biomassa (matéria seca de plantas) e, em geral, o potencial produtivo do solo (Sohi et al., 2010; Kookana et al., 2011; Zhang et al., 2012; Petter et al., 2012). Com o aumento da disponibilidade de nutrientes espera-se maior produção de biomassa e, conseqüentemente, maior fixação de CO₂ atmosférico através da fotossíntese (Lehmann et al., 2003).

No entanto, permanece ainda a questão de qual é o efeito quantitativo e qualitativo a médio e longo prazos do biochar (C pirogênico) incorporado ao solo sobre a dinâmica da MOS, e qual seria a influência desse material nas formas de disponibilidade de nutrientes para as plantas, ou seja, sua influência na produtividade da soja. Em função da escassez de dados obtidos a campo no médio e longo prazos dos efeitos do biochar no solo sobre a fertilidade e o comportamento da cultura da soja, conduziu-se a presente pesquisa como objetivo de trazer à luz da ciência novas informações que contribuam de forma elucidativa sobre esses elementos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS)

Em solos tropicais a matéria orgânica do solo (MOS) apresenta grande relevância, para o fornecimento de nutrientes, constituindo-se em componente importante para a manutenção da produtividade (Bayer & Mielniczuk, 1999). É constituída principalmente por C, H, O, N, S e P, sendo que o C compreende cerca de 60% (Santos, 2007). Em solos tropicais a MOS influencia positivamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Como exemplo podemos citar a contribuição da MOS para a CTC, para a estruturação e agregação e retenção de umidade, além de, contribuir como principal compartimento de carbono orgânico sequestrado no solo (Madari et al., 2009).

Em solos de cerrado, a matéria orgânica do solo (MOS) pode contribuir com até 80% da CTC das camadas superficiais de solos minerais (Pacheco & Petter, 2011). A CTC dos solos tropicais é amplamente influenciada pelos teores de MOS, por processo de ionização de grupos químicos, como enóis, fenóis e carboxílicos (Faria, 2011).

Outro aspecto positivo que podemos citar sobre a influência da MOS é a estruturação do solo. Melhorias nesse atributo físico garantem grande impacto sobre a infiltração de água, desenvolvimento radicular e, consequente, maior resistência à erosão, além de ser fonte primária de nutrientes para as plantas (Paul & Clark, 1996). A presença de poros no solo para o armazenamento de água para as plantas, transmissão de água e ar, garantem o bom desenvolvimento radicular e consequente desenvolvimento de plantas, essas características podem indicar boas condições de cultivo de um solo (Oades, 1984).

Segundo Gregorich et al. (1996), a MOS pode ser entendida como aporte de resíduos vegetais e animais em diferentes níveis de decomposição, no qual, primeiramente atuam no processo de decomposição os agentes biológicos (fauna e flora). Com a evolução do processo de decomposição os resíduos são continuamente degradados até a sua estabilização, assumindo diferentes composições químicas. Além dos processos biológicos, atuam na decomposição da MOS processos físicos e químicos. Spagnollo (2004) sugere

que a ação conjunta desses fatores proporciona a formação de componentes húmicos.

Silva & Mendonça (2007) conceituam a MOS, em sentido amplo, como a fração vivente, micro meso e macrofauna e flora, e a fração não vivente, frações lábeis e frações orgânicas estáveis na forma de substâncias húmicas. Ainda complementam que a fração das substâncias húmicas são os principais componentes da MOS, representando entre 70% e 80% dos teores totais e, representam a principal reserva de carbono orgânico do solo.

Nas regiões tropicais, a mineralização da matéria orgânica chega a ser cerca de cinco vezes mais rápida do que aquela observada em regiões temperadas (Sanchez & Logan, 1992), o que, via de regra, sobrepõe-se às possibilidades de reposição nos sistemas convencionais de manejo dos solos e das culturas (Derpsch, 1997).

Janzen et al. (1992) em seu estudo demonstram que compartimentos da MOS como as substâncias húmicas, são capazes de evidenciar de forma clara e rápida, as mudanças nos conteúdos de carbono orgânico no solo, decorrente à mudanças de manejo. As reduções nestes compartimentos são, de modo geral, maiores que as observadas quando se considera apenas o conteúdo total de carbono do solo. Essas características tornam a matéria orgânica do solo, especialmente as frações húmicas, um atributo potencial para ser utilizada como chave da qualidade do solo (Doran & Parkin, 1994; Mielniczuk et al., 2003).

Zech et al. (1997) conceituam substâncias húmicas, como sendo uma categoria de compostos orgânicos, de ocorrência natural, composta de substâncias heterogêneas que geralmente possuem coloração característica, variando do amarelo para o castanho escuro, de alto peso molecular e de natureza refratária aos processos de decomposição. Os mesmos autores ainda complementam que as principais transformações que ocorrem durante o processo de humificação são as perdas de compostos mais lábeis, como polissacarídeos e compostos fenólicos, e também mudanças nas estruturas aromáticas não lignínicas mais recalcitrantes.

As substâncias húmicas são consideradas por Hayes & Malcolm (2001) como sendo o maior reservatório de carbono orgânico do solo, tendo um importante papel na fertilidade e na estabilidade de agregados. As substâncias húmicas podem ser operacionalmente divididas de acordo com sua solubilidade em soluções de diferentes pHs. São elas: fração ácidos fúlvicos (AF) que é solúvel tanto em meio alcalino com ácido, fração ácidos húmicos (AH) solúvel somente em meio básico e, a fração Humina (HUM)

que é insolúvel tanto em meio alcalino quanto ácido e está intimamente ligada à fração mineral do solo (Silva & Mendonça, 2007). Steverson (1994) diz que as frações húmicas podem ser diferenciadas pela cor, massa molar, presença de grupos funcionais, grau de polimerização e, composição elementar como teores de carbono, oxigênio, hidrogênio e enxofre.

Fontana (2006) destaca que na região do cerrado em que as queimadas já foram muito utilizadas como manejo de pastagem, além de ser um componente de ocorrência natural, a MOS passa ao longo do tempo a ser influenciada pela presença de carvão vegetal no meio, influenciando tanto qualitativamente quanto quantitativamente, o autor ainda adiciona que a presença de carvão vegetal nesses solos representa um aporte de carbono orgânico estável nos solos dessa região.

Apesar da influência do carvão vegetal na MOS de solos do cerrado não esta totalmente clato, diversos autores acreditam que o carvão vegetal possa influenciar principalmente nas substâncias húmicas presentes nesses solos, a exemplo Roscoe et al. (2001) acredita que essa influencia nas substâncias húmicas está ligado à alta recalcitrância do carvão vegetal. Já para Schmidt et al. (1999), Skjemstad et al. (2002) e Rumpel et al. (2006), a contribuição do carvão vegetal para as substâncias húmicas seja devido à elevada aromaticidade, advinda da abundância de carbono aromático desse material.

Kumanda (1983) avaliando a composição das substâncias húmicas originadas de materiais carbonizados, pôde notar uma elevada semelhança com as substâncias húmicas encontradas no solo. Haumaier & Zech (1995) também observaram tal semelhança, a partir de estudos realizados utilizando a ressonância magnética nuclear do ^{13}C (RMN ^{13}C), em diferentes tipos de solos e diferentes materiais carbonizados, sugerindo que os ácidos húmicos de solos que contenham carbono pirogênico, como de solos do cerrado, são originados do carvão.

Levando em consideração que a fertilidade de solos altamente intemperizados de regiões tropicais depende muito da quantidade e qualidade do material orgânico, é provável que mudanças nos compartimentos das frações húmicas, influencie diretamente a fertilidade. Canellas et al. (2002), Souza & Melo (2003) e Yagi et al. (2003) realizaram estudos em solos intemperizados sob diferentes sistemas de manejo, todos constataram que há uma interação entre os teores de substâncias húmicas e a fertilidade do solo. Diante dessas comprovações pode-se considerar que os ácidos húmicos são uma importante ferramenta para avaliação dos diferentes sistemas de manejo em solos tropicais (Cunha et

al., 2007).

2.2 CARVÃO VEGETAL

Aparentemente o carvão pirogênico é encontrado em todos os ambientes, e isso tem importantes implicações para o ciclo global do carbono (Simpson & Hatcher, 2004). Em solos brasileiros, quantidades significativas de carvão pirogênico são encontradas em solos com histórico de incêndios naturais ou provocados, como nos casos do Cerrado (Roscoe et al., 2001), em ambientes rupestres altimontanos (Benites et al., 2005). Glaser et al. (2000, 2001) mostram que, em solos antrópicos da Amazônia como a Terra Preta de Índio (TPI), a matéria orgânica consiste em, aproximadamente, 35% de carvão pirogênico ao longo do espesso horizonte A antrópico, sendo que este valor aumenta com o acréscimo do conteúdo de argila. Nos solos vizinhos às manchas de Terra Preta, os latossolos com outros tipos de horizonte A, o carvão pirogênico ocorre somente nos primeiros centímetros do perfil constituindo cerca de 14% da matéria orgânica do solo.

Benites et al. (2009) conceituam carvão vegetal como sendo um material de grande aporte de carbono orgânico, consequente ao processo de pirólise em condições controladas de temperatura e oxigênio. Apresenta baixo teor de nitrogênio, com elevada relação C:N. O segundo elemento mais abundante é o oxigênio, e suas concentrações estão diretamente ligadas à temperatura de carbonização aplicada. Os autores também destacam a estrutura porosa do carvão vegetal, compondo cerca de 70% a 80% do volume total, essa característica é dependente das características do material que foi carbonizado e das condições de temperatura e oxigenação do processo de pirólise. Devido a essa alta porosidade, é característico desse material, uma baixa densidade (variando de $0,3 \text{ kg dm}^{-3}$ a $0,4 \text{ kg dm}^{-3}$), e quimicamente são formados por estrutura policíclica aromática de alto grau de condensação.

O biocarvão possui algumas fontes potenciais, dentre elas, o carvão utilizado por indústrias metalúrgicas para substituir o carvão mineral durante a produção de ferro gusa, que é obtido a partir de florestas plantadas, sendo este reconhecido como um mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) (Machado, 2003). Esse material permite harmonizar a produção de energia e de alimentos com o aumento da fertilidade do solo e o sequestro de carbono (Rezende et al., 2011). Além de melhorar os atributos do solo, a incorporação do biocarvão produzido a partir de florestas plantadas, pode contribuir para o

sequestro do carbono atmosférico ao reagir no solo, uma vez que sua decomposição no ambiente solo é mais lenta que a da matéria orgânica não carbonizada (Petter & Madari, 2012). 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).

O carvão produzido a partir de florestas energéticas (plantadas) no Brasil é reconhecido como um mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), pois proporciona a fixação do dióxido de carbono da atmosfera em biomassa vegetal, essa condição é reconhecida por instituições internacionais que pagam pelos créditos de carbono gerados. O processo de produção de carvão vegetal através de florestas plantadas foi reconhecido pelo Protocolo de Quioto em dezembro de 1997, através de uma proposta do governo brasileiro de criar cooperação com os países que não se enquadram nos limites de emissão de CO₂ impostos nesse acordo.

Quando faz-se inferência ao carvão vegetal, geralmente reporta-se à um material inerte, ou pouco reativo, hidrofóbico e, devido à sua porosidade apresentam elevada área superficial (200 m² g⁻¹ a 400 m² g⁻¹). No entanto essas características acima citadas, especialmente a reatividade e a hidrofobicidade variam de acordo com a estrutura do material de origem do carvão e também com as condições de oxigenação e temperatura da pirólise. Kishimoto & Sugira (1985) ressaltam que apesar da alta estabilidade dos carvões comparados com outras formas de matéria orgânica do solo, esse material também sofre biodegradação e transformação.

Bird et al. (1999) consideram que o carbono pirogênico pode ser degradado na escala de décadas ou séculos em climas mais frios, esses autores fazem uma estimativa da meia vida do carvão vegetal com tamanho maior que 2 mm seja de menos de cem anos e menor que 2 mm seja menos que cinquenta anos. Lehmann et al. (2003) destacam que a degradação do carvão no solo é um processo relativamente lento, resultando em sua mobilização e o aumento gradativo das propriedades químicas reativas de sua superfície, aumentando a quantidade de sítios reativos, que são capazes de fazer ligações, inclusive com nutrientes presentes no solo. Esses autores ainda apontam a eficiência que o carvão possui em aumentar a disponibilidade de nutrientes para o solo, aumentando consequentemente a produção de biomassa das plantas e, em geral o potencial produtivo do solo. Com o aumento da produção de biomassa, espera-se como efeito indireto, maior fixação de CO₂ atmosférico através da fotossíntese.

Diante da disponibilidade de material disponível no mercado, a utilização de

carvão vegetal na agricultura torna-se viável, uma vez que, o Brasil é responsável por 38,5% da produção mundial, tendo produzido cerca de 5 milhões de toneladas de carvão vegetal originado de florestas cultivadas no ano de 2012, com um valor estimado de 2,4 bilhões de reais. O carvão produzido no Brasil tem como destino principal a indústria siderúrgica (IBGE, 2014). Benites et al. (2009) destacam a importância do desenvolvimento de processos que permitam transformar o carvão e seus subprodutos em compostos de características apropriadas para uso na agricultura como condicionador do solo e, ou adubos orgânicos, com elevada estabilidade e reatividade, medidas que desenvolvam essa tecnologia é desejável por ser estratégico economicamente para o setor florestal brasileiro.

2.3 PERSPECTIVAS DO USO DO BIOCHAR NA AGRICULTURA

A busca pelo desenvolvimento e a adoção de novos sistemas de produção que sejam adequados para as diferentes condições ambientais tem aumentado a cada dia, o que tem resultado no aumento considerável de pesquisas voltadas para o estudo do armazenamento do carbono no solo, como medidas para reduzir os impactos ambientais negativos (Petter et al., 2012).

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 em função de seu efeito recalitrante e sua natureza refratária (Madari et al., 2006). A permanência do carbono em estruturas aromáticas, como é o caso do biochar, por longos anos, leva ao efeito de retenção prolongada do carbono no solo. A alta superfície específica, grande quantidade de sítios quimicamente reativos e alta porosidade podem diminuir as emissões de gases de efeito estufa, principalmente dos provenientes de adubações nitrogenadas (Petter, 2010). Yanai et al. (2007) verificaram que o uso de carvão derivado de resíduos biodegradáveis urbanos reteve 73% da emissão de óxido nitroso.

A eficiência do carvão vegetal em aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, conseqüentemente aumentando a produção de biomassa (matéria seca de plantas) e, em geral, o potencial produtivo do solo, tem sido reportado em diversos trabalhos (Sohi et al., 2010; Kookana et al., 2011). Um dos benefícios resultantes da utilização do biocarvão é que, além desse material ser utilizado como energia durante sua pirólise, seu subproduto, quando produzido de forma adequada, permitirá a fixação do carbono no solo (Petter &

Madari, 2012), seja pela sua forma recalcitrante no solo ou em função do aumento da disponibilidade de nutrientes, resultando em maior produção de biomassa e, conseqüentemente, maior fixação de CO₂ atmosférico através da fotossíntese (Lehmann et al., 2003).

Diferentes autores (Tryon, 1948; Iswaran et al., 1980; Kishimoto & Sugira, 1985) relatam efeito significativo da aplicação de carvão na fisiologia e produtividade da soja. Mais recentemente, Petter (2010) verificou significativa interferência da aplicação de biochar nos atributos químicos do solo e na resposta fisiológica de soja e arroz no cerrado brasileiro. Foram observados aumentos nos teores disponíveis de P, K, Ca, Mg e C, redução da acidez efetiva e potencial, redução dos teores de Al, bem como aumento da eficiência no uso dos nutrientes. Já as respostas fisiológicas das culturas de soja e arroz estão positivamente correlacionadas com a aplicação de carvão. A resposta fisiológica pode também estar relacionada a um possível efeito eletrofisiológico do biochar, auxiliando na absorção de nutrientes, compostos de baixo peso molecular, hormônios e outros.

Foi observado por Oguntunde et al. (2004), efeito do carvão vegetal na produção de milho e a influência nas características químicas e físicas do solo, com incremento na produtividade de grãos em torno de 91% e 44% na biomassa. Houve um aumento significativo na disponibilidade de K, cerca de 329%. Major et al. (2005) verificaram que a adição de carbono na forma de carvão vegetal aumentou a biomassa de plantas de arroz em 53%.

Segundo Madari et al. (2006), em experimento em vasos na região do cerrado, foi verificado que o arroz de terras altas (cultivar Primavera) responde positivamente à aplicação de carvão vegetal (de *Eucalyptus* spp.) em um solo já sob uso agrícola, apresentando significativamente maior crescimento em solo onde o carvão vegetal foi adicionado. 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 nas 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.

De acordo com Steiner et al. (2007), foi observado o dobro de aumento na

produtividade de arroz quando aplicado carvão vegetal junto com fertilizante. Kimetu et al. (2008) demonstraram efeito significativo na produtividade do arroz e de outras gramíneas com a aplicação de carvão vegetal no solo.

Ao longo de décadas diversos autores pesquisaram o uso do biochar em sistemas de produção agrícola (Tryon, 1948; Iswaran et al., 1980; Kishimoto & Sugira, 1985), todavia, na última década esses trabalhos se intensificaram (Lehmann et al., 2003; Oguntunde et al., 2004; Major et al., 2005; Madari et al., 2006; Steiner et al., 2007; Kimetu et al., 2008; Petter, 2010; Petter et al., 2012; Petter & Madari, 2012) e demonstraram a eficiência do biochar como condicionador do solo, visando melhorias dos atributos químicos do solo e aumento de produtividade das culturas. Esses resultados permitem concluir que o uso do biochar é benéficamente uma real e potencial ferramenta na sustentabilidade de produção agrícola nos trópicos úmidos.

2.4 TÉCNICAS DE ANÁLISE PARA QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Em geral, considera-se que a matéria orgânica do solo (MOS) contém 58% de carbono (C), em relação à sua massa total (Rheinheimer et al., 2008). Sendo assim, a determinação do carbono orgânico total (COT) tem sido utilizada para estimar quantitativamente a MOS (Fassarella et al., 2012). Atualmente existem vários métodos para determinação de C no solo. Segundo Gatto et al. (2009), essa quantificação pode ser realizada empregando-se métodos que determinam o COT ou simplesmente o C orgânico do solo.

Segundo Nelson & Sommers (1996), os procedimentos de determinação do carbono orgânico total, geralmente convertem todas as formas de C para CO₂, por meio de combustão seca ou úmida e, posteriormente, quantifica-se o CO₂ produzido por gravimetria, titulometria, volumetria, espectrofotometria, ou cromatografia gasosa.

A combustão seca é realizada em fornos em temperaturas próximas de 1.000°C, em atmosfera rica em oxigênio ou livre de CO₂, seguida da quantificação do CO₂ liberado no processo. A combustão úmida é realizada em meio ácido, com ou sem fonte de aquecimento (Newson & Sommers, 1996), geralmente utiliza-se ácido sulfúrico (H₂SO₄) ou fosfórico (H₃PO₄) em mistura com o dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇), que por sua vez, captura o CO₂ evoluído (Fassarella et al., 2012).

A Embrapa (2011) determina que o C orgânico pode ser obtido pela

determinação do C total do solo e C inorgânico com posterior subtração do inorgânico do total; determinação do C total após remoção do C orgânico; e pela oxidação química por dicromato de sódio ou potássio em meio ácido com posterior quantificação por titulação com sulfato ferroso amoniacal.

O método de oxidação por dicromato, também conhecido como Walkley Black, é o método mais utilizado para determinação da MOS em laboratórios brasileiros. Esse método, recomendado pela Embrapa (2011), possui algumas limitações, como a deficiência em oxidar frações orgânicas humificadas e carvões (Nelson & Sommers, 1982), ambos com estruturas aromáticas condensadas, podendo haver uma sub-estimação dos teores presentes nos solos. Outro fator limitante dessa metodologia é a geração de resíduos contendo cromo, que devem ser corretamente tratados e destinados a laboratórios especializados para o tratamento desse tipo específico de resíduo (Farine et al., 2011).

O método colorimétrico é uma adaptação do método Walkley Black, que dispensa a quantificação por titulometria. Baseia-se na leitura direta através do método colorimétrico, por meio de um espectrofotômetro de absorção molecular (Farine et al., 2011; Sampaio, 2012).

Mundialmente tem se dado preferência para determinação do COT por meio da combustão seca em equipamentos automatizados, a exemplo do CHN, cuja combustão do material é realizada em temperaturas aproximadas de 950°C e a quantificação do COT realizada por meio de cromatografia gasosa (Silva et al., 1997). Essa metodologia é conhecida como método de Dumas. A vantagem desses equipamentos é a determinação de alta precisão e com baixa geração de resíduos tóxicos (Benaci, 2010). Em contrapartida, os equipamentos e as análises são de alto custo, dificultando o acesso a essa tecnologia (Jimenez & Ladha, 1993).

As avaliações quantitativas da MOS de maneira isolada não são suficientes para satisfazer as expectativas da investigação científica a respeito de suas características e propriedades (Fassarella et al., 2012). Diante dessa necessidade, utilizam-se os métodos de qualificação da matéria orgânica, com base na qualificação das substâncias húmicas do solo (ácidos fúlvico e húmico e húmica). Os métodos mais utilizados são a espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN) e a espectroscopia na faixa do infravermelho com transformada de Fourier (FITIR).

A RMN é uma técnica de identificação de compostos orgânicos e é uma das mais importantes para a determinação de estruturas. Está baseada na medida da absorção

de radiação eletromagnética na região de radiofrequência de cerca de 4 MHz a 900 MHz. Detecta spin de núcleos ^1H , ^{13}C , ^{31}P , ^{15}N e ^{27}Al . Quando um campo magnético externo é aplicado, ocorre uma separação entre as orientações de spin (α e β), sendo esta separação proporcional à intensidade do campo aplicado. Quando a separação entre dois níveis de energia é igual à energia de um campo de radiofrequência, ocorre uma forte absorção de radiação que leva a um pico no espectro de RMN (Skoog et al., 2002). A intensidade do sinal é referente à qualidade do grupo funcional analisado (Canellas et al., 2002).

No caso de amostras de solo, é necessário tratamento químico da amostra com ácido fluorídrico (HF) para remoção de metais como Fe^{3+} , que podem interferir nos resultados das análises (Dieckow, 2005). Muitos autores utilizam a técnica de RMN para avaliar a qualidade da MOS, por meio da quantificação de carbonos aromáticos e da proporção de outros grupos funcionais presentes (Canellas et al., 2002).

Com a espectroscopia de RMN ^{13}C o ambiente químico do átomo de C pode ser analisado e, assim, essa técnica foi utilizada para identificar os grupos funcionais nos quais o elemento C está presente, como ácidos carboxílicos, fenólicos ou estruturas aromáticas, nas amostras/frações avaliadas. Com essa técnica é possível estimar a relação entre estes grupos (avaliação semi-quantitativa) dentro de cada amostra e, portanto, através disso observar se e como a adição de carvão vegetal afeta a composição molecular das frações de AH e HUM (Lima, 2012).

No início do desenvolvimento da espectroscopia em infravermelho a maioria das suas aplicações era associada à análise de moléculas orgânicas. Começou a ser amplamente utilizada para a caracterização da matéria orgânica em solos com o desenvolvimento de interferômetros múltiplos não dispersivos como o espectrômetro com transformada de Fourier (FTIR). A transformada de Fourier é utilizada para o processamento de dados e torna a análise ainda mais rápida e sensível, melhora a definição e a resolução de sinais e, conseqüentemente, aumenta a precisão e exatidão da análise dos comprimentos de onda (Skoog, 2002; Narimoto, 2006).

A energia total de uma molécula consiste de energia translacional, rotacional, vibracional e elétrica (Johnston & Aochi, 1996). A energia da radiação é absorvida no nível da energia rotacional e, principalmente, da vibracional. Assim, a FTIR tem como princípio a vibração das moléculas na região do infravermelho em comprimentos de onda característicos de cada grupo funcional e apenas as que apresentam dipolo podem ser determinadas. Existem basicamente dois tipos de vibração: axial e angular (Silverstein et

al., 1994).

Os métodos mais frequentemente utilizados para a preparação das amostras para a aquisição de espectros de transmissão são a preparação de pellets com KBr sob pressão e técnicas utilizando mull. A Reflectância difusa é também amplamente utilizada há muito tempo. Em termos de composição de materiais orgânicos, informações sobre a natureza e arranjo estrutural de grupos funcionais que contém oxigênio, podem ser obtidas via FTIR (Johnston & Aochi, 1996), assim como informações sobre a presença de constituintes de carboidratos, proteínas e impurezas inorgânicas.

2.5 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2006. 468 p.

BATJES, N.; SOMBROEK, W. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. **Global Change Biology**, New York, v. 3, n. 7, p. 161-173, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Matrópole, 1999. p. 9-26.

BENACI, V. **Avaliação de métodos de análise para carbono orgânico em amostras de interesse agrônomo**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Instituto Agrônomo de Campinas, 2010.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, P. W.; SCHAEFER, C. E. G. E.; NOVOTNY, E. H.; REIS, E. L.; KER, J. C. Propriedades of black soil humic acids from high altitude rocky complexes in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 127, n. 2, p. 104-113, 2005.

BENITES, V. M.; TEIXEIRA, W. G.; REZENDE, E. M.; PIMENTA, A. S. Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: Aprendendo com as terras Pretas de Índio. In: TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 285-296.

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

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; RUNJANEK, V. M.; GURIDI, F.; OLIVARES, F. L.; SANTOS, G. A.; BRAZFILHO, R. Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of an Ultisol under cultivation of eucalyptus and sugar cane. **Revista Terra Latinoamericana**, Champigny, v. 20, n. 2, p. 371-381, 2002.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **13º levantamento da produção de grãos: safra 2012/13**. Brasília: CONAB, 2012. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2014.

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.

DERPSCH, R. Importância de la siembra directa para obtener la sustentabilidad de la produccion agricola. In: CONGRESSO NACIONAL DE AAPRESID, 5., Mar del Plata, 1997. **Conferências do Congresso Nacional de Aapresid**. Mar del Plata, 1997. p.153-176.

DIECKOW, J.; MARTIN, L. N.; MILORI, D. M. B. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; MIELNICAZUK, J. **Sistemas de preparo do solo e características espectroscópicas da matéria orgânica em ambientes Tropicais e Subtropicais Brasileiros**. São Carlos, 2005. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 12).

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. Defining soil quality for a sustainable environment. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 3. n. 7, p. 3-21, 1994.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 230 p.

FARIA, R. L. O uso do lodo de esgoto na agricultura: Impactos ambientais e restrições técnicas. **Revista Complexus**, Salto, v. 2, n.3, p.1023-88, 2011.

FARINE, E. L.; MOREIRA, D. A.; NARDO, A. E.; CAMARGO, I. S. P.; JORDÃO, L. T.; GERMANO, M. M. G.; KLEINERT, J. J.; OLIVEIRA, J. A. **Comparação de dois métodos para determinação do teor de carbono orgânico do solo**. VI Jornada Acadêmica da Embrapa Soja. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 95 p.

FASSARELLA, K. M.; SIMÃO, J. B. P.; LIMA, W. L.; PELUZIO, J. B. E. Caracterização quali-quantitativa da matéria orgânica do solo. **Revista Verde**, Mossoró, v. 7, n. 5, p. 18-30, 2012.

FONTANA, A. **Caracterização química e espectroscópica da matéria orgânica em solos do Brasil**. 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Ciência do solo)– Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

GATTO, A.; BARROS, N. F. de; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. DE. S.; VILLANI, E. M. DE A. Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 735-740, 2009.

GLASER, B.; GUGGENBERGER, G.; HAUMAIER, L.; ZECK, W. **Persistence of soil organic matter in archaeological soils (terra preta) of the Brazilian Amazon region.** In: RESS, R.; BALL, B. C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. (Ed). Sustainable management of soil organic matter. Wallingford: CAB International, 2000. p. 190-194.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECK, W. The ‘Terra Preta’ phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, Berlin, v. 88, n. 5, p. 37-41, 2001.

GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; MONREAL, C. M.; ELLERT, B. H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, Canada, v. 74, n. 2, p. 367-385, 1994.

GREGORICH, E. G.; ELLERT, B. H.; DRURY, C. F. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue carbon storage. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 60, n. 4, p. 472-476, 1996.

HAUMAIER, L.; ZECH, W. Black carbon – possible source of highly aromatic components of soil humic acids. *Organic Geochemistry*, New York, v. 23, n. 3, p. 191-196, 1995.

HAYES, M. H. B.; MALCOLM, R. L. Considerations of compositions and aspects of structures of Humic Substances. In: Clapp, C. E. et al (Ed.) Humic Substances and Chemical Contaminants. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 65, n. 2, p. 3-39, 2001.

HEINRICH, R., VITTI, G.C., MOREIRA, A., FIGUEIREDO, P.A.M., FANCELLI, A.L.; CORAZZA, E.J. Características químicas de solo e rendimento de fitomassa de adubos verdes e de grãos de milho, decorrente do cultivo consorciado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 71-79, 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal de silvicultura.** IBGE, 2010, 3 p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia>>. Acesso em: 25 abr. 2014.

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

JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; BRANDT, S. A.; LAFOND, G. P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 56, n. 2, p. 1799-1806, 1992.

JIMENEZ, R.R.; LADHA, J.K. Automated elemental analysis: a rapid and reliable but expensive measurement of total carbon and nitrogen in plant and soil samples. *Community Soil Society Plant Analise*, Warszawa, v. 24, p.1897-1924. 1993.

JOHNSTON, C. T.; AOCHI, Y. O. Fourier transform infrared and Raman spectroscopy. In:

SPARKS, D. L. et al. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Science Society of America, 1996. p. 269-321.

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, Pretoria. **Proceedings**. Pretoria: National Timber Research Institute, v. 5, n. 4, 1985, p. 22-26.

KLUTHCOUSKI, J.; HOMERO, A.; STONE, L. F.; COBUCCI, T. Integração lavoura-pecuária e o manejo de plantas daninhas. **Encarte técnico, Informações agronômicas**, Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, 2004. 7 p.

KOOKANA, R.S., SARMAH, A.K., VAN ZWIETEN, L., KRULL, E. AND SINGH, B. Biochar Application to Soil: Agronomic and Environmental Benefits and Unintended Consequences. In: DONALD, L.S. (Ed.) **Advances in Agronomy**, v. 112, 2011, p.103-143.

KUMANDA, K. Carbonaceous materials as a possible source of soil hummus. **Soil Science Nutrition**. Communication, v. 29, n. 3, p. 383-386, 1983.

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.

LIMA, L. B. **Efeito do biocarvão sobre a matéria orgânica de solos do bioma cerrado**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

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.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L. S.; Benites, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Carvão vegetal como condicionador de solo para arroz de terras altas (cultivar primavera): Um estudo prospectivo**. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, n. 125. 2006. 2p.

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. (Ed.) **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. 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.; BESAN, F.M.; LOVATO, T.; FERNÁNDEZ, F.F. & DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVAREZ V., V.H. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, n. 7, 2003, p. 209-248.

NARIMOTO, K. M. **Técnicas espectroscópicas aplicadas à análise da matéria orgânica do solo em pomares de citros sob adição de lodo de esgoto**. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Química Aplicada) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L., (Ed.) **Methods of soil analysis**. Chemical and mineralogical properties. 2. ed. Madison, ASA/SSSA, 1982. p.539-579.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: **Methods of Soil Analysis Part 3**. Chemical Methods-SSSA Book Series nº 5. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 963-1010.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Hague, v. 76, n. 3, p. 319-337, 1984.

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

ORJUELA, H. El suelo: una visión sobre SUS componentes bioorgánicos. **Série Investigaciones**. Universidad de Nariño. Pasto, Colombia, 1989. 447 p.

PACHECO, L. P.; PETTER, F. A. Benefits of Cover Crops in Soybean Plantation in Brazilian Cerrados. In: Tzi Bun Ng. (Ed.). **Soybean - Applications And Technology**. Rijeka: InTech, 2011, p. 67-94.

PACHECO, L. P.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L.O. A.; ASSIS, R. L.; COBUCCI, T.; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 17-25, 2011.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1996. 340 p.

PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; VALENCIA, E. P. E. Holocene fire and vegetation changes in southeastern Brazil as deduced from

fóssil charcoal and soil carbon isotopes. **Quaternary International**, Oxford, v. 114, n. 1, p. 35-43, 2004.

PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador 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, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 16, n. 7, p. 761–768, 2012.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T. M.; MARIMON JUNIOR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 5, p. 699-706, 2012.

PRIOR, S.A.; TORBERT, H.A.; RUNION, G.B.; ROGERS, H. **Elevated atmospheric CO₂, in Agroecosystems**. Environmental Management, v. 33, 2004, p. 344-354.

QUEIROZ, F. A. Impactos da sojicultura de exportação sobre a biodiversidade do Cerrado. **Sociedade e Natureza**. Uberlândia, v. 21, n. 2. 2009.

REZENDE, E. I. P.; ANGELO, L. C.; SANTOS, S. S.; MANGRICH, A. S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. **Revista Virtual de Química**, Niterói. v. 32, n. 4, p. 426-433, 2011.

RHEINHEIMER, D. DOS. S.; CAMPOS, C.; GIACOMINI, S. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; BORTOLUZZI, E. C. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 7, p. 435-440, 2008.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J.; VASCONCELLOS, C. A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the ¹³C/¹²C isotropic ratio in a Cerrado's oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 104, n. 4, p. 15-202, 2001.

RUMPEL, C.; ALEXIS, M.; CHABBI, A.; CHAPLOT, V.; RASSE, D. P. VALENTIN, C.; MARIOTTI, A. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture. **Geoderma**, Amsterdam, v. 10, n. 6, p. 35-46, 2006.

SAMPAIO, T. F.; FERNANDES, D. M.; GUERRINI, I. A.; BOAGIANI, J. C.; BACKES, C. Comparação entre os métodos para determinação de carbono orgânico em amostras de solo mensuradas por volume ou massa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p 517-523, 2012.

SANCHEZ, P. A.; LOGAN, T. J. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A. (Ed.). **Myths and science of soil of the tropics**. Madison: SSSA/ASA, 1992. p. 35-46.

SANTOS, E. **Carbono, nitrogênio e relação c/n em Gleissolo e Cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da floresta ombrófila densa.** Antonina, PR. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado: Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SCHMIDT, M. W. I.; SKJMSTAD, J. O.; GERHT, E.; KÖGEL-KNABER, I. Charred organic carbon in German Chernozemic soil. **European Journal of Soil Science**, Dordrecht, v. 50, n. 4, p. 351-363, 1999.

SILVA, C.A.; **Dinâmica da matéria orgânica e da mineralização do nitrogênio e enxofre em solos sob vegetação natural e cultivados com calcário e fósforo.** 1997, 70 f. Tese (Doutorado em agronomia: Ciência do Solo)- Universidade Federal de Lavras. Lavras, 1997.

SILVA, I. R. & MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica no solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; NAIRAM, F. B.; NAIRAM, L., (Ed.). **Fertilidade do solo.** Viçosa: SBCS, 2007. 1017 p.

SILVERSTEIN, R. N.; BASSLER, G. C.; MORRI, T. C. **Identificação espectrofotométrica de compostos orgânicos.** 5. ed. São Paulo: Guanabara, 1994. 387 p.

SIMPSON, M. J.; HATCHER, P. G. Overestimates of Black carbon in soils and sediments. **Naturwissenschaften**, Berlin, v. 30, n. 4, p. 81-100, 2004.

SKJEMSTAD, J. O.; REICOSKY, D. C.; WILTS, A. R.; MCGOWAN, J. A. Charcoal carbon in U. S. agricultural soils. **Soil Science Society of American Journal**, Mandisson, v. 66, n. 3, p. 1249-1255, 2002.

SKOOG, D. A.; HLLER, F. J.; NIEMAN, T.A. **Princípios de análise instrumental.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. 836 p.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of Biochar and its use and function in soil. **Advances in Agronomy**, Newark , v. 105, n. 1, p. 47-82, 2010.

SOUSA, D. M. G.; VILELA, L.; REIN, T. A.; LOBATO, E. Eficiência da adubação fosfatada em dois sistemas de cultivo em um Latossolo de Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26. Rio de Janeiro, 1997. Informação, globalização, uso do solo. **Anais.** Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

SOUZA, W.J.O.; MELO, W.J. Matéria orgânica em um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p.1113-1122, 2003.

SPAGNOLLO, E. **Dinâmica da matéria orgânica em agrossistem submetidos a queima e manejo dos resíduos culturais.** 2004, 90 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; de MACÊDO, J. J. V.;

BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects 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.

STEVERSON, F. J. **Humus chemistry: Genesis, compositions and reactions**. 2. ed. New York: Jhon Wiley & Sons, 1994, 443 p.

TROMPOWSKY, P. M. **Síntese e caracterização de substâncias semelhantes aos ácidos húmicos de carvão de eucalipto e sua interação com diclofenol, cálcio, manganês e alumínio**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 45 p.

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.

YAGI, R.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; BARBOSA, J.C. Organic matter fractions and soil fertility under the influence of liming, vermicompost and cattle manure. **Scientia Agricola**, Viçosa, v. 60, n. 4, p. 549-557, 2003.

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.

ZHANG, A.; BIAN, R.; PAN, G.X.; CUI, L.Q.; HUSSAIN, Q.; LI, L.Q.; ZHENG, J.W.; ZHENG, J.F.; ZHANG, X.H.; HAN, X.J.; YU, X.Y. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 127, n. 2, p. 153-160, 2012.

ZECH, Z.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.;MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, n. 3, p. 69-116, 1997.

3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA DESCREVER O EFEITO DO BIOCHAR NA FERTILIDADE DO SOLO E DESEMPENHO AGRONÔMICO DA SOJA

RESUMO

O uso de técnicas que favoreçam o aumento da fertilidade do solo e reduções no uso de fertilizantes químicos são apontados como importante alternativa para a produção agrícola de forma mais sustentável. Objetivou-se com essa pesquisa verificar o efeito do biochar nos atributos químicos do solo e no desenvolvimento e produtividade da soja. O experimento foi conduzido a campo em Nova Xavantina - MT em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de setembro de 2006 a abril de 2014. O delineamento experimental foi em esquema fatorial de blocos ao acaso com cinco doses (0, 100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹) de NPK (0-20-20) e 5 doses de biochar (0, 2, 4, 8 e 16 Mg ha⁻¹) ao acaso, em quatro repetições (blocos). O biochar foi aplicado uma única vez (setembro de 2006) 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 0-20 cm e analisados os seguintes atributos: pH, Ca, Mg, H+Al, P, K, e matéria orgânica (MO). As variáveis agronômicas estudadas foram: altura e fitomassa seca em V4 e R1 e produtividade. Com a análise multivariada, constatou-se interação entre o efeito da adubação mineral e aplicação de biochar nos atributos químicos do solo ao longo dos quatro anos após a aplicação. À medida que as estruturas aromáticas do biochar são oxidadas, observa efeito positivo nos teores de MOS. Nos 1º, 3º e 4º anos, a produtividade foi significativamente aumentada em razão principalmente da aplicação de 16 Mg ha⁻¹ de biochar, sendo a equação com comportamento quadrático. Já nos 7º e 8º anos o efeito direto do biochar foi reduzido com baixa variação da produtividade de grãos.

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

ABSTRACT

PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS TO DESCRIBE THE EFFECT OF BIOCHAR ON SOIL FERTILITY AND AGRONOMIC PERFORMANCE OF SOYBEAN

The objective of the present work was to examine the effect of biochar on the chemical attributes of soil and the development and productivity of soybean. The experiment was conducted under field conditions in Nova Xavantina, Mato Grosso State, Central Brazil, in typical Oxisol soil of the Cerrado (savannah-like vegetation) from September 2006 to April 2014. The experimental design was factorial scheme of blocks, with five doses (0, 100, 200, 300 and 400 kg ha⁻¹) of NPK (0-20-20) and five doses of biochar (0, 2, 4, 8 and 16

Mg ha⁻¹) randomized in four replicates (blocks). The biochar was applied and incorporated into the soil to a depth of 0-0.15 m only once in September 2006. The soil samples were collected at 0-0.20 m depth to evaluate pH, Ca, Mg, H+Al, P, K, and soil organic matter (SOM) as the main soil fertility attributes. Agronomic variables were: height and dry biomass in V4 and R1 phenological phases and productivity. With multivariate analysis, there was synergism interaction between the effect of mineral fertilization and application of biochar on soil chemical over the four years after the application attributes. As the aromatic structures of biochar are oxidized there is positive effect on SOM. In the 1st 3rd and 4th year, productivity was significantly increased mainly due to the application of 16 Mg ha⁻¹ of biochar, with an equation with quadratic behavior. Already in the 7th and 8th grade direct effect of biochar was reduced with low variation of grain yield.

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

3.1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no Brasil, tem se destacado por contribuir, de forma considerável, para o desenvolvimento da cadeia produtiva e do agronegócio na região dos Cerrados. O crescimento da área agricultável tem ocorrido muitas vezes em áreas de reserva, onde a derrubada e queima da mata ocasiona perda da fertilidade natural do solo e diminuição da matéria orgânica do solo (Petter & Madari, 2012).

Alguns trabalhos apontam que a matéria orgânica (MOS) do solo tem três vezes mais carbono do que a existente em toda a biomassa vegetal terrestre (Batjes, 1996) e as emissões de CO₂ do solo, pela ação antrópica, podem representar 25% das emissões do CO₂ do planeta (Bouwman & Germon, 1998). A matéria orgânica influencia nas propriedades químicas e físicas dos solos de cerrado, contribuindo em até 80% da capacidade de troca catiônica (CTC) desses solos (Pacheco & Petter, 2011). Entretanto, nesse bioma, a taxa de mineralização da MOS atinge altos níveis na decomposição desses resíduos, em razão da elevada temperatura e atividade microbológica, reduzindo a quantidade desses compostos no solo (Pacheco et al., 2011).

Estudos demonstram que práticas agrícolas recentes vêm contribuindo para a redução das perdas de fertilidade dos solos, como a adoção do sistema de plantio direto. Apesar dos benefícios do sistema plantio direto com o uso de plantas de cobertura e rotação de culturas nas características químicas, físicas e biológicas do solo, ainda é significativo o uso de fertilizantes químicos na tentativa de obtenção de altas produtividades, em função da baixa fertilidade natural dos solos de cerrado (Watanabe et al., 2005). Diante disso, os fertilizantes ainda representam parcela significativa nos custos

de produção, chegando a serem responsáveis por 32% do custo direto de produção e 9% do custo total (Conab, 2009). Além do mais, contribuem para a emissão de gases de efeito estufa (CO_2 e N_2O), em razão da aplicação direta ao solo, principalmente de fertilizantes nitrogenados, e pelo processo de fabricação das matérias primas através da queima de combustíveis fósseis (Baede et al., 2001).

Observações de Machado (2005) demonstram que a agricultura introduzida após o desmatamento proporciona impacto significativo ao meio ambiente, como o aumento nas emissões de gases de efeito estufa, com destaque para o CO_2 . Tecnologias capazes de manter o carbono captado da atmosfera fixado ao solo por vários anos e, sobretudo, com aumento da fertilidade, tem sido alvo de pesquisas recentes, como é o caso do uso do biochar ou carvão vegetal na agricultura (Glaser et al., 2002; Lehmann et al., 2003; Topoliantz et al., 2005; Steiner et al., 2007; Van Zwieten et al., 2010; Petter et al., 2012).

O comportamento das variáveis, em resposta aos fatores, quando se trabalha com atributos de fertilidade e desenvolvimento das plantas em um único experimento podem ser melhor abordadas quanto melhor for o método utilizado para o tratamento estatístico dos dados. Segundo Mbagwu & Piccolo (1997), os modelos estatísticos clássicos tornam-se menos sensíveis em sistemas biológicos, em razão das particularidades próprias de cada tratamento, e por não considerarem o efeito conjunto de inúmeros fatores e características para promover as respostas aos tratamentos. Nesse sentido, a análise estatística multivariada permite o estudo conjunto de diferentes fatores e seus efeitos sobre os mais diferentes atributos estudados, de maneira que se identifiquem quais fatores (bióticos ou abióticos) que mais interferem nas características a serem avaliadas.

A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica estatística multivariada que transforma linearmente um conjunto de dados de diversas variáveis, ou seja, transforma um conjunto de dados inicialmente correlacionados, em um conjunto de dados não correlacionados entre si (Silva & Padovani, 2006). Os componentes principais (CPs) representam um novo conjunto de variáveis artificiais que são funções lineares daquelas originais e que tem variância máxima (Pereira et al., 2010).

Portanto, objetivou-se com essa pesquisa descrever, por meio da análise multivariada, o efeito da adição de biochar associado a fertilizante NPK na fertilidade do solo e no desempenho agrônômico da soja.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em setembro de 2006 em Nova Xavantina, MT, bioma Cerrado. A localização geodésica é 14° 35' 36" de latitude Sul e 52° 24' 04" de longitude Oeste, e altitude de 310 m. A região em estudo encontra-se inserida na classificação climática global de Köppen como Aw, com duas estações bem definidas, sendo uma seca que vai de maio a setembro e outra chuvosa de outubro a abril. Os dados climáticos durante a condução do experimento estão apresentados nas Figuras 3.1 e 3.2.

Os tratamentos do experimento, num total de 25, foram compostos pela combinação de quatro doses de adubação de base (0; 100; 200; 300 e 400 kg ha⁻¹ da fórmula 00-20-20 de adubo NPK) e quatro doses de carvão vegetal, como fonte de carbono pirogênico (0; 2; 4; 8 e 16 Mg ha⁻¹ em base úmida) ao acaso, em quatro repetições (blocos).

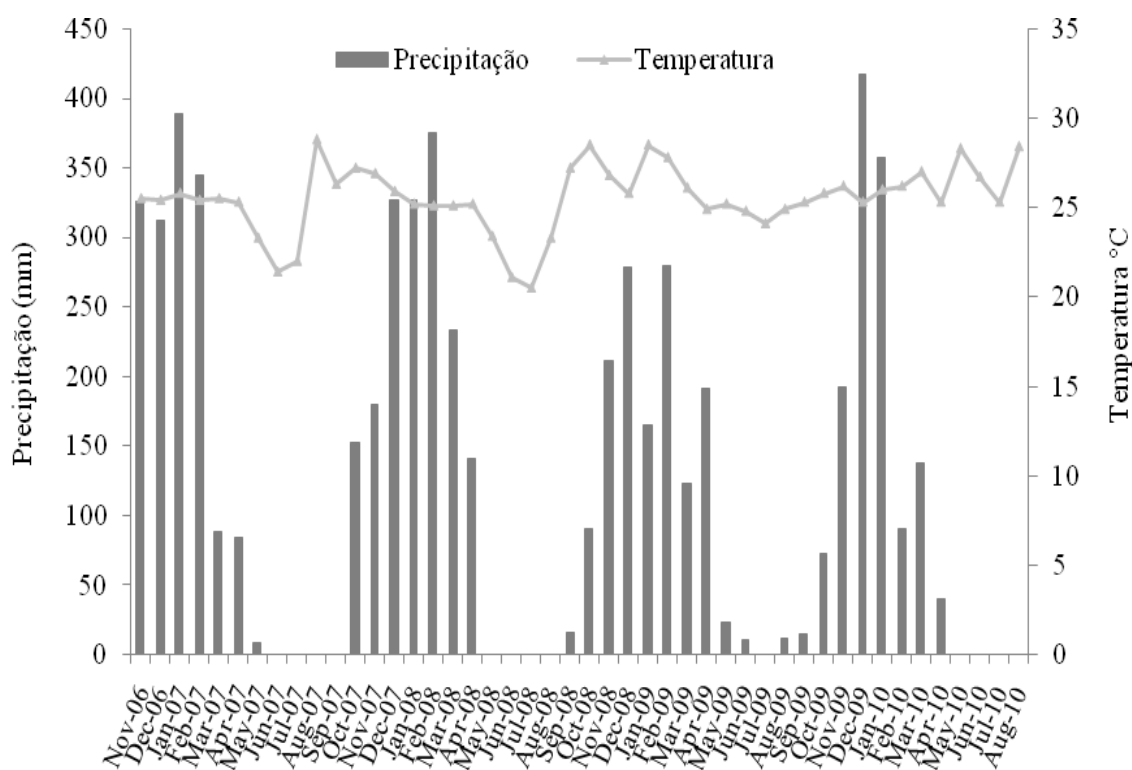


Figura 3.1. Precipitação (mm) e temperatura média (°C) registrados em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento de novembro de 2006 a agosto de 2010. Fonte: INMET, Nova Xavantina – MT.

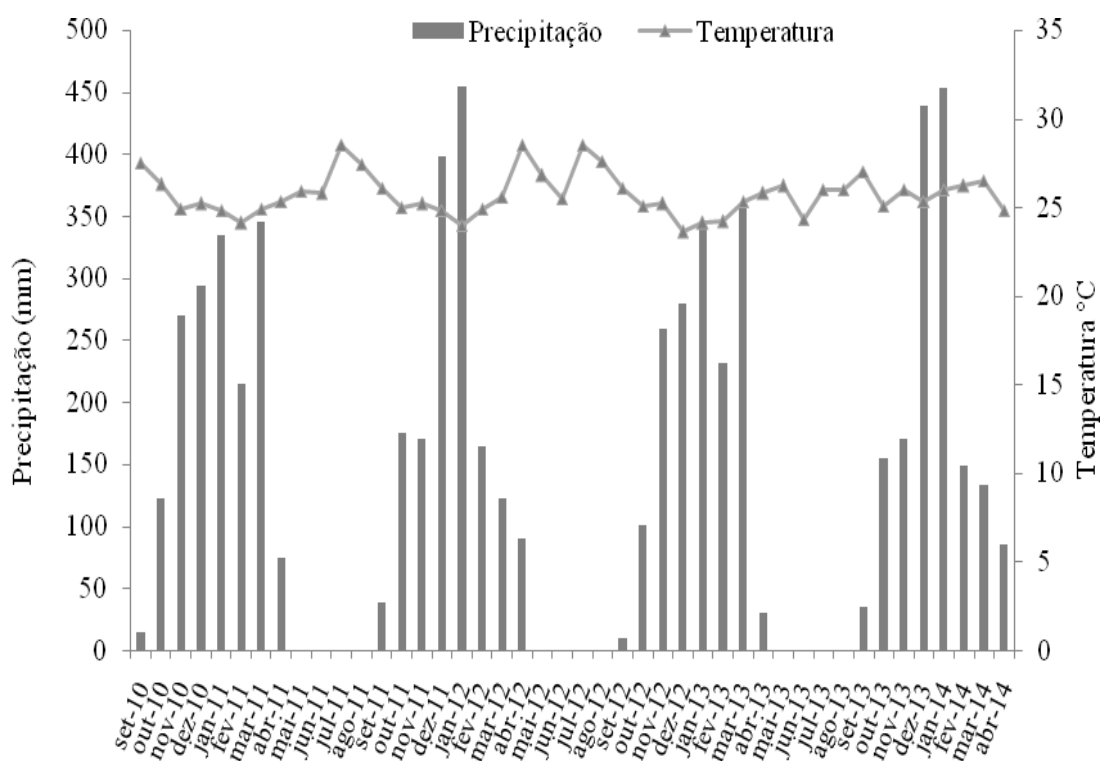


Figura 3.2. Precipitação (mm) e temperatura média (°C) registradas em Nova Xavantina, MT, durante a condução do experimento de setembro de 2010 a abril de 2014. Fonte: INMET, Nova Xavantina – MT.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd, Embrapa, 2013), textura franco-argilo-arenosa. Nas análises química e granulométrica de amostras de solo coletadas na camada de 0-20 cm, antes da implantação do experimento, verificou-se: pH (H₂O): 5,6; fósforo (P, método de Mehlich 1 - HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹): 6,7 mg dm⁻³; potássio (K⁺): 61,5 mg dm⁻³; cálcio (Ca²⁺): 1,4 cmol_c dm⁻³; magnésio (Mg²⁺): 0,4 cmol_c dm⁻³; alumínio (Al³⁺): 0,13 cmol_c dm⁻³; acidez potencial (H⁺+Al³⁺): 4,98 cmol_c dm⁻³; saturação por bases (V%): 27; capacidade de troca catiônica (CTC): 6,93 cmol_c dm⁻³; matéria orgânica (MOS): 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.

A composição do carvão vegetal, de origem de diferentes espécies de árvores de cerrado, adicionado ao solo, está demonstrada na Tabela 3.1. Entre os macronutrientes esse carvão vegetal conteve K e Ca em maior proporção, entre os micro elementos 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.

Variável	Unidade	Valor Obtido
Nitrogênio total (N)		6,6
Fósforo (P ₂ O ₅ ácido cítrico)		0,3
Fósforo (P ₂ O ₅ total)		1,0
K ₂ O	g kg ⁻¹	3,3
CaO		5,7
MgO		1,1
Enxofre (S)		0,4
Cobre (Cu)		7,0
Ferro (Fe)		6.150,0
Manganês (Mn)	mg kg ⁻¹	194,0
Zinco (Zn)		13,0
Molibdênio (Mo)		2,0
Cobalto (Co)		1,0
Boro (B)	mg kg ⁻¹	5,0
Carbono total (C)		490,6
Umidade		50,0
Material mineral total		280,0
Relação C:N	g kg ⁻¹	74,3

Fonte: Petter (2010).

A amostra de carvão vegetal teve uma baixa relação sinal: ruído (Figura 3.3). 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) relativos a lignina (embora não tenha sido avaliado VACP-TOSS-DD 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 arilas, que podem ser responsáveis por alguma reatividade química no carvão vegetal.

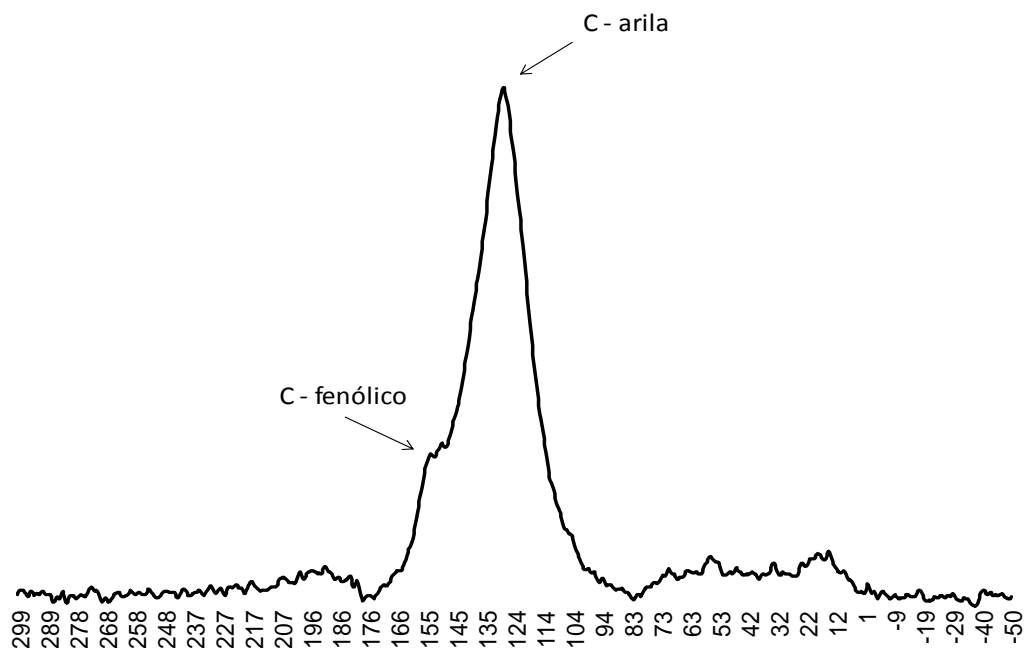


Figura 3.3. Espectro de ressonância magnética nuclear (RMN) ^{13}C do biochar de eucalipto utilizado no experimento. As amostras foram analisadas por polarização cruzada de amplitude variável (VACP) ^{13}C de estado sólido de RMN, num espectrômetro Varian 500 MHz em frequências de 125 e 500 MHz para ^{13}C e ^1H , respectivamente. Os experimentos foram realizados utilizando uma rotação de ângulo mágico (MAS), de 14 kHz, com tempo de polarização cruzada de 1 ms, tempo de aquisição de 15 ms, atraso de reciclagem de 500 ms e alta potência de modulação e duas fases de pulso de dissociação de próton de 70 kHz. O tempo de polarização cruzada foi escolhido após as experiências de tempo de contato variável, e os atrasos de reciclagem em experiências CP foram escolhidas para ser cinco vezes maior do que o maior tempo de relaxação de spin ^1H -estrutura ($T^1\text{H}$), conforme determinado por experiências de inversão-recuperação. Os espectros foram processados com apodização de Gauss ($gf = 0,004$ segundos) (Fonte: Petter, 2010).

Antes da implantação, a área do experimento era cultivada com soja (*Glycine max* L.), há dez anos em sistema de semeadura direta. O biochar foi aplicado ao solo uma única vez (safra 2006/2007), e incorporado a uma profundidade de 0 cm a 15 cm, dois meses antes da semeadura da cultura da soja, utilizando-se enxada rotativa. Antes da incorporação ao solo, o biochar foi moído para passar em peneira de 2 mm, visando o aspecto granulométrico semelhante ao calcário. Posteriormente, foi semeado milheto (*Pennisetum americanum*) na área experimental, visando à formação de palhada. Cada parcela foi composta por nove linhas da cultura com 10 m de comprimento, totalizando $40,50\text{ m}^2$, sendo a área útil para as avaliações de $25,20\text{ m}^2$.

Dois dias antes da semeadura da soja, foi realizada dessecação de manejo na área experimental utilizando-se 1.080 g ha⁻¹ de equivalente ácido (e.a.) de glyphosate e 241,8 g ha⁻¹ e.a. de 2,4-D. A semeadura (cultivar TMG 108 RR[®]) foi realizada sempre no dia 05 de dezembro de cada ano, 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.

Durante o desenvolvimento da cultura foram realizados tratamentos fitossanitários, 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 aplicação de fungicidas trifloxistrobina + ciproconazol (65,63 + 28 g ha⁻¹) para o controle de doenças.

As coletas de dados foram realizadas nas safras 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010, 2012/2013 e 2013/2014. Avaliaram-se as características agronômicas das plantas e os atributos químicos do solo. Para análise das plantas, coletaram-se amostras nos estádios V4 (terceiro trifólio totalmente aberto) e R1 (plena floração), nos quais foram medidos: fitomassa seca e altura (cm) das plantas, coletando-se dez plantas por parcela. A fitomassa seca foi obtida secando-se a parte aérea das plantas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas e, em seguida, pesando-se os resíduos vegetais. Por ocasião da colheita da soja, avaliou-se a produtividade, com posterior padronização da umidade dos grãos em 14%.

Para características químicas do solo, em pleno florescimento da soja, foram avaliados os atributos: pH, Ca, Mg, H+Al, P, K e MOS, utilizando métodos descritos pela Embrapa (1997), sendo as amostras coletadas nas profundidades de 0-20 cm, constituindo amostras compostas por três sub-amostras coletadas aleatoriamente dentro de cada parcela.

A MOS foi determinada pelo método Walkley-Black sem aquecimento suplementar. A quantificação da MOS foi realizada segundo Embrapa (2011). Trata-se do método Walkley-Black modificado (oxidação da MOS com dicromato de potássio). Resume-se no princípio de oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇ 0,4N) em meio sulfúrico (H₂SO₄), empregando-se como fonte de energia o calor despreendido do ácido sulfúrico. O excesso de dicromato após a oxidação foi titulado com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal hexahidratado (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O). Para cada avaliação foi utilizada uma alíquota de, aproximadamente 0,5 g de solo, em que:

$$\text{MOS} = 1,724 \times (\text{V}_{\text{br}} - \text{V}_{\text{x}}) \times [\text{Fe}^{2+}] \times 3 / \text{M}_{\text{solo}}$$

$$[\text{Fe}^{2+}] = 10 \times 0,167 \times 6 / \text{V}_{\text{br}}$$

Sendo:

MOS – Matéria orgânica do solo, em g kg⁻¹;

V_{br} – Volume do branco;

V_x – Volume de Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O utilizado na titulação;

M_{solo} – Massa de solo em g;

[Fe²⁺] – Padronização do Fe (II).

O método estatístico de análise multivariada aplicados foi a análise de componentes principais (ACP), utilizando o software Statistica Versão 7.0. Na análise de componentes principais as variáveis independentes NPK e biochar também foram plotadas, mas apenas como variáveis ilustrativas, ou seja, não distorcem a inércia dos dados nem contribuem para os CPs. As variáveis foram padronizadas antes de executar as análises. Também foram analisados separadamente os parâmetros de produtividade em função apenas do biochar, sendo esses submetidos à análise de regressão utilizando o software SigmaPlot, aplicando o teste F a 5% de probabilidade, e utilizado o modelo que melhor se ajustasse aos dados de produtividade, bem como do coeficiente de correlação (R²) associado a cada modelo de regressão.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise de componentes principais (ACP) e observadas as variáveis de fertilidade do solo (pH, Ca, Mg, P, K e H+Al), parâmetros fisiológicos e produtividade da soja, é possível verificar o efeito da aplicação do biochar vegetal ao solo em combinação com fertilizante químico NPK ao longo dos anos, e como essas variáveis se correlacionam. Como as variáveis independentes (NPK e Biochar) também são visíveis no “biplot”, é possível visualizar o efeito da adubação (NPK) e do biochar nas variáveis dependentes.

Na Figura 3.4 são apresentados os componentes principais (CP) dos dados fisiológicos e de fertilidade no primeiro ano após a aplicação do biochar. O CP1 (Fator 1) reteve 45,81% e o CP2 (Fator 2) 19,11% da inércia dos dados, acumulando no gráfico 65,58% da informação da matriz original. No gráfico, claramente pode ser identificado o

maior efeito da adubação de semeadura (NPK) nos parâmetros fisiológicos altura e fitomassa seca das plantas. Para a produtividade observa-se maior efeito da aplicação de biochar do que a de adubação de semeadura. No primeiro ano, no CP1 percebe-se o efeito no aumento dos teores de Ca e Mg e aumento da acidez (pH), resultando na diminuição da acidez potencial (H+Al).

No CP2, com menor peso (19,77%), existe um comportamento diferenciado, onde as respostas fisiológicas da planta crescem no sentido oposto à fertilidade do solo. Ressalta-se que a acidez potencial (H+Al) é aumentada e também o pH reduzido no sentido de crescimento das respostas fisiológicas, indicando maior dissolução dos nutrientes. Esses dados corroboram com os obtidos por Rondon et al. (2006), que observaram elevados teores de H+Al com a aplicação de biochar no solo.

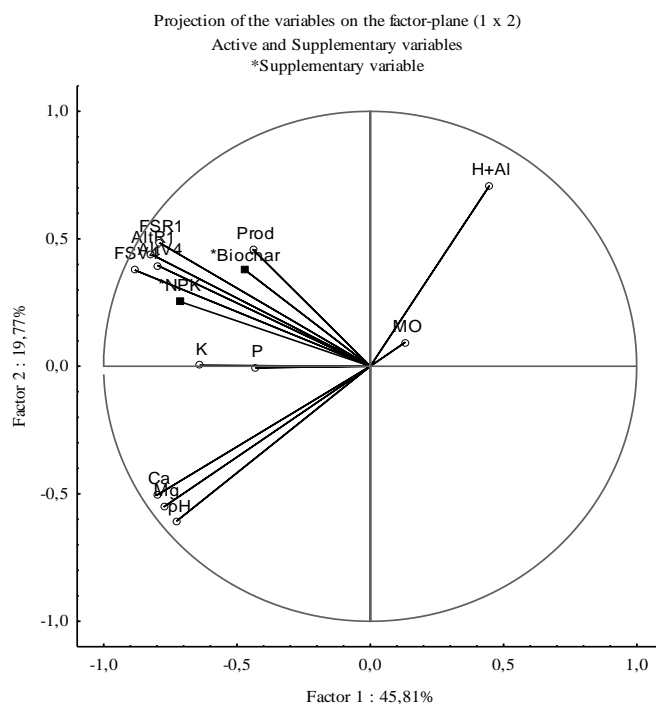


Figura 3.4. Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento no 1º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2006/2007). NPK e Biochar são variáveis suplementares.

Em geral a redução do pH no solo leva a redução nos teores de Ca e Mg (Fernandes, 2006). Dessa maneira, o CP2 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), fitomassa seca (FSV4) e altura (AltV4) das plantas. De maneira geral, as respostas das plantas aumentam com o aumento das doses de biochar e NPK.

Os componentes principais (CP) dos dados agronômicos e de fertilidade no terceiro ano após a aplicação do biochar demonstram que o CP1 (Fator 1) reteve 58,65% da inércia dos dados e o CP 2 13,33%, acumulando no gráfico 71,98% da informação da matriz original (Figura 3.5).

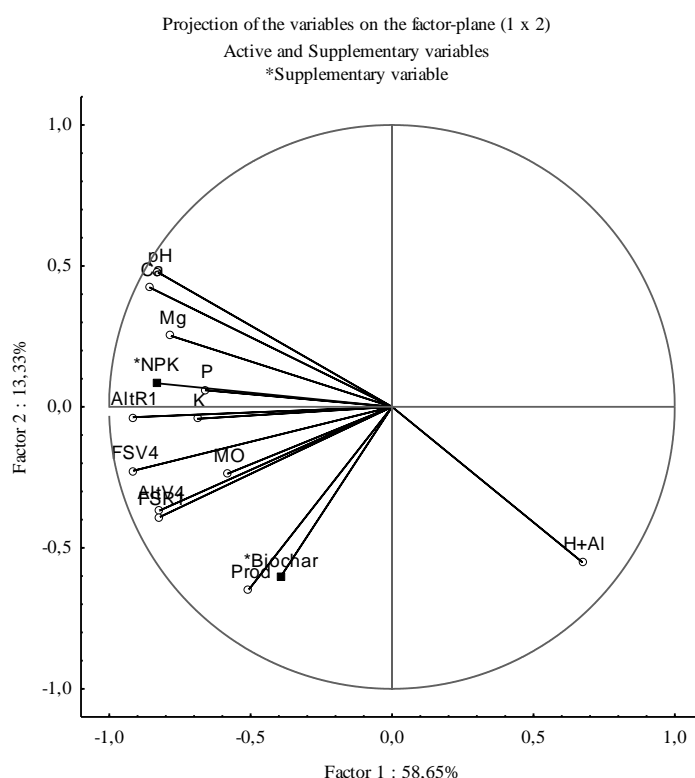


Figura 3.5. Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento no terceiro ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2008/2009). NPK e Biochar são variáveis suplementares.

Observa-se no gráfico que as respostas fisiológicas altura e fitomassa seca são influenciadas pelas duas variáveis suplementares (NPK e Biochar) de maneira dividida, diferentemente do primeiro ano após a aplicação de biochar (Figura 3.4), que tinha o NPK como variável independente que mais exercia influência sobre esses parâmetros. No terceiro ano, no CP1, percebe-se o efeito de aumento nos teores de Ca, Mg, P e pH com o

aumento das doses de biochar, todavia, como já esperado, o maior efeito (peso) é verificado para as doses de NPK. Da mesma forma, Petter et al. (2012) verificaram aumento inicial de Ca, Mg, pH ou P, com a aplicação de fertilizantes e biochar.

Com menor peso, o CP2 que retém 13,33% da inércia dos dados demonstra efeito semelhante ao do primeiro ano após a aplicação, onde novamente as respostas fisiológicas crescem no sentido oposto à fertilidade. Observa-se no CP2 um maior efeito do NPK sobre a acidez potencial, que é reduzida e o pH aumentado.

O efeito do biochar no PC2, mesmo com menor peso, é de redução nos teores de Ca, Mg e P, que se deve ao aumento na retenção e disponibilização desses nutrientes pelas plantas. Esse efeito é evidente, uma vez que, a redução dos teores com o aumento das doses de biochar vem acompanhado do aumento da produção de fitomassa seca (Figura 3.5), o que pode ser explicado pela maior extração dos nutrientes em função da maior produção de fitomassa, reduzindo, assim, seus teores no solo. Essa maior retenção dos nutrientes em função da aplicação de biochar pode ser parcialmente explicado pelo aumento da matéria orgânica (MOS), resultando em maiores quantidades de sítios quimicamente reativos (Araújo et al., 2007; Campos et al., 2011), uma vez que em solos de cerrado a MOS representa a maior parte da CTC.

Outro aspecto a ser considerado, é a oxidação lenta das bordas das estruturas aromáticas do biochar, que levam à formação de grupos carboxílicos e fenólicos responsáveis pela formação de complexos organo-minerais e aumento da CTC (Glaser et al., 2002). Comprovadamente é evidente esse efeito, uma vez que Lima (2012) verificou por meio de análises espectroscópicas (RMN), significativa oxidação do biochar já no primeiro e no segundo ano após a aplicação.

No quarto ano após a aplicação do biochar, a análise dos componentes principais 1 e 2 reteve 73,79% dos dados da matriz original, sendo que o CP1 com maior peso reteve 51,72% e o CP2 com menor peso 22,07% da inércia dos dados (Figura 3.6). De maneira geral as respostas agrônômicas e a fertilidade do solo tiveram comportamento semelhante ao do terceiro ano. No entanto, a altura e a fitomassa seca que no terceiro ano estava dividida entre os efeitos do biochar e do NPK, no quarto ano fica claro a maior contribuição do biochar para esses parâmetros.

Observa-se no CP1 que a MOS, que era centralizada no primeiro ano (Figura 3.4), gradativamente cresceu ao longo do terceiro e do quarto ano, no sentido do círculo único, passando a ter grande inércia dos dados, ou seja, aumentando com as doses crescentes de

biochar. Essa baixa alteração dos teores de MOS no primeiro ano pode ser atribuído à estabilidade do carbono pirogênico, significando que a adição de carvão, em curto prazo, não alterou o teor de matéria orgânica oxidável, determinável pelo método Walkley-Black. De acordo com Petter et al. (2012), a alta estabilidade molecular do carbono pirogênico do biochar, faz com que esse método não consiga oxidar todo o material oriundo da pirólise. Ainda, segundo esses autores, tal fato é evidente a medida que há um aumento nos teores de carbono orgânico total (COT) com a aplicação de biochar quando este é determinado pela oxidação total da M.O. (através de CHN).

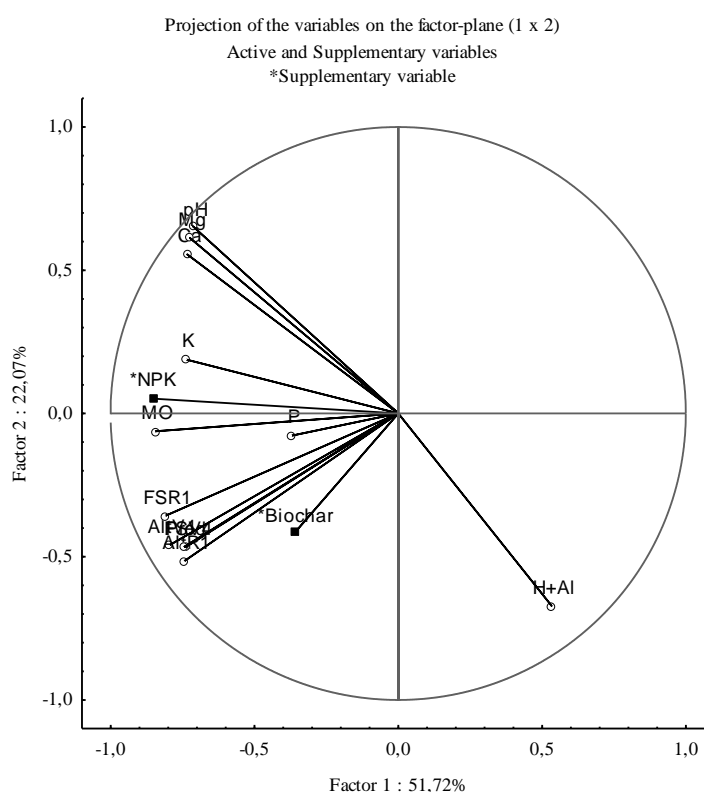


Figura 3.6. Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento no 4º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2009/2010). NPK e Biochar são variáveis suplementares.

Esse efeito de crescimento gradativo nos teores de MOS é interessante para a fertilidade e qualidade do solo, sendo a MOS um importante componente das mesmas. O efeito proporcionado pelo biochar, em médio prazo, pode ser explicado, em parte, pelo efeito elucidado no CP1, que é o poder de retenção do biochar, pela transformação de parte

do carbono pirogênico adicionado em moléculas orgânicas mais lábeis ou oxidáveis, ou pelo efeito positivo do biochar no carbono da biomassa microbiana (Hamer et al., 2004), ou ainda, na dinâmica do carbono favorecendo (mais rápido e em maiores quantidades) a transformação da MOS fresca em frações mais estáveis, como foi observado por Sohi et al. (2008) em Terra Preta de Índio.

A transformação do biochar no solo pode ser também qualitativa no nível molecular pela ação de diferentes grupos de microrganismos, enzimas, da fauna do solo e de fatores abióticos, como temperatura, irradiação solar e reações químicas (Madari et al., 2009). No CP2, com menor peso, representando 22,07% da inércia dos dados, novamente se observa efeito semelhante ao do primeiro e do terceiro ano.

O principal efeito de interesse é o do biochar, mas ele não pode ser explicado apenas por uma tendência principal (CP) na inércia dos dados, pois graficamente ele está descrito nas duas CPs. Como uma componente é independente da outra, parece que o biochar causa dois efeitos independentes. Em CP1, o efeito na retenção de minerais no solo, pois com o aumento de biochar aumenta-se a fertilidade do solo. Em CP2, seu efeito seria a disponibilização desses minerais para as plantas, e 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 e oposto à fertilidade (CP2). O efeito duplo do biochar, representado nas duas CPs, pode ser parcialmente explicado pela sua composição química. Como reportado anteriormente, devido à oxidação parcial, as unidades aromáticas periféricas do carbono pirogênico contém principalmente compostos carboxílicos (Glaser et al., 2002; Kramer et al., 2004; Novotny et al., 2007) e Figura 3.3 que confere aromaticidade e estabilidade ao biochar e os grupos carregados eletronicamente conseguem reter os minerais, justificando os efeitos nas CPs.

Nos sétimo e oitavo anos após a aplicação do biochar, os fatores da análise dos componentes principais 1 e 2 retiveram 60% e 62% dos dados da matriz original, respectivamente. No sétimo ano o CP1 com maior peso reteve 37,12% e o CP2, com menor peso, 22,03% da inércia dos dados (Figura 3.7 A), enquanto que, no oitavo ano o CP1, com maior peso, reteve 38,17% e o CP2 com menor peso, 23,73% da inércia dos dados (Figura 4.7 B).

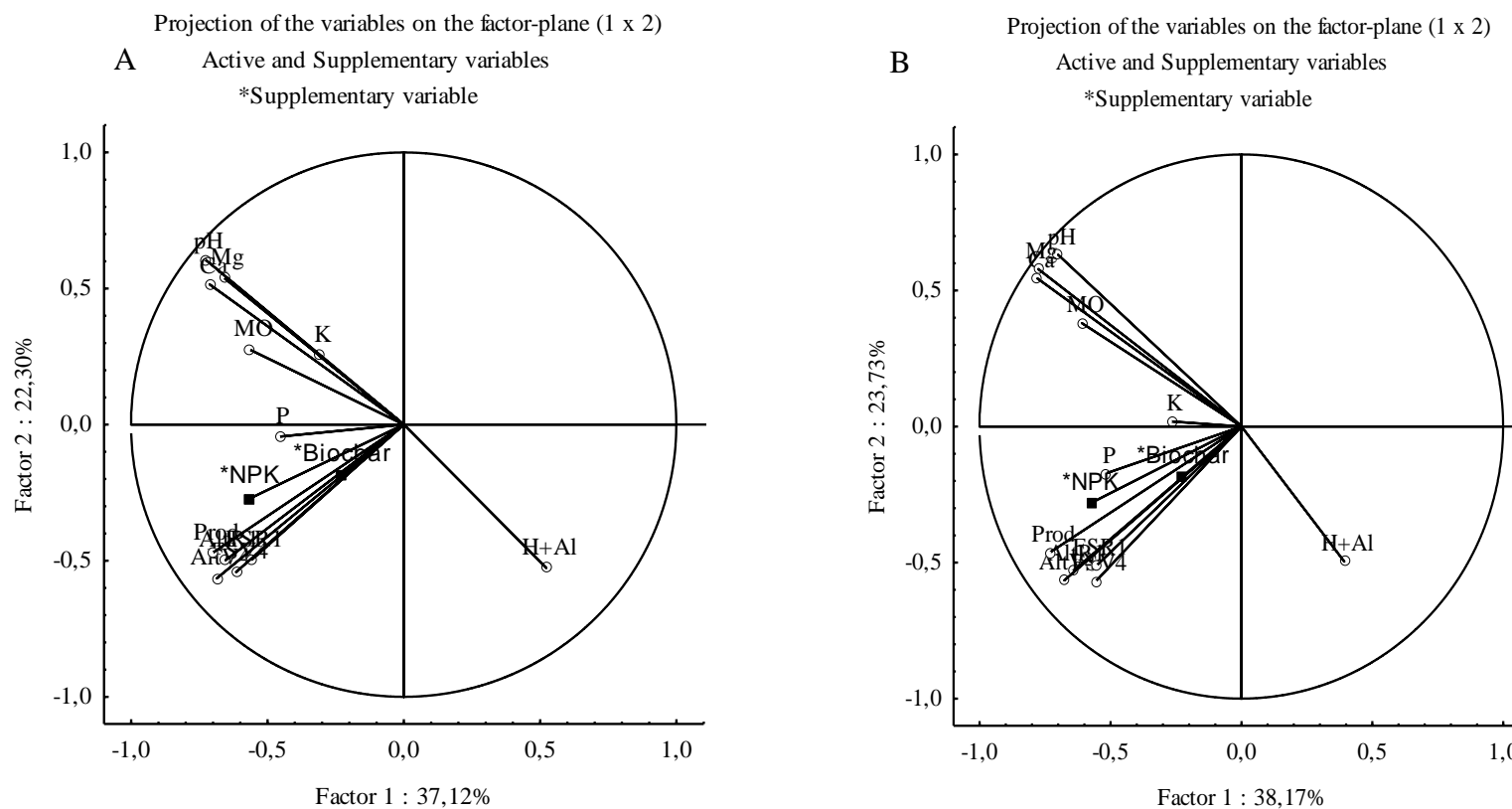


Figura 3.7. Componentes principais (CPs) da análise combinada de variáveis fisiológicas (AltV4: altura da soja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: massa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja) e da fertilidade do solo (0-20 cm) do experimento. (A) no 7º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2012/2013) e (B) no 8º ano após a aplicação de biochar ao solo (safra 2013/2014). NPK e Biochar são variáveis suplementares.

Assim, como no terceiro e quarto ano após a aplicação do biochar, nos sétimo e oitavo anos, as respostas fisiológicas e a fertilidade do solo apresentaram comportamento semelhante. Todavia, a altura e a fitomassa seca, que, no quarto ano tiveram maior contribuição do biochar, nos sétimo e oitavo anos passaram a ter maior efeito da adubação química (NPK).

Percebe-se, claramente, a redução do efeito direto do biochar com o passar dos anos (Tabela 3.2), todavia, o efeito como condicionador de solo potencializando o fertilizante químico, fica cada vez mais evidente, uma vez que, como verificado em anos anteriores, a redução nos teores de alguns nutrientes vem acompanhado do aumento na produção de fitomassa e produtividade de grãos.

Como reportado anteriormente, a MO, que era centralizada no primeiro ano (Figura 3.4) e, gradativamente, cresceu ao longo dos terceiro e quarto anos, no sentido do círculo único, ou seja, aumentando com as doses crescentes de biochar, manteve-se nos sétimo e oitavo anos (Figura 3.7 A e B). Entretanto, a ACP descreve dois efeitos, em que o primeiro e com maior peso seria o efeito benéfico do biochar nos teores de MOS (CP1), e o segundo com efeito contrário e menor peso no CP2. Esse efeito de redução da MOS verificada no CP2 é em função de uma operação de gradagem niveladora efetuada na área do experimento na safra 2012/2013, visando a incorporação de milho para a formação de palhada. De acordo com Caetano et al. (2013), operações de revolvimento do solo proporcionam redução nos teores de MOS.

Desconsiderando o efeito da perturbação do solo pela operação de gradagem, fica claramente evidenciado a importância do biochar na dinâmica da MOS que se manifesta ao longo dos anos, onde sua contribuição para o aumento nos teores, se torna cada vez mais evidente, o que pode ser observado também pelo carregamento dos fatores (Tabela 3.2).

Ao analisar separadamente os dados de produtividade verifica-se comportamento quadrático da curva de ajuste das equações, em que o aumento da mesma vai até certa dose de biochar, depois tende a reduzir, como mostra a Figura 3.8. Reduções nas produtividades de soja e milho foram verificadas quando aplicadas altas doses de biochar (Kishimoto & Sugira, 1985) e na presença de elevados teores de ácidos húmicos (Mbagwu & Picollo, 1997). Elevadas quantidades de biochar e de ácidos húmicos podem levar a um aumento do pH e, conseqüentemente, menor disponibilidade de micronutrientes para as plantas, reduzindo a produtividade.

Tabela 3.2. Coordenadas (carregamentos) dos fatores das variáveis agronômicas e da fertilidade do solo analisadas em conjunto, em base de correlações nos primeiro, terceiro, quarto, sétimo e oitavo anos após a aplicação de carvão vegetal ao solo (safras 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010, 2012/2013 e 2013/2014).

Variáveis	Primeiro ano		Terceiro ano		Quarto ano		Sétimo ano		Oitavo ano	
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2
pH	-0,652	0,566	-0,828	0,488	-0,714	0,653	-0,729	0,607	-0,699	0,631
Ca	-0,748	0,614	-0,849	0,427	-0,733	0,555	-0,712	0,515	-0,778	0,544
Mg	-0,716	0,598	-0,778	0,260	-0,724	0,612	-0,660	0,539	-0,775	0,578
H+Al	-0,291	-0,338	0,664	-0,569	0,532	-0,671	-0,564	0,275	-0,609	0,380
P	-0,458	0,271	-0,659	0,039	-0,371	-0,077	0,522	-0,526	0,392	-0,496
K	-0,661	0,250	-0,694	-0,055	-0,737	0,188	-0,455	-0,044	-0,516	-0,172
M.O.	0,093	0,169	-0,628	-0,375	-0,846	-0,062	-0,311	0,254	-0,268	0,019
AltV4	-0,828	-0,376	-0,824	-0,338	-0,795	-0,459	-0,685	-0,565	-0,676	-0,565
AltR1	-0,852	-0,309	-0,916	-0,004	-0,744	-0,515	-0,653	-0,497	-0,642	-0,530
FSV4	-0,910	-0,302	-0,919	-0,195	-0,738	-0,466	-0,615	-0,541	-0,555	-0,568
FSR1	-0,840	-0,410	-0,826	-0,361	-0,810	-0,357	-0,560	-0,498	-0,551	-0,509
Prod	-0,464	-0,511	-0,523	-0,646	-0,747	-0,466	-0,700	-0,470	-0,731	-0,462
% Var.	45,81	19,77	58,65	13,33	51,72	22,07	37,12	22,30	38,17	23,73
*Biochar	-0,504	-0,443	-0,398	-0,567	-0,358	-0,413	-0,228	-0,183	-0,224	-0,182
*NPK	-0,745	-0,108	-0,834	0,083	-0,852	0,051	-0,564	-0,270	-0,575	-0,280

AltV4: altura da planta desoja na fase vegetativa 4, AltR1: altura da soja na fase reprodutiva 1, FSV4: fitomassa seca da planta da soja na fase vegetativa 4, FSR1: fitomassa seca da planta da soja na fase reprodutiva 1, Prod: produtividade da soja, pH: potencial hidrogeniônico, Ca: cálcio (Ca^{2+}); Mg: magnésio (Mg^{2+}), H+Al: acidez potencial, P: fósforo disponível, K: potássio, M.O.: matéria orgânica. * variáveis suplementares.

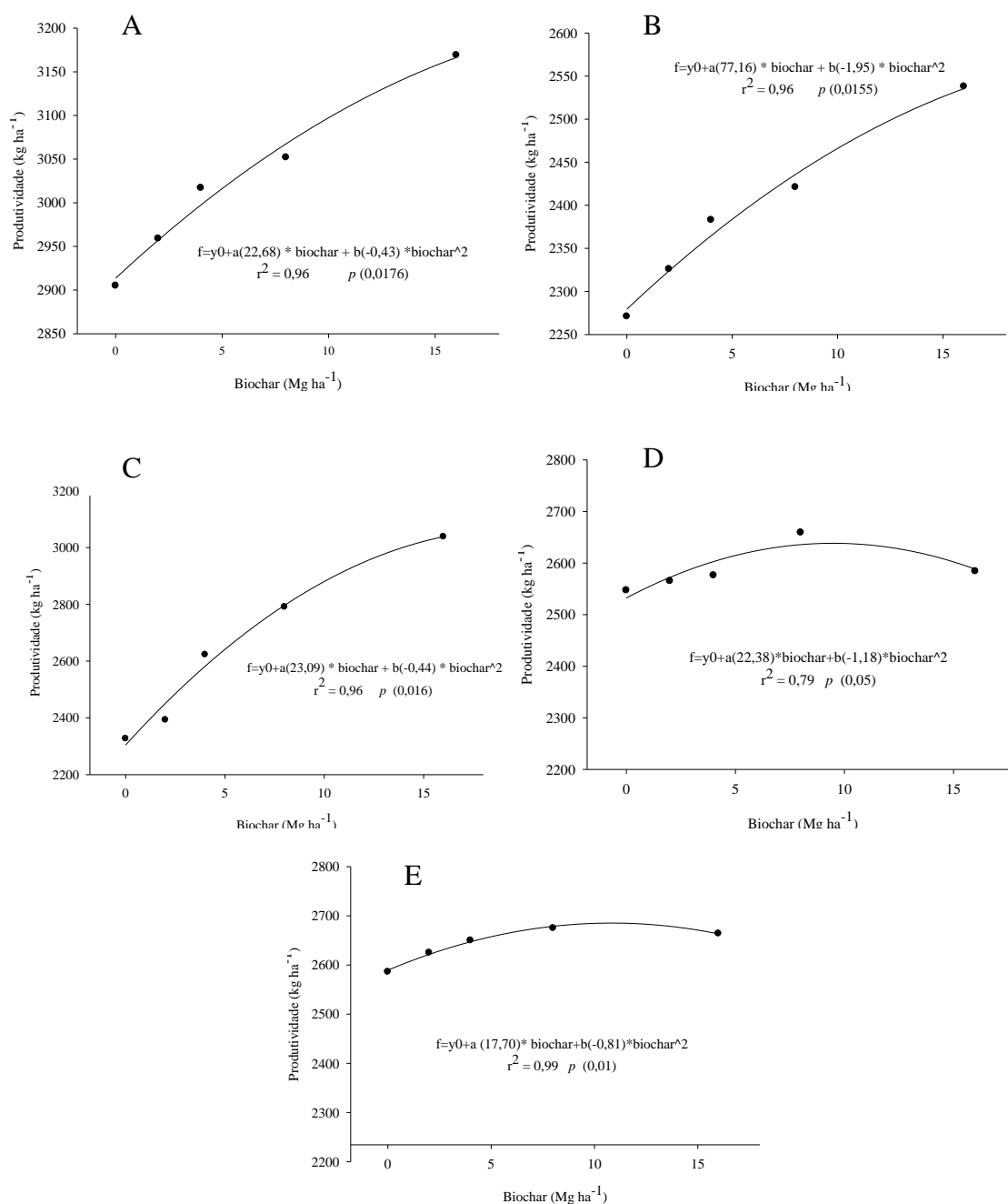


Figura 3.8. Produtividade de grãos de soja em função de diferentes doses de biochar, (A) no primeiro (safra 2006/2007), (B) terceiro (safra 2008/2009), (C) arto (safra 2009/2010), (D) sétimo (safra 2012/2013) e (E) oitavo ano (safra 2013/2014), em Nova Xavantina-MT.

Os autores, anteriormente citados, atribuem o fato à deficiência induzida de nutrientes pelo aumento de pH ou sensibilidade de algumas plantas ao pH elevado. É possível que o biochar vegetal atinja um nível máximo de dose para a produtividade da

soja por outros motivos, por exemplo, a capacidade genética do cultivar. Adicionalmente, Petter et al. (2012) verificaram comportamento semelhante da aplicação de biochar em arroz de terras altas, em que o modelo da equação que melhor se ajustou apresentou comportamento quadrático.

Assim como verificado na análise de componentes principais, ao analisar o efeito isolado do biochar sobre a produtividade através da análise de regressão, verifica-se, que com o passar dos anos seu efeito direto é reduzido, o que pode ser atestado pelos coeficientes angulares das equações de regressão, em que os coeficientes com maior e menor contribuição para o aumento produtividade são reduzidos e aumentados, respectivamente (Figura 3.8). Esse aspecto resulta em baixo efeito na variação de produtividade no longo prazo, onde são plenamente perceptíveis nos sétimo e oitavo anos variações abaixo de 150 kg ha^{-1} .

As baixas produtividades observadas no terceiro ano (Figura 3.8) são em função de um longo período de estiagem nessa safra, que ocorreu no florescimento e no enchimento de grãos da cultura, aumentando o abortamento de flores e diminuindo o peso dos mesmos. A estiagem ocorreu após o máximo acúmulo de fitomassa seca (início do florescimento). Portanto, não se observou um decréscimo acentuado nesse parâmetro quando comparado aos primeiro, quarto, sétimo e oitavo anos. Segundo Taiz & Zeiger (2004), a partição de fotoassimilados segue padrões anatômicos e de desenvolvimento, seguindo uma relação fonte-dreno. No entanto, os drenos (grãos) foram reduzidos em função do abortamento de flores causado pela estiagem, e a matéria seca acumulada foi perdida na respiração ocasionada pelo aumento de temperatura (Figuras 3.1 e 3.2).

3.4 CONCLUSÕES

1. A análise de componentes principais se mostrou uma boa ferramenta para analisar conjuntamente os dados agronômicos da soja e de fertilidade do solo no longo prazo, em função da aplicação de biochar.
2. O desempenho agronômico das plantas e a produtividade são positivamente influenciados pelo biochar, principalmente nas doses maiores. Todavia o efeito é evidentemente reduzido no longo prazo.
3. O efeito do biochar adicionado ao solo para a produtividade da soja não pode ser explicado inteiramente com seu efeito apenas na fertilidade do solo.

3.5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1099-108, 2007.

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., (Ed.). **The Scientific Basis**. Cambridge University Press: Cambridge, 2001, 234 p.

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.

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.

CAETANO, J. O.; BENITES, V. M.; SILVA, G. P.; SILVA, I. R.; ASSIS, R. L.; CARGNELUTTI FILHO, A. Dinâmica da matéria orgânica de um neossolo Quartzarênico de cerrado convertido para Cultivo em sucessão de soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1245-1255, 2013.

CAMPOS, L.P.; LEITE, L.F.C.; MACIEL, G.A.; IWATA, B. F.; NÓBREGA, J.C.A. Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 1681-1689, 2011.

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-PR1 versão - jan/](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 Solo. 3. ed. 2013. 412 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de Solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. rev. atual. 2011. 353 p.

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.

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

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, v. 5, 1985, 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 andTechnology**, 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.

LIMA, L. B. **Efeito do biocarvão sobre a matéria orgânica de solos do bioma cerrado**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

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.; 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. (Ed.) **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1. 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, S. S.; SENESI, N.; WEBER, J. (Ed.) **The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection**. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland, 1997. p. 921-925.

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 Science and Technology**, Oxford, v. 41, n. 2, p. 400-405, 2007.

PACHECO, L. P.; PETTER, F. A. Benefits of Cover Crops in Soybean Plantation In: Brazilian Cerrados. In: Tzi Bun Ng (Ed.). **Soybean – Applications and Technology**, p. 67-94. 2011.

PACHECO, L.P.; LEANDRO, W.M.; MACHADO, P.O. de A.; ASSIS, R.L. de; COBUCCI, T.; MADARI, B.E.; PETTER, F.A. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 17-25, 2011.

PEREIRA, S. A.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA,

J. P. Análise de componentes principais dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob pastagem e mata. **Global Science and Technology**, v. 3, n. 2, p. 87-97, 2010.

PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador 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, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; CARNEIRO, M. A. C.; MARIMON JUNIOR, B. H.; CARVALHO, M. T. M.; PACHECO, L. P. Soil fertility and agronomic response of rice to biochar application in the Brazilian savannah. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 5, p. 699-706, 2012.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 7, p. 761-768, 2012.

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.

SILVA, N. R.; PADOVANI, C. R. Utilização de componentes principais em experimentação agrônômica. **Energia e Agricultura**, Campina Grande, v. 21, n. 4, p. 98-113, 2006.

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), 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 effects 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. **Fisiologia 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.

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.

WATANABE, R. A.; FONSECA, I. B.; CRESTE, J. E.; SEIFERT, A. L.; SANTIAGO, D. C.; CRESTE, J. E.; HARADA, A.; CUCOLOTTO, M. Produtividade da cultura da soja em

função da densidade populacional e da porcentagem de cátions (Ca, Mg e K) no complexo sortivo do solo. Semina: **Ciências Agrárias**, Recife, v. 26, n. 04, p. 477- 484. 2005.

4 COMPARTIMENTOS DE CARBONO EM SOLOS DE CERRADO SOB APLICAÇÃO DE BIOCHAR EM LONGO PRAZO

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho verificar o efeito em longo prazo da aplicação de biochar sobre os compartimentos de carbono em um Latossolo e em um Plintossolo de cerrado. Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos ao acaso composto pela combinação de dois níveis de adubação de base (0 e 200 para o experimento I e 0 e 300 kg ha⁻¹ da fórmula 00-20-20 de fertilizante NPK para o experimento II) e cinco doses de biochar (0; 2; 4; 8 e 16 Mg ha⁻¹) para o experimento I e quatro doses de biochar (0; 8; 16 e 32 Mg ha⁻¹) para o experimento II. Foram determinados os teores e estoques totais de carbono orgânico (COT) e nitrogênio (NT), carbono aromático do biochar, os teores de C nas frações ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HU), e, índice de humificação (IH). Houve aumento nos estoques de COT com a aplicação de biochar. Houve significativo aumento nos teores de carbono aromático com o aumento da aplicação de biochar, evidenciando que o método Walkley-Black não é eficaz para a determinação de COT em solos sob aplicação de biochar. Houve redução do C-AF e C-AH com a aplicação de biochar, sendo este efeito mais evidente na presença de NPK. O C-HU aumentou significativamente com o aumento das doses de biochar. Altas doses de biochar (>16 Mg ha⁻¹) proporcionam aumento no IH. Tanto no Latossolo quanto no Plintossolo, o biochar contribui para o aumento do C na fração mais estável da MOS que é a humina, o que é desejável do ponto de vista ambiental e de fertilidade.

Palavras-Chave: matéria orgânica do solo, frações húmicas, carvão vegetal.

ABSTRACT

COMPARTMENTS OF CARBON IN SOILS OF SAVANNA IN APPLICATION OF LONG TERM BIOCHAREM

The objective of this work was to verify the long-term effect of the application of biochar on carbon pools in a Oxisol and Plinthosol of savanna. The experiments were conducted in a randomized block design consisting of the combination of two levels of fertilizer application (0 and 200 for experiment I and 0 and 300 kg ha⁻¹ of 00-20-20 formula of fertilizer NPK for experiment II) and five doses of biochar (0, 2, 4, 8 and 16 Mg ha⁻¹) for the first experiment and four doses of biochar (0, 8, 16 and 32 Mg ha⁻¹) for the second experiment. The concentrations and total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN), aromatic carbon biochar, the C content in fulvic acid fraction (FA), humic acids (HA) and humin (HU), and index humification (IH). There was an increase in TOC stocks with the

application of biochar. A significant increase in the content of aromatic carbon with increasing biochar application, showing that Walkley-Black method is not effective for the determination of TOC in soils under application of biochar. There was a reduction in C-AF and AH-C with the application of biochar, more evident effect in the presence of NPK. The C-HU increased significantly with increasing doses of biochar. High doses of biochar ($>16 \text{ Mg ha}^{-1}$) provide increased IH. Both in Oxisol as the Plintossolo, biochar contributes to the increase in the C more stable SOM fraction that is humin, which is desirable from an environmental standpoint and fertility.

Key words: soil organic matter, humic fractions, charcoal.

4.1 INTRODUÇÃO

O avanço crescente da área cultivada com grãos tem proporcionado à região do cerrado uma posição de destaque no cenário nacional com grande potencial produtivo, contribuindo, na safra 2012/2013, com mais de 50% da produção total de soja do Brasil (CONAB, 2012). Alguns fatores têm colaborado para o avanço rápido da agricultura no cerrado, como a grande disponibilidade de terras, o predomínio de topografia favorável à agricultura mecanizada e à irrigação, o desenvolvimento de técnicas para a correção da acidez dos solos e variedades adaptadas (Queiroz, 2009). Apesar disso, o manejo inadequado dos solos tem ocasionado o aparecimento de processos degradativos como a erosão, perda de matéria orgânica, compactação e desestruturação do solo reduzindo o potencial produtivo dessas áreas (Carvalho et al., 2010).

A transformação de ecossistemas naturais em agrossistemas altera significativamente a dinâmica da matéria orgânica no solo (MOS) (Leite et al., 2007). Em regiões de clima tropical, estas modificações são ainda mais significativas, já que a decomposição da matéria orgânica é bastante acelerada, estimulada pelas altas temperaturas e umidades e por aspectos ligados ao manejo, como o revolvimento do solo e a redução da cobertura do solo (Santos et al., 2011).

Neste sentido, a adoção de manejo conservacionista do solo, visando retardar o tempo de decomposição da MOS, pela redução das operações de preparo e o aumento do aporte de resíduos, por meio da introdução de culturas de cobertura, especialmente leguminosas, é essencial para a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Azadi et al., 2011). Adicionalmente, outras estratégias podem ser recomendadas como, por exemplo, a aplicação de subprodutos da geração de energia, como o biochar (também conhecido como biomassa carbonizada, biocarvão e carvão), formado por meio de um processo de pirólise

no qual há combustão incompleta (em ambiente reduzido em oxigênio) da biomassa vegetal. Nesse procedimento há a formação de uma série de compostos genericamente denominados de carbono pirogênico (Madari et al., 2009).

A alta porosidade, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a capacidade de sorção do biochar proporcionam um habitat adequado para os microrganismos, promovendo a sua atividade no solo e afetando diferentes processos microbianos envolvidos na ciclagem de nutrientes e dinâmica da MOS (Liang et al., 2006; Jindo et al., 2012). Assim, sua utilização pode induzir mudanças na disponibilidade de nutrientes e na produção vegetal (Petter & Madari, 2012), de forma que pode afetar significativamente os compartimentos de carbono no solo (Kolb et al., 2009).

O carvão vegetal presente no solo pode influenciar a formação de substâncias húmicas (Roscoe et al., 2001), principalmente as frações mais estáveis como a humina. Essa influência pode estar relacionada ao fato da estrutura molecular do carvão ser muito semelhante à estrutura das frações húmicas mais recalcitrantes. Ambos os materiais apresentam estrutura formada por anéis aromáticos policondensados (Rumpeu et al., 2006).

Nesse sentido, objetivou-se com essa pesquisa avaliar o efeito do biochar associado ou não à adubação química sobre os estoques totais de C e N e de seus compartimentos em um Latossolo e um Plintossolo do Cerrado.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram realizados a campo no município de Nova Xavantina - MT, no bioma cerrado. A localização geodésica é 14° 35' 36" de latitude Sul e 52° 24' 04" de longitude Oeste e altitude de 310 m. A região em estudo encontra-se inserida na classificação climática global de Köppen como Aw, com duas estações bem definidas, sendo uma seca de maio a setembro e outra chuvosa de outubro a abril.

Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura Franco Argilo Arenosa (Experimento I) e Plintossolo Háptico, textura arenosa (Experimento II). Antes da implantação do experimento, determinaram-se as seguintes características químicas e físicas dos solos (0 cm a 20 cm) (Tabela 4.2), seguindo a metodologia de Embrapa (2011): A) Experimento I (Latosolo Vermelho-Amarelo): pH (H₂O): 5,6; P (método de Mehlich): 6,7 mg dm⁻³; K⁺: 61,5 mg dm⁻³; Ca²⁺: 1,4 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺: 0,4 cmol_c dm⁻³; Al³⁺: 0,13 cmol_c dm⁻³; H⁺+Al³⁺: 4,98 cmol_c dm⁻³; V%: 27%; CTC:

6,93 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; M.O.: 12,6 g kg^{-1} ; Fe: 75,0 mg dm^{-3} ; Mn: 49,0 mg dm^{-3} ; Zn: 45,0 mg dm^{-3} ; Cu: 1,7 mg dm^{-3} ; argila: 307 g kg^{-1} ; silte: 73 g kg^{-1} ; areia: 620 g kg^{-1} ; B) Experimento II (Plintossolo Háptico): 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 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Magnésio (Mg^{2+}): 0,67 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Alumínio (Al^{3+}): 0,15 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$): 2,35 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Saturação por bases (V%): 41%; Capacidade de troca catiônica (CTC): 4,05 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; 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} .

Os experimentos foram instalados em delineamento de blocos casualizados, composto pela combinação de dois níveis de adubação de base e doses de biochar, tendo o experimento I a aplicação de 0 kg ha^{-1} e 200 kg ha^{-1} da fórmula 00-20-20 de adubo NPK, representando na presença de NPK 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 40 kg ha^{-1} de K_2O aplicados ao solo, e cinco doses de biochar (0; 2; 4; 8 e 16 Mg ha^{-1}) distribuídas ao acaso, com quatro repetições. No experimento II foram aplicados 0 kg ha^{-1} e 300 kg ha^{-1} , de fertilizante NPK da fórmula 05-25-15 (15 kg ha^{-1} de N, 75 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 45 kg ha^{-1} de K_2O) e carvão vegetal em quatro doses (0, 8, 16 e 32 Mg ha^{-1}).

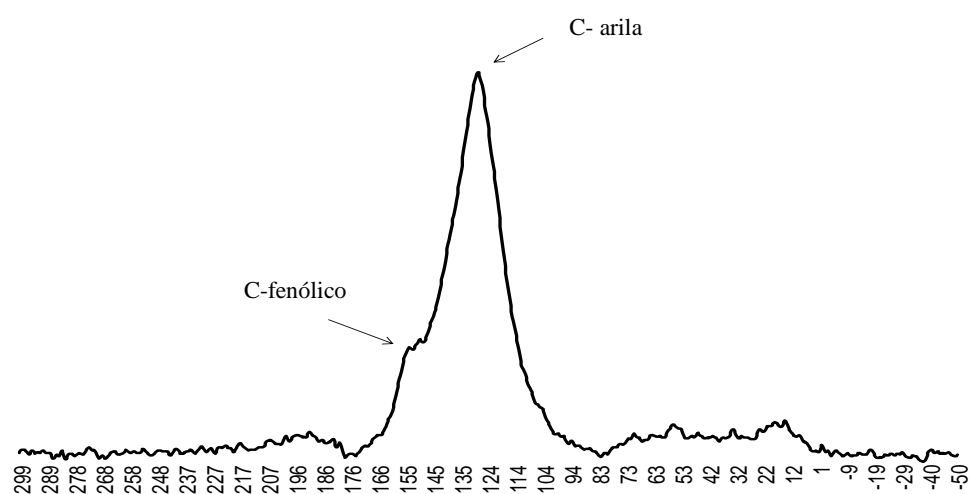
O biochar aplicado nos experimentos I e II foi originado de espécies do cerrado e de eucalipto, respectivamente. Em ambos os experimentos, o biochar foi moído na granulometria ≤ 2 mm visando aspecto semelhante fisicamente com o calcário. A composição química dos biochars utilizados estão descritos na Tabela 4.1.

As amostras do biochar foram submetidas à análise de Ressonância Magnética Nuclear do ^{13}C (RMN ^{13}C) a fim de verificar os grupos funcionais (Figuras 4.1 e 4.2). As amostras apresentaram uma baixa relação sinal: ruído. Praticamente não houve presença de estruturas alifáticas (alquilas em geral, $\sim 100\text{-}0$ 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 não tenha sido realizado VACP-TOSS-DD para verificar). Os espectros apresentaram um claro sinal de grupos O-aromáticos (C-arila, ~ 130 ppm), responsáveis pela estabilidade do material. Também há indicação de grupos fenólicos (~ 150 ppm) nos espectros, embora em proporção bem menor que os grupos arila, que podem ser responsáveis por alguma reatividade química do biochar vegetal.

Tabela 4.1. Composição elementar (valores totais) do biochar vegetal utilizado nos experimentos I e II.

Elementos		Exp. I	Exp. II
Nitrogênio Total (N)		6,6	3,3
Fósforo (P ₂ O ₅ ácido cítrico)		0,3	0,14
Fosforo (P ₂ O ₅ total)		1,0	n.a
K ₂ O	g kg ⁻¹	3,3	1,9
CaO		5,7	1,5
MgO		1,1	0,9
Enxofre (S)		0,4	n.a
Cobre (Cu)		7,0	1,0
Zinco (Zn)		13,0	36,0
Molibdênio (Mo)	mg kg ⁻¹	2,0	n.a
Cobalto (Co)		1,0	n.a
Boro (B)		5,0	n.a
Carbono total (C)		490,6	774,0
Umidade	g kg ⁻¹	50,0	50,0
Material mineral total		280,0	n.a
Relação C:N		74,3	234,5

*n.a: valores não analisados. Fonte: Petter (2010).

**Figura 4.1.** Espectro de ¹³C RMN (VACP-TOSS) de amostra do biochar utilizado no experimento I.

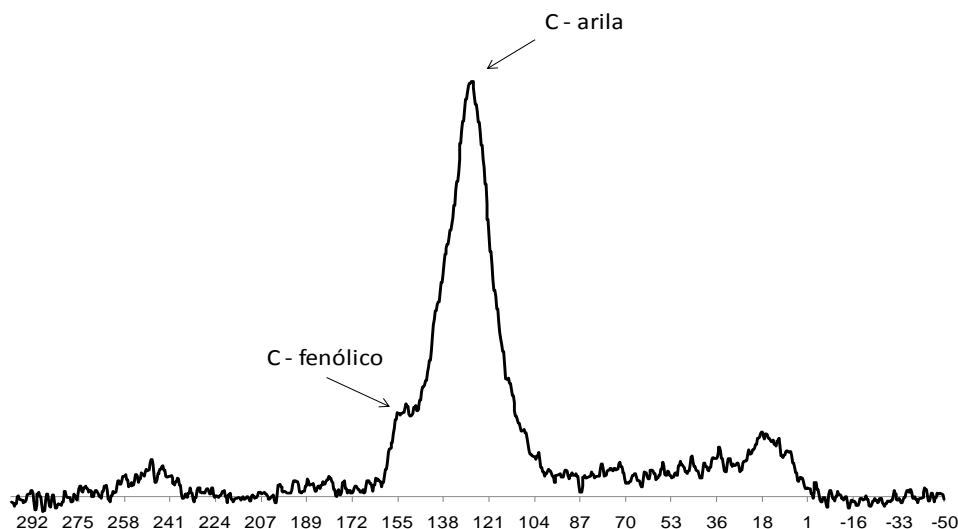


Figura 4.2. Espectro de ^{13}C RMN (VACP-TOSS) de amostra do biochar utilizado no experimento II.

Cada parcela experimental possui 10 m de comprimento por 4 m de largura, totalizando 40 m², sendo a área útil para as avaliações de 25 m², uma vez que as bordas foram desconsideradas. O biochar foi aplicado uma única vez em setembro de 2006 para o experimento I, e em novembro de 2008 no experimento II, de forma manual à lanço e incorporado por meio de enxada rotativa a uma profundidade de 0 cm a 15 cm.

As áreas de estudo estiveram sob vegetação nativa de cerrado até o ano de 1985. Após a remoção da floresta, iniciou-se o cultivo da soja no experimento I, sob sistema de semeadura direta, utilizando o milho como cultura de cobertura, até o ano de 2006, e, o cultivo de pastagem (*Brachiaria decumbens*) no experimento II.

Em ambos os experimentos, a semeadura da soja foi realizada em 5 de dezembro de 2012. Na ocasião da semeadura da soja, foram distribuídas 12 sementes por metro, com o espaçamento de 0,45 m entre linhas e profundidade de 2 cm a 3 cm. Nessa mesma operação, foi realizada a adubação de base. A cultivar de soja utilizada na semeadura foi a TMG 108 RR[®].

As avaliações para os presentes estudos foram realizadas no sétimo (Latossolo Vermelho-Amarelo) e quinto (Plintossolo Háplico) ano de implantação (safra 2012/2013). A amostragem de solo foi realizada em fevereiro de 2013, na época de pleno florescimento da soja, na profundidade de 0-10 cm. Em cada parcela, foram retiradas três amostras simples para formar uma amostra composta, com o uso de um trado, respeitando a área útil da parcela. Após as coletas, as amostras foram homogeneizadas, moídas e peneiradas

(0,177 mm).

Os teores de COT e NT foram determinados pelo método de Dumas (combustão seca em alta temperatura) (Sparks, 1996) utilizando um analisador elementar (Perkin Elmer Série II 2400 CHN/O), e os estoques calculados conforme a equação abaixo, utilizando os dados apresentados na Tabela 4.2:

$$EC = COT \times \rho \times p/10 \quad e \quad EN = NT \times \rho \times p/10 \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

EC/EM = estoque de carbono/nitrogênio (Mg ha^{-1});

COT = teor de carbono orgânico total (%);

NT = nitrogênio total (%);

ρ = densidade do solo (g cm^{-3});

p = profundidade do perfil (cm).

Tabela 4.2. Valores médios de densidade na profundidade de 0-10 cm dos solos utilizados nos experimentos.

Dose de biochar	Densidade do solo (g cm^{-3}) – Latossolo Vermelho-Amarelo	
	0 NPK	200 NPK
0	1,259	1,332
2	1,196	1,365
4	1,240	1,279
8	1,240	1,324
16	1,219	1,244
Doses de biochar	Densidade do solo (g cm^{-3}) – Plintossolo Háplico	
	0 NPK	200 NPK
0	1,33	1,32
8	1,28	1,36
16	1,27	1,28
32	1,26	1,28

Para o fracionamento químico da MOS utilizou-se a metodologia de Benites et al. (2003), que trata-se da metodologia adaptada à recomendada pela sociedade internacional de substâncias húmicas (IHSS). Primeiro, realizou-se a pesagem da amostra, contendo aproximadamente 30 mg de carbono orgânico total. Esse material foi transferido para um tubo de centrífuga, onde foram adicionados 20 mL de hidróxido de sódio (NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$). Após 24 horas em repouso, o material foi centrifugado a 5.000 g por

30 minutos. O sobrenadante foi cuidadosamente recolhido e armazenado. Após esse procedimento foram adicionados novamente 20 mL de NaOH, e após o repouso de uma hora, o material foi novamente centrifugado e o sobrenadante adicionado ao anterior.

O sobrenadante obtido das duas centrifugações, foi acidificado a pH 1,0 pela adição de gotas de H₂SO₄ a 20%. Passados 18 horas em repouso, o material precipitado (fração de ácidos húmicos - AH) foi filtrado e o sobrenadante remanescente (fração de ácidos fúlvicos - AF) foi também reservado. A fração de AH precipitado foi recuperada do filtro por meio de lavagem com uma solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹.

Para a quantificação do carbono nas frações AH e AF transferiu-se uma alíquota de 5 mL das soluções para tubos de digestão. Adicionou-se 5 mL de H₂SO₄ concentrado e 1 mL de K₂Cr₂O₇ 0,042 mol L⁻¹. As amostras foram aquecidas a 150°C por 30 minutos. Para evitar a volatilização de algum composto, foram utilizados nos tubos bolas de vidro para vedação.

Após o processo de aquecimento, o conteúdo do tubo foi transferido para fracos de Erlenmeyer de 125 mL (amostras + dois brancos aquecidos + dois brancos sem aquecimento) adicionou-se indicador de oxi-redução Ferroin (orto-fenatrolina monohidratada), e então, titulou-se com sulfato ferroso amoniacal hexahidratado Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O 0,0125 mol L⁻¹. O cálculo foi realizado segundo a fórmula:

$$X = (V_{\text{baq}} - V_{\text{am}})N_{\text{SFACorr}} \times 3 \times 50/\text{aliquota (mL)} \times 1/\text{peso da amostra (g)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

X - mg de C na forma de ácido fúlvico ou húmico por grama de solo;

V_{baq} - volume (mL) de SFA consumido na titulação do branco aquecido;

V_{baq} - volume (mL) de SFA consumido na titulação da amostra;

N_{SFACorr} - Normalidade do SFA corrigida pela equação:

$N_{\text{SFACorr}} = \text{volume de dicromato} \times \text{normalidade do dicromato} / \text{volume de SFA consumido na titulação do branco sem aquecimento}$

Para a determinação de carbono na fração humina o material restante da extração alcalina foi transferido quantitativamente dos tubos de centrífuga para os tubos de ensaio, nos quais, foram levados para secar em estufa a 65°C. Após a secagem completa foram adicionados 5 mL de K₂Cr₂O₇ 0,1667 mol L⁻¹ e 10 mL de H₂SO₄ concentrado. Os

tubos com as amostras e os brancos foram levados para o bloco digestor pré-aquecido a 150°C por trinta minutos. Foram utilizadas também para HUM, as bolas de gude para vedação dos tubos.

Como realizado nas outras frações, após o aquecimento, a solução foi transferida para tubos de Erlenmeyer. Adicionou-se indicador Ferroin e realizou-se a titulação com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,25 mol L⁻¹. O cálculo foi realizado segundo a fórmula:

$$X = (V_{\text{baq}} - V_{\text{am}})N_{\text{SFACorr}} \times 3 \times 1/\text{peso da amostra (g)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

X - mg de C na forma de humina por grama de solo;

V_{baq} - volume (mL) de SFA consumido na titulação do branco aquecido;

V_{am} - volume (mL) de SFA consumido na titulação da amostra;

N_{SFACorr} - Normalidade do SFA corrigida pela equação:

N_{SFACorr} = volume de dicromato x normalidade do dicromato / volume de SFA consumido na titulação do branco sem aquecimento

Ao final, com a obtenção dos resultados foi gerado um índice de humificação (IH), conforme foi proposto por Canellas & Santos (2005), calculado através da fórmula:

$$\text{IH} = (\text{FAH} + \text{FAF} + \text{FHUM})/\text{COT} \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo:

IH = índice de humificação;

FAH = fração ácido húmico (mg C g solo⁻¹);

FAF = fração ácido fúlvico (mg C g solo⁻¹);

FHUM = fração humina (mg C g solo⁻¹).

Os resultados foram analisados com o uso dos programas estatísticos Sisvar 5.1 (Ferreira, 2011) e SigmaPlot 10.0 (SPSS, 2001) utilizando-se de regressões múltiplas em que as variáveis independentes foram o fertilizante mineral (NPK) e o biochar vegetal e as variáveis dependentes foram os teores e estoques de COT e NT, carbono nas frações AF, AH e HU e IH. Os dados qualitativos (0 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ de NPK) foram submetidos à análise de variância, sendo as médias das variáveis significativas comparadas pelo teste

Tukey ($p < 0,05$) utilizando o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2011). Para os fatores quantitativos (doses de biochar) realizou-se análise de regressão associando os coeficientes de correlação ($p < 0,05$) e determinação a cada modelo, utilizando o software SigmaPlot.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de carbono orgânico total (COT) no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e no Plintossolo Háptico (FX) foram influenciados ($p < 0,05$) pela aplicação de biochar, com comportamento semelhante na ausência e presença de adubação de base NPK (Figuras 4.3 e 4.4). Esses dados corroboram com os obtidos por Novak et al. (2009) e Petter et al. (2012), que verificaram aumento significativo nos teores de COT com a aplicação de 30 Mg ha⁻¹ a 40 Mg ha⁻¹ de biochar. Adicionalmente, Lehmann et al. (2006) também observaram acréscimo nos níveis de COT com a aplicação de biochar, sendo que seus valores foram aproximadamente cinco vezes maiores que na testemunha.

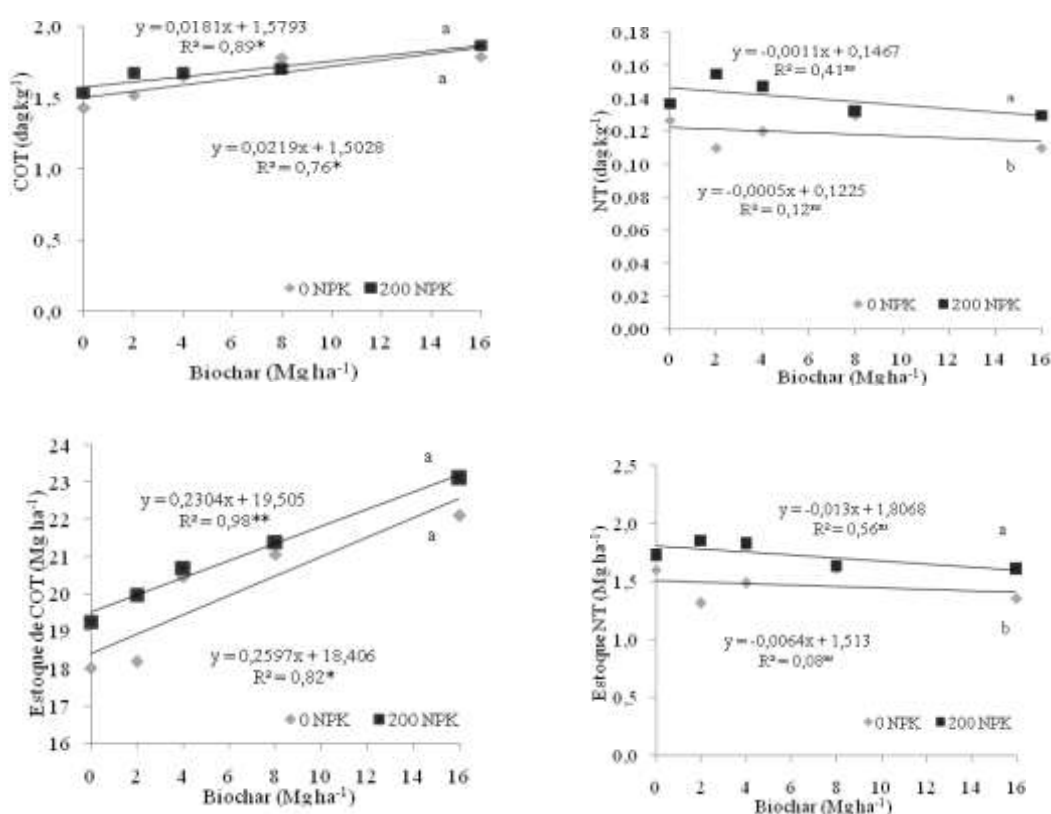


Figura 4.3. Teores e estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo em função de doses de biochar com adubação NPK 0 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹, em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. ^{ns} não significativo.

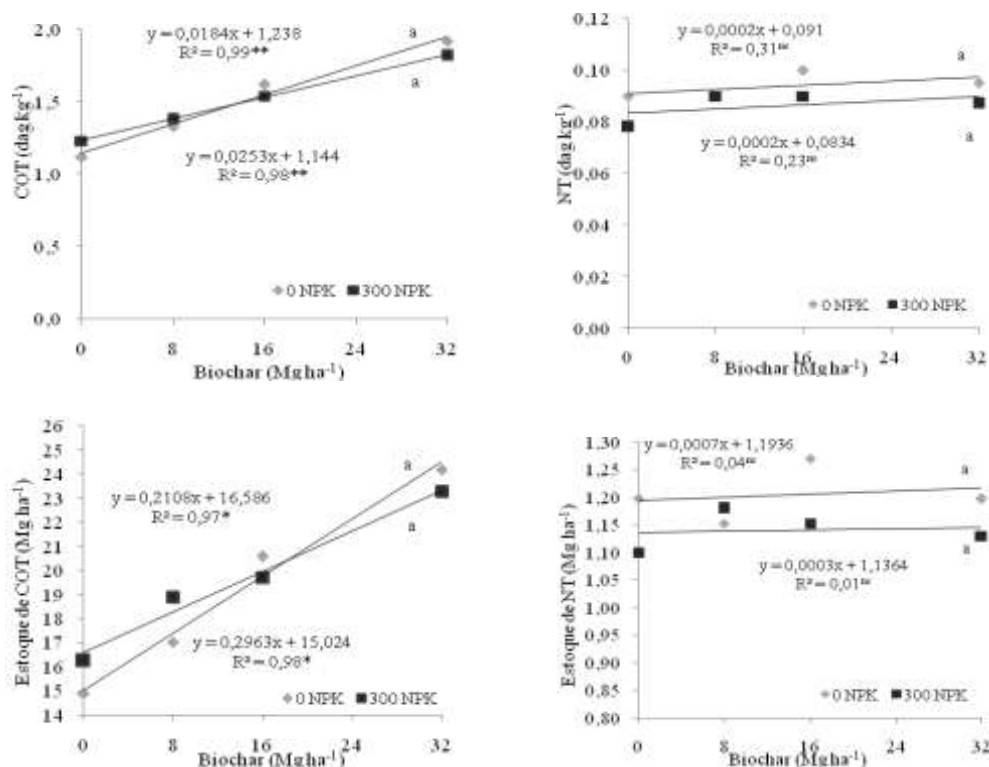


Figura 4.4. Teores e estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-10 cm em um Plintossolo Háplico em função de doses de biochar com adubação NPK 0 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹, em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. ^{ns} não significativo.

A adição de biochar também alterou significativamente os estoques de carbono orgânico total (COT) no LVA e FX, enquanto que não houve efeito da adubação de base NPK (Figuras 4.3 e 4.4). A equação se ajustou de maneira linear, evidenciando o aumento nos estoques de COT com o aumento nas doses de biochar, sendo esse efeito mais evidente comparado ao teor, o que pode ser claramente verificado pelo maior coeficiente angular das equações. O aumento nos estoques de COT no LVA e FX foram de 4 Mg ha⁻¹ e 7 Mg ha⁻¹ para as doses de 16 Mg ha⁻¹ e 32 Mg ha⁻¹ de biochar, respectivamente. Estes resultados corroboram aos reportados por Petter et al. (2012), que verificaram aumento linear e significativo dos estoques de COT quando da aplicação de doses de biochar em solos de cerrado. Assim como no presente estudo, esses autores também não observaram interação significativa entre os fatores doses de biochar e adubação de base.

A presença de estruturas aromáticas e a alta relação C:N do biochar foram determinantes para que ocorressem essas diferenças significativas. A estabilidade do biochar tem grande influência sobre os estoques de COT, uma vez que a decomposição

desse material é mais lenta, e a sua presença juntamente com o aporte anual de resíduos vegetais ao solo contribuiu de forma significativa para o aumento dos estoques de COT.

Proporcionalmente à dose de biochar aplicada, verifica-se que o aumento nos estoques de COT foram mais evidentes no LVA comparado ao FX. Isso se deve ao fato do biochar ter sido incorporado a uma profundidade de 0-15 cm, e também à maior movimentação descendente desse material no FX que é mais arenoso. Esse efeito também foi verificado por Petter et al. (2012) em solo arenoso já no segundo ano após a aplicação do biochar. Outro aspecto que contribui para esse movimento descendente é o tamanho das partículas que foram aplicadas, ou seja, menores que 2 mm, favorecendo, assim, esse movimento em solos arenosos e com maior quantidade de macroporos.

Os teores e estoques de nitrogênio total (NT) não foram influenciados ($p > 0,05$) pela aplicação de biochar independente do tipo de solo (LVA e FX) (Figuras 5.3 e 5.4). Os teores e estoques de NT foram influenciados apenas pela adubação química (200 kg ha^{-1}) e somente no LVA. Na presença de adubação, os estoques de NT foram 15% superiores aos tratamentos na ausência de adubação.

O maior acúmulo de NT na presença de NPK é atribuída ao maior aporte de resíduos orgânicos acumulados em safras anteriores (Tabela 4.3), decorrente da adubação realizada, sendo atribuída principalmente ao fósforo e ao potássio, uma vez que a formulação utilizada não continha N.

Tabela 4.3. Acúmulo médio de fitomassa seca da soja após a aplicação de biochar ao solo na presença e ausência de adubação NPK, em um Latossolo Vermelho-Amarelo em Nova Xavantina-MT.

NPK (kg ha^{-1})	Acúmulo de fitomassa seca (kg ha^{-1})						
	Safras agrícolas*						
	06/07	08/09	09/10	10/11	11/12	12/13	Total
0	1.620	3.160	6.640	9.610	12.430	14.480	14.480 B
200	1.720	3.380	7.980	12.080	16.310	19.560	19.560 A

*Não houve coleta na safra 07/08. Letras diferentes na coluna diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Dessa forma, o aumento do aporte de resíduos orgânicos, principalmente resíduos da cultura da soja, que apresenta baixa relação C:N proporcionaram o aumento do NT. Isso se torna mais evidente à medida que a atividade da urease é aumentada com a maior

disponibilidade de N orgânico de fácil decomposição (Saiya-Cork et al., 2002). No entanto, a ausência de efeito no Plintossolo Háplico pode estar relacionada à maior lixiviação de N-NO_3 em função do maior teor de areia e macroporosidade, como verificado por Shenbagavalli e Mahimairaja (2012).

Um aspecto importante a ser considerado na determinação de COT em solos sob aplicação de biochar é a metodologia de análise do carbono orgânico no solo. A determinação do COT pelo método Walkley-Black não detecta o efeito da aplicação de biochar, enquanto que a determinação pelo método de Dumas (CHN) evidencia claramente o efeito crescente de doses de biochar nos teores e estoques de COT (Figura 4.5A e B). Isso se deve ao fato de que a determinação do COT via Walkley-Black não consegue oxidar o C-aromático do biochar. O método de Dumas (CHN), o processo de análise converte todo o material orgânico em CO_2 , possibilitando a determinação de todo C-aromático do biochar e das substâncias húmicas, que são altamente estáveis. De acordo com Nelson e Sommers (1982) e Souza et al. (2003) os processos de oxidação com dicromato não extraem as frações orgânicas resistentes como carvões e parte da humina. Assim, neste estudo pode-se atribuir a diferença nos teores de COT determinados pelo método Walkley-Black e Dumas (CHN) (Figura 4.5A e B) como sendo o C-aromático ou C-pirogênico do biochar, uma vez que, nos solos analisados não continham carbono inorgânico proveniente, por exemplo da aplicação de calcário.

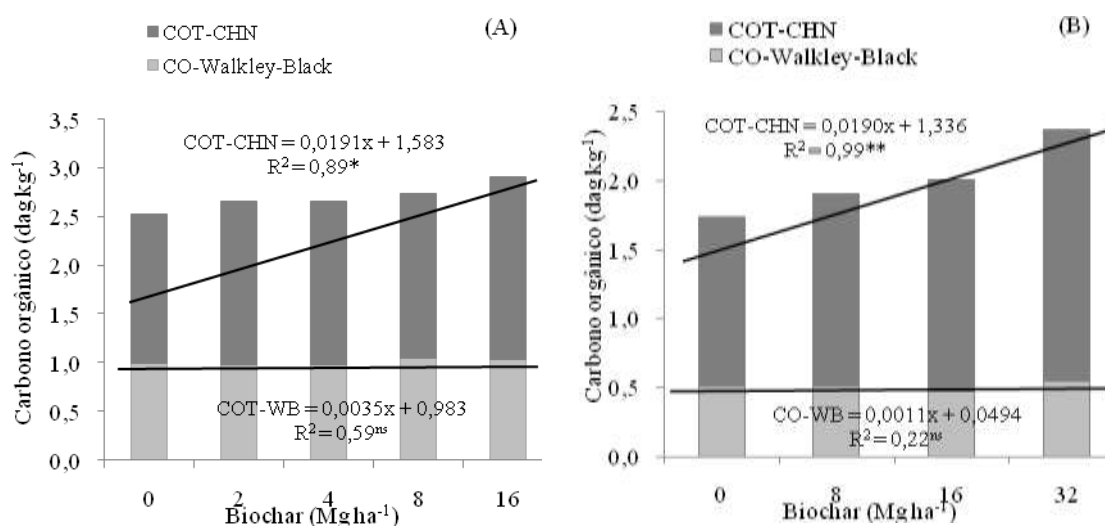


Figura 4.5. Carbono orgânico total pelo método Walkley-Black (COT-WB) e CHN (Dumas) (COT-CHN) na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e em um Plintossolo Háplico (B).

Com exceção do tratamento de biochar na ausência de NPK no FX, a aplicação

de biochar influenciou ($p < 0,05$) os teores de carbono na fração ácido fúlvico (C-AF) nos tratamentos com a presença de adubação NPK no LVA e FX (Figura 4.6 A e B). A redução média nos teores de C nessa fração com a aplicação de 16 Mg ha⁻¹ e 32 Mg ha⁻¹ de biochar foi, aproximadamente, 15% e 36% inferior à da testemunha no LVA e FX, respectivamente. Os teores de C-AF foram superiores na presença de adubação NPK no LVA, o que pode ser atribuído ao maior aporte de biomassa vegetal proporcionado nos tratamentos com adubação, que foi 35% superior ao tratamento sem adubação. Estes resultados corroboram aqueles observados por Pulrolnik et al. (2009), que também verificaram aumento nos teores de C-AF decorrente da deposição de resíduos vegetais.

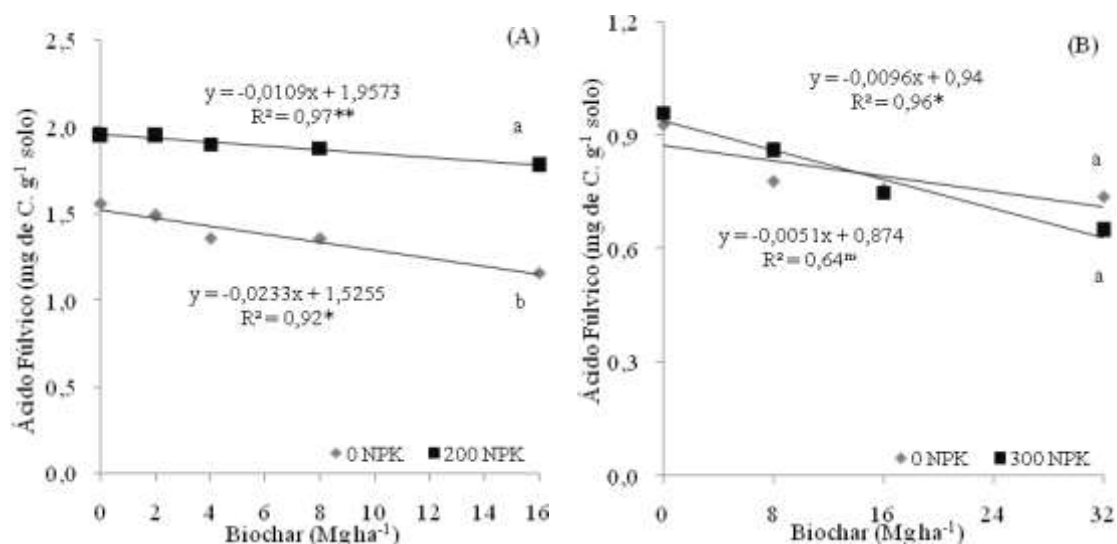


Figura 4.6. Teor de ácido fúlvico na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e de um Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ e 0 kg ha⁻¹ e 300 kg ha⁻¹, em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. ^{ns} não significativo.

No entanto, o efeito negativo da aplicação de biochar nos teores de C-AF pode estar relacionado à maior atividade microbiana decorrente de sítios estruturais (porosidade) que proporcionam microhabitat para a biota do solo, que, segundo Jindo et al. (2012) protegeria enzimas contra a ação de outros compostos naturalmente presentes no solo, mantendo e aumentando a atividade das mesmas por maior período de tempo. Adicionalmente, Petter et al. (2014) também verificaram maior atividade enzimática

(urease, β -glucosidas e FDA) em solos sob aplicação de biochar. Outro aspecto importante a ser considerado, e verificado por Carvalho et al. (2014), é a capacidade de retenção de umidade do solo com a aplicação do biochar, que, segundo esses autores, se deve à elevada porosidade desse material. Portanto, é evidente a contribuição da porosidade do biochar como microhabitat em condições ambientais adequadas à maior atividade microbiana. Assim, sendo a fração AF de maior labilidade e menor recalcitrância (Madari et al., 2009), o efeito de uma maior atividade microbiana resultaria em maior perda de carbono nessa fração, fato este verificado no presente experimento.

Os teores de carbono na fração ácido húmico (AH) não foram influenciados pela adição do biochar ao solo na ausência de adubação química (Figura 4.7 A e B). Esse efeito foi verificado apenas na presença de adubação, onde há redução nos teores de C-AH com a aplicação crescente de doses de biochar. A explicação pode estar no fato de que o fertilizante mineral proporciona maior atividade microbiana e, conseqüentemente, a utilização de carbono pelos microrganismos como fonte de energia.

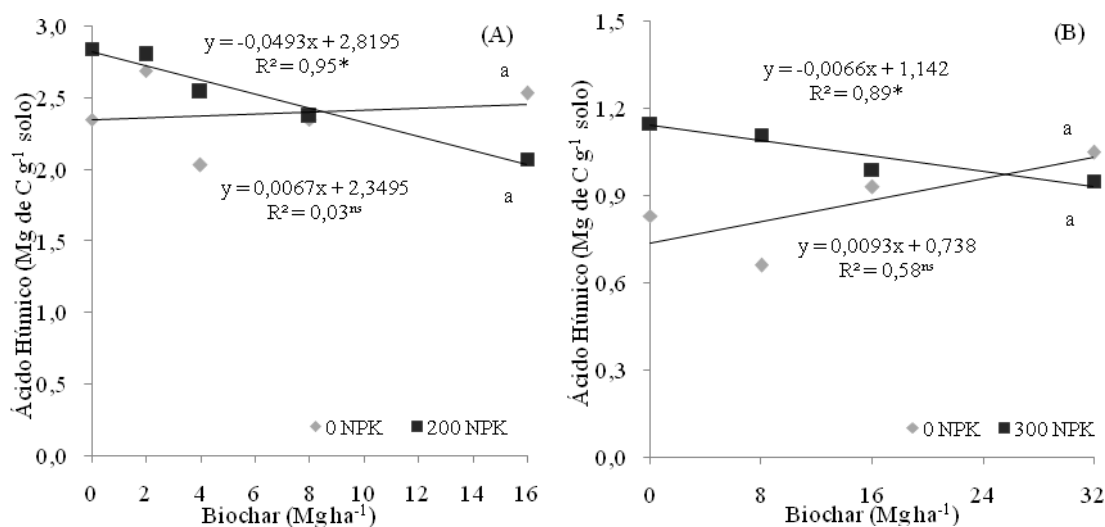


Figura 4.7. Teor de ácido húmico na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e em um Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ e 0 kg ha⁻¹ e 300 kg ha⁻¹, em Nova Xavantina - MT, 2013. * significativo a 5% de probabilidade respectivamente, pelo teste F. ^{ns} não significativo.

Outra explicação pode estar associada à menor acidez potencial (H+Al) e aos maiores valores de pH proporcionada pela mistura de biochar e fertilizante, e assim, sendo

a fração AH pertencente à fração solúvel das substâncias húmicas (SH), em meio básico, pode ocorrer a solubilização dessa fração e, conseqüentemente, percolação para camadas abaixo de 10 cm. Importante destacar, que os valores de H+Al e pH foram de 4,1 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e 6,3, o que representa uma redução de 20% e 19%, respectivamente, comparado à testemunha. Esse fato se reforça à medida que na ausência de NPK, mesmo não sendo significativo, o efeito é totalmente ao contrário, onde os teores de C-AH tendem a crescer com a aplicação de biochar.

Este fato reforça também os dados reportados anteriormente para ácido fúlvico, em que se verificou efeito contrário, ou seja, na ausência de adubação (meio ácido) os teores de C-AF foram menores. Importante destacar, que há sete anos não havia aplicação de adubação nesses tratamentos, e que, a adubação de base não contemplou fertilizante nitrogenado, sendo que este contribui significativamente para a acidez do solo. De maneira geral, os valores de C-AH foram maiores, comparados ao C-AF, com valores aproximadamente 49% e 20% do COT para LVA e FX, respectivamente. De acordo com Cunha et al. (2007), a predominância do AH sobre o AF pode ser o resultado de intensa humificação e rápida mineralização de grandes quantidades de material orgânico rico em N, P e Ca incorporado ao solo. Resultados semelhantes foram verificados por Shenbagavalli & Mahimairaja (2012), com aplicações crescentes de biochar. A predominância das frações mais estáveis (AH e HU), com menor contribuição das frações mais solúveis e móveis (AF) também foi verificada por Lima et al. (2011), avaliando a composição das substâncias húmicas de solos antropogênicos da Amazônia (Terras Pretas de Índio). Esses resultados podem perfeitamente ser comparados aos do presente estudo, pois os solos com horizonte A antrópico (Terras Pretas de Índio) apresentam elevadas quantidades de carbono pirogênico.

Na fração humina (HU) os teores de carbono foram influenciados de forma significativa pela adição de biochar (Figura 4.8 A e B). A presença de estruturas aromáticas policondensadas e a alta relação C:N do biochar foram determinantes para que ocorressem essas diferenças significativas. Alguns estudos têm destacado o efeito do biochar na formação de substâncias húmicas. Para Roscoe et al. (2001), a contribuição do biochar na dinâmica do carbono do solo se deve a recalcitrância do carvão vegetal. Já, Schmidt et al. (1999), Skjemstad et al. (2002) e Rumpeu et al. (2006) atribuem esse efeito a elevada aromaticidade do biochar.

Importante destacar que a estrutura molecular do biochar assemelha-se a da

humina, como verificado por Haumaier & Zech (1995) através de análise de espectros de RMN ^{13}C de ácidos húmicos de diferentes solos, e também de diferentes origens de carvão vegetal. A semelhança na composição das substâncias húmicas com o biochar também foi verificada recentemente por Lima (2012), que observou alta similaridade entre os espectros de RMN ^{13}C das frações AF, AH e Humina comparada aos espectros de biochar, e, segundo esse autor, o biochar afetou diretamente a composição da fração humina.

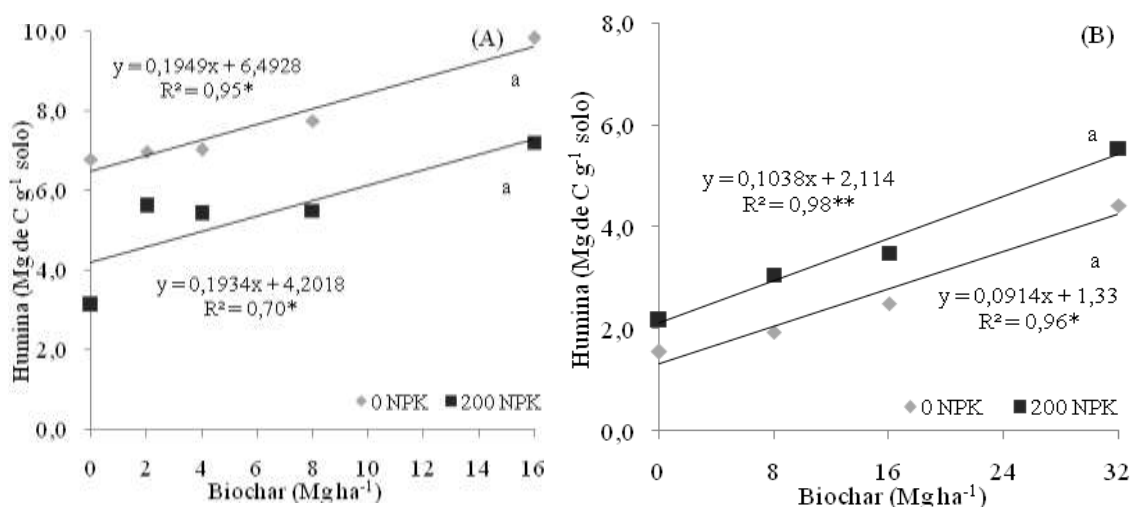


Figura 4.8. Teor de humina na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e em um Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ e 0 kg ha⁻¹ e 300 kg ha⁻¹, em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Verifica-se que os valores de C-HU são mais elevados do que o C das frações AF e AH. Esses resultados, corroboram com os obtidos por Campos et al. (2011), que também verificaram maiores valores de carbono na fração humina comparados às frações AF e AH em solos com presença de carbono pirogênico.

Os maiores valores de C-HU podem estar relacionados à natureza molecular, à recalcitrância do material que compões esta fração, à hidrofobicidade e à elevada associação molecular com a fração mineral do solo, como reportado por Schiavo et al. (2007). Segundo Fontana et al. (2006), as frações AF e AH apresentam menor estabilidade, podendo ser polimerizadas e mais facilmente mineralizadas, comparado à fração humina. Esse efeito de maior acúmulo de C-HU se torna mais evidente ainda com a presença de

biochar vegetal, uma vez que, como reportado anteriormente, se trata de um material orgânico com estruturas aromáticas altamente estáveis e de lenta decomposição.

O índice de humificação (IH) foi significativamente influenciado pela aplicação de biochar tanto no LVA quanto no FX (Figura 4.9). Os dados se ajustaram ao modelo quadrático, evidenciando um decréscimo no IH nas doses intermediárias de biochar. Esse efeito do biochar reflete o aumento linear de COT (Figuras 4.3 e 4.4), enquanto que o mesmo não acontece para as frações AF e AH, que decresce com o aumento de doses de biochar (Figuras 4.6 e 4.7). Como o índice de humificação é a razão entre os valores de AF, AH e HU pelos teores de COT, o aumento linear de COT não acompanhado na mesma proporção da fração AF e AH leva à redução no IH.

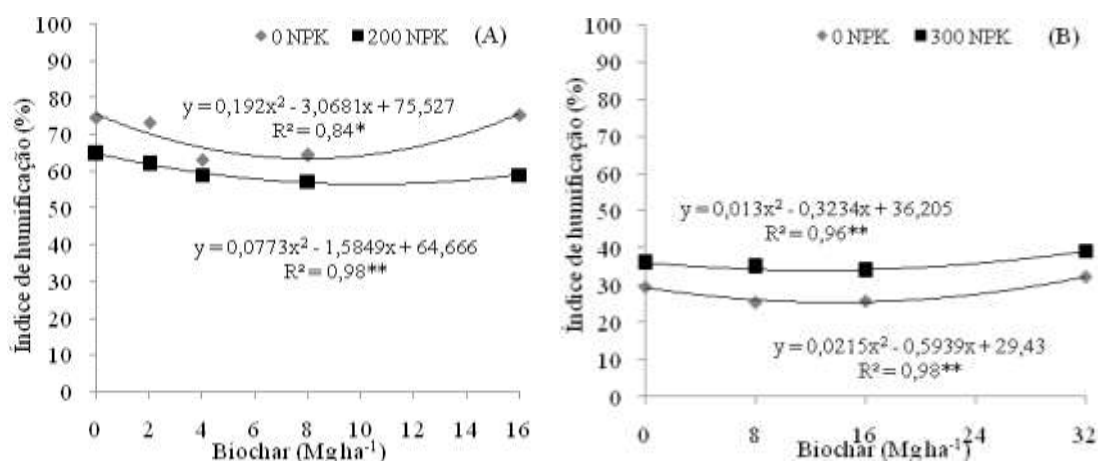


Figura 4.9. Índice de humificação na profundidade de 0-10 cm em um Latossolo Vermelho-Amarelo (A) e em um Plintossolo Háplico (B) em função de doses de biochar com adubação NPK 0 kg ha⁻¹ e 200 Kg ha⁻¹ e 0 kg ha⁻¹ e 300 Kg ha⁻¹, em Nova Xavantina - MT, 2013. ** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente, pelo teste F.

Ademais ressalta-se, que o biochar influenciou de forma mais pronunciada o C-HU nas doses máximas, com valores 30% e 66% superiores às doses intermediárias no LVA e FX, respectivamente, refletindo assim o aumento do IH nas doses máximas. Esses resultados demonstram claramente que a aplicação de biochar proporciona material orgânico com maior grau de humificação, que é consequência da estabilidade das estruturas moleculares do biochar.

Nesse sentido a fertilidade dos solos depende da quantidade e da qualidade da matéria orgânica e é provável que as alterações causadas nas substâncias húmicas em

função do manejo do solo influenciam consideravelmente a fertilidade (Canellas et al., 2002; Yagi et al., 2003). Ainda, pode-se considerar que a determinação da dinâmica do carbono nas frações das substâncias húmicas constitui uma importante ferramenta na avaliação dos sistemas de manejo em solos tropicais.

4.4 CONCLUSÕES

1. O biochar proporcionou aumento nos teores e estoques totais de carbono orgânico no solo em longo prazo.
2. O biochar não alterou os teores e estoques totais de nitrogênio no solo em longo prazo.
3. O biochar alterou a dinâmica do carbono nas frações da matéria orgânica do solo, proporcionando aumento dos teores na fração humina e, conseqüentemente, maior estabilidade da matéria orgânica em longo prazo.

4.5 REFERÊNCIAS

- AZADI, H.; SCHOONBEK, S.; MAHMOUDI, H.; DERUDDER, B.; MAEYER, P. Organic agriculture and sustainable food production system: Main potentials. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. Elsevier, v. 144, n. 7, p. 92-94, 2011.
- BENITES, V. M.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Comunicado Técnico 16, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, p. 1-7, 2003.
- CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Viçosa, v. 70, n. 3, p. 598-609, 2011.
- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; RUNJANEK, V. M.; GURIDI, F.; OLIVARES, F. L.; SANTOS, G. A.; BRAZFILHO, R. Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of an Ultisol under cultivation of eucalyptus and sugar cane. **Revista Terra Latinoamericana**, Chapingo, v. 20, n. 2, p. 371-381, 2002.
- CANELLAS, L. P. ; SANTOS, G. A. **Humosfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas**. Campos dos Goytacazes, 2005. 309 p .
- CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 277-289, 2010.

CARVALHO, M. T. de M.; MAIA, A. H. N.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; OORT, P. A. J. V.; HEINEMANN, A. B.; SILVA, M. A. S.; PETTER, F. A.; MEINKE, H. Biochar increases plant available water in a sandy soil under an aerobic Rice cropping system. **Solid Earth Discuss.** Munique, v. 6, n. 5, p. 887–917, 2014.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **12º levantamento da produção de grãos: safra 2011/12.** Brasília: CONAB, 2012. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 set. 2012.

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.** Amazonas, v. 37, n. 1, p. 91-98, 2007.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solos.** 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia,** Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J. C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 41, n. 5, p. 847-853, 2006.

HAUMAIER, L. & ZECH, W. Black carbon – possible source of highly aromatic components os soil humic acids. **Orgnic Geochemistry,** Liverpool, Elsevier, Now York, v. 23, n. 3, p. 191-196, 1995.

JINDO K, SÁNCHEZ-MONEDERO MA, HERNÁNDEZ T, GARCÍA C, FURUKAWA T, MATSUMOTO K. Biochar influences microbial community structure during manure composting with agricultural wastes. **Science Total Environmental,** Barcelona, v. 81, n. 3, p. 416-476, 2012.

KOLB, S. E.; FERMANICH, K. J.; DORNBUSH, M. E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils. **Soil Science Society of America.** Mandisson, v. 73, n. 4, p. 1173-1181, 2009.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – a review. **Mitig Adapt Strat Global Change,** Columbia, v. 11, p. 403–427, 2006.

LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S. & MACHADO, P.L.O.A. Influence of organic and mineral fertilization on organic matter fractions of a Brazilian Acrisol under maize/common bean intercrop. **Australian Journal Soil Research,** Western, v. 45, n. 1, p. 25-32, 2007.

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.

LIMA, S. S.; LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. C.; COSTA, D. B. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 51-60, 2011.

LIMA, L. B. **Efeito do biocarvão sobre a matéria orgânica de solos do bioma cerrado**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

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**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L., (Ed.). **Methods of soil analysis**. Chemical and mineralogical properties. 2.ed. Madison, ASA/SSSA 1982. p. 539-579.

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.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 16, n. 7, p.761–768, 2012.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; CARNEIRO, M. A. C.; MARIMON JUNIOR, B. H.; CARVALHO, M. T. M.; PACHECO, L. P. Soil fertility and agronomic response of rice to biochar application in the Brazilian savannah. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 699-706, 2012.

PETTER, F.A.; LEITE, L.F.C.; MACHADO, D.M.; MADARI, B.E.; MARIMON JUNIOR, B.H.; LIMA, L.B. Dynamics of organic matter and enzymatic activity in Latosol with application of biochar in the brazilian cerrado. **Biology and Fertility of Soils**, Firenze, 2014. Prelo

PULROLNIK, K.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F. & BRANDANI, C.B. Estoques de carbono e N em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1125-1136, 2009.

QUEIROZ, F. A. Impactos da sojicultura de exportação sobre a biodiversidade do Cerrado. **Sociedade e Natureza**. Uberlândia, v. 21, n. 2, 2009.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J.; VASCONCELLOS, C. A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic

ratio in a Cerrado's oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 104, n. 4, p. 15-202, 2001.

RUMPEL, C.; ALEXIS, M.; CHABBI, A.; CHAPLOT, V.; RASSE, D. P. VALENTIN, C.; MARIOTTI, A. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture. **Geoderma**, Amsterdam, v. 10, n. 6, p. 35-46, 2006.

SAIYA-CORK, K. R.; SINSABAUGH, R. L.; ZAK, D. R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 3, p. 1309–1315, 2002.

SANTOS, B. C.; RANGEL, L. A.; JÚNIOR, E. C. Estoque de Matéria Orgânica na Superfície do Solo em Fragmentos Florestais de Mata Atlântica APA de Petrópolis-RJ. **Floresta e Ambiente**. Niterói, v. 18, n. 3, p. 266-274, 2011.

SCHIAVO, J. A.; CANELLAS, L. P.; MARTINS, M. A.; MATOS, C. R. R. Revegetação de cava de extração de argila com *Acacia mangium*. II – Caracterização química da humina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 31, n. 7, p. 1163-1171, 2007.

SCHMIDT, M. W. I.; SKJEMSTAD, J. O.; GERHT, E.; KÖGEL-KNABER, I. Charred organic carbon in German Chernozemic soil. **European Journal of Soil Science**, Dordrecht, v. 50, n. 4, p. 351-363, 1999.

SHENBAGAVALLI, S; MAHIMAIRAJA, S. Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil. **International Journal of Advanced Biological Research**, v. 2, n. 2, p. 249-255, Londres, 2012.

SKJEMSTAD, J. O.; REICOSKY, D. C.; WILTS, A. R.; MCGOWAN, J. A. Charcoal carbon in U. S. agricultural soils. **Soil Science Society of American Journal**, Mandisson, v. 66, n. 3, p. 1249-1255, 2002.

SOUZA, W.J.O.; MELO, W.J. Matéria orgânica em um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p.1113-1122, 2003.

SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A. **Methods of soil analysis**. Madinson: SSSA Book Series, 1996. p. 976-977.

SPSS- **Sigma Plot 2002**, for Windows version 10.0, SPSS Inc., Chicago, 2001.

YAGI, R.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; BARBOSA, J.C. Organic matter fractions and soil fertility under the influence of liming, vermicompost and cattle manure. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 549-557, 2003.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos mostraram o efeito positivo do biochar na produtividade da cultura da soja e na fertilidade do solo. Observou-se um declínio nos efeitos diretos que o biochar proporciona, com o passar dos anos, porém, o efeito de condicionador, potencializando o fertilizante mineral, ficou caracterizado nas observações verificadas. Constatou-se que a avaliação da fertilidade e da produtividade da cultura não são suficientes para explicar os efeitos no biochar no solo. A utilização da ferramenta de análise multivariada, proporcionou uma boa visualização dos efeitos conjuntos de fertilidade e respostas fisiológicas em relação à aplicação de doses crescentes de biochar.

Os teores de carbono orgânico total foram influenciados positivamente com a aplicação de biochar, não havendo influência das doses de adubo mineral (NPK). Com o aumento das doses de biochar constatou-se um aumento no estoque de carbono, de forma mais evidente no Latossolo quando comparado com o Plintossolo.

No entanto, os estoques de nitrogênio no solo não foram influenciados pela aplicação de doses crescentes de biochar. Verificou-se um aumento nos teores de N em função da aplicação de adubo mineral, somente no Latossolo. Este efeito foi atribuído pela maior produção de biomassa, uma vez que o fertilizante utilizado nesse experimento não continha N em sua composição.

O método Walkley-Black, de quantificação da matéria orgânica do solo não é capaz de oxidar o carbono aromático contido nas estruturas do carvão vegetal e das frações mais humificadas do solo. Logo, é inviável a utilização dessa metodologia quando se pretende estimar a quantidade de carbono orgânico presente em solos com a presença desse material. A metodologia mais recomendada é aquela que converte todo o carbono orgânico em CO₂ por combustão, a exemplo do método de Dumas.

Houve influência do biochar na dinâmica do carbono nas frações húmicas do solo, proporcionando aumento dos teores na fração húmica e, conseqüentemente, maior estabilidade da matéria orgânica.