UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

EFEITO DO BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO SOB CONDIÇÕES DE INCUBAÇÃO

ALYSON SILVA DE ARAUJO

ALYSON SILVA DE ARAUJO

EFEITO DO BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO SOB CONDIÇÕES DE INCUBAÇÃO

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – UnB, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO

Brasília, DF
Junho de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAUJO, Alyson Silva

"EFEITO DO BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO SOB CONDIÇÕES DE INCUBAÇÃO". Orientação: Cícero Célio de Figueiredo, Brasília, 2015. 38 páginas.

Monografia de Graduação (G) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2015.

1. Carvão 2. Biossólido 3. Adubação nitrogenada 4. Pirólise

I. Figueiredo, C.C.de. II. Drº.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAUJO, A. S. Efeito do biochar de lodo de esgoto na redução das emissões de óxido nitroso do solo sob condições de incubação. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2015, 38 páginas. Monografia.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: ALYSON SILVA DE ARAUJO

Título da Monografia de Conclusão de Curso: Efeito do biochar de lodo de esgoto na redução das emissões de óxido nitroso do solo sob condições de incubação.

Grau: 3º **Ano:** 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

ALYSON SILVA DE ARAUJO

CPF: 030.249.801-05

QNO 04 Conj F casa 26

CEP: 72.250.406 Ceilândia, DF. Brasil

(61) 81879790/ email: alyson.sa92@hotmail.com

ALYSON SILVA DE ARAUJO

EFEITO DO BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO SOB CONDIÇÕES DE INCUBAÇÃO

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – UnB, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO

BANCA EXAMINADORA:

_____

Cícero Célio de Figueiredo
Doutor, Universidade de Brasília – UnB
Orientador / email: cicerocf@unb.br

_____

Arminda Moreira de Carvalho
Doutora, Embrapa Cerrados
Examinadora

_____

Juliana Hiromi Sato
MSc. Universidade de Brasília
Examinadora

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio Carlos e Zenaide Pereira, e a todos que contribuíram de alguma forma para minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos que têm colocado em minha vida.

Aos meus pais – Antonio Carlos e Zenaide Pereira, por todos os ensinamentos, apoio, dedicação e contribuições em todo meu processo estudantil.

A minha família por se manterem ao meu lado em todas as fases da minha vida, em momentos bons e ruins. Principalmente meu irmão Anderson Carlos que sempre esteve ao meu lado me motivando a lutar por todos meus sonhos.

A minha namorada Beatriz Alves, que nos últimos anos tem feito parte da minha vida, contribuindo efetivamente em minhas decisões, me ajudando nos momentos difíceis, me dando força e motivação para continuar lutando para alcançar todos os meus objetivos.

Agradeço ao professor Dr. Cícero Célio de Figueiredo, tanto por sua dedicação, comprometimento, seriedade e motivação em suas aulas ministradas, como também, por sua imensurável contribuição como orientador para o desenvolvimento desse trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica do Solo, em destaque à Juliana Hiromi, Helen Cristina, Túlio Moreira que participaram efetivamente na execução deste trabalho.

A toda equipe docente da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV e as amizades adquiridas dentro da Universidade de Brasília, que contribuíram de alguma maneira em minha formação acadêmica.

A toda equipe do Laboratório de Análises de N_2O por Cromatografia Gasosa da Embrapa Cerrados.

Muito Obrigado!

“Se a educação sozinha não pode transformar a sociedade, tampouco sem ela a sociedade muda”.

Paulo Freire

ARAUJO, ALYSON SILVA. **Efeito do biochar de lodo de esgoto na redução das emissões de óxido nitroso do solo sob condições de incubação.** 2015. Monografia (Bacharelado em Agronomia). Universidade de Brasília – UnB.

RESUMO

O aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, evidenciado nas últimas décadas, está relacionado com intensificação das atividades humanas, mudança do uso da terra e a queima de combustíveis fósseis. A agropecuária é uma das principais responsáveis pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa como metano e óxido nitroso. O uso de resíduos orgânicos pirolisados, conhecidos internacionalmente por biochar, é uma alternativa viável para melhoria das características físico-químicas e biológicas do solo e podem reduzir as emissões de gases de efeito de solos agrícolas. No caso específico do biochar de lodo de esgoto, obtido por diferentes temperaturas de pirólise, ainda há dúvidas sobre a sua atuação na redução da emissão de óxido nitroso do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do biochar de lodo de esgoto, obtido por diferentes temperaturas de pirólise (300, 400 e 500 ºC) na redução das emissões de óxido nitroso do solo. As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) localizado na Fazenda Água Limpa, Brasília, DF. O experimento, sob condições de incubação, foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por: 1) solo sem aplicação de biochar (BC) e de nitrogênio (controle); 2) Solo com aplicação de nitrogênio, sem biochar; 3) solo com aplicação de nitrogênio e biochar 300 ºC; 4) solo com aplicação de nitrogênio e biochar 400 ºC; e 5) solo com aplicação de nitrogênio e biochar 500 ºC. Foram aplicados 10 mg de N kg^{-1} de solo, correspondendo a uma dose de 200 kg ha^{-1} de N, na forma nitrato de potássio e, foram incorporados ao solo 5 g de biochar. As concentrações de N_2O liberados foram determinadas em cromatógrafo gasoso Trace GC Ultra. As maiores variações na concentração de N_2O foram observadas durante os primeiros 22 dias de incubação. Nos primeiros dias o BC300 apresentou liberações de N_2O superiores aos demais tratamentos, sendo ultrapassado posteriormente pelo tratamento que recebeu adubo nitrogenado sem a presença de biochar. O uso dos biochars BC400 e BC500 favoreceu a redução das emissões de N_2O durante todo o período de incubação. O efeito do biochar de lodo de esgoto é dependente da temperatura de pirólise. Os teores de NO_3^- e NH_4^+

foram as propriedades físicos-químicas que mais se relacionaram com emissões de N_2O do solo.

Palavras-chave: Carvão; Biossólido; Adubação nitrogenada; Pirólise.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Câmaras de incubação utilizadas no experimento (A). Válvula utilizada para coleta de gases (B). 24
Figura 2. Concentrações de N_2O oriundas de solo após aplicação de adubo nitrogenado e biochar de lodo de esgoto. * e *** indicam diferenças, entre tratamentos, significativas a P<0,05 e P<0,001, respectivamente. 28
Figura 3. N_2O acumulado oriundo do solo após 43 dias de incubação, após aplicação de adubo nitrogenado e biochar de lodo de esgoto. Letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos de acordo como teste de Tukey (p<0,05). 30
Figura 4. Diagrama de ordenação derivado da análise de componentes principais dos scores de N_2O acumulado e atributos químicos de biochar de lodo de esgoto pirolisado a 300 °C (BC300), 400 °C (BC400) e a 500 °C (BC500). 31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química e mineralógica do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA). 21
Tabela 2. Umidade, sólidos voláteis e cinzas do lodo de esgoto. 22
Tabela 3. Propriedades físico-químicas do biochar produzido sob diferentes temperaturas de pirólise. 23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
2.1. Lodo de esgoto: importância, produção e uso 15
2.2. Biochar de lodo de esgoto: produção e uso agroambiental 16
2.3. Biochar e redução das emissões de óxido nitroso 18
3. MATERIAL E MÉTODOS 21
3.1. Amostragem e caracterização do solo 21
3.2. Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto 21
3.3. Incubação e medição dos fluxos de N_2O 23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 26
5. CONCLUSÕES 32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 33

1. INTRODUÇÃO

O Distrito Federal possui um eficiente sistema de coleta e tratamento de lodo de esgoto (LE), cujo sistema de esgotamento opera com 5.169 km de redes e 17 estações de tratamento. Aproximadamente 400 toneladas de lodo são produzidas por dia nas estações de tratamento do Distrito Federal (CAESB, 2014). Um destino adequado para esse produto representa interesse de toda a sociedade.

Uma opção de uso do LE é sua incorporação no solo. Essa alternativa de uso promove ciclagem de nutrientes e adição de matéria orgânica em atividades agrícolas e florestais, além da recuperação de áreas degradadas, o que, segundo Quintana (2006), reduz a dependência e uso de adubação mineral, já que o LE favorece a melhoria de características físicas, químicas e biológicas do solo.

A maior limitação para o uso do LE é a presença de microrganismos patogênicos, este fato aliado à presença de metais tóxicos restringe o uso do LE a poucos destinos. O uso de altas doses de LE pode causar acúmulo de metais tóxicos nos solos, que ao ser absorvidos pelas plantas em quantidade suficiente afetam negativamente o seu desenvolvimento e/ou a saúde dos consumidores (Chang et al., 1997).

Diversas alternativas de processamento do lodo têm sido estudadas para viabilizar o uso desse produto sem riscos ao meio ambiente. Entre essas alternativas, o tratamento térmico representa interesse crescente de pesquisadores e gestores públicos. O biochar é um produto sólido, rico em carbono, obtido pelo aquecimento de biomassa sob condições controladas de oxigenação, em processo conhecido como pirólise (Sohi, 2012), onde tal procedimento também gera um produto líquido, o bio-óleo, e gases como H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_4 e C_2H_6 (Vieira, 2012). Diversas matérias primas podem ser utilizadas para a produção de biochar como madeiras utilizadas no aquecimento de fornos e resíduos agroindustriais. Esta diversidade de matéria-prima utilizada sob diferentes condições resulta em produtos (biochars) com propriedades variadas (Baldock; Smernik, 2002).

O lodo de esgoto também pode ser transformado em biochar. Este procedimento tem diversas vantagens como a eliminação de patógenos e componentes orgânicos perigosos (Caballero et al., 1997). Seu uso promove a melhoria da estrutura, além do aumento do sequestro de carbono no solo devido à elevada estabilidade desse material (Lehmann, 2007).

Resultados divulgados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) demonstram o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera desde 1750, tendo como possíveis causas a intensificação das atividades humanas, mudança do uso da terra e a queima de combustíveis fósseis. Os principais gases envolvidos no aquecimento global são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), e óxido nitroso (N_2O). Nesse contexto, a agropecuária é uma das principais responsáveis pelo aumento da concentração de metano e óxido nitroso (IPCC, 2014).

O óxido nitroso contribui significativamente para o efeito estufa, e, consequentemente, para a mudança climática. Diante disso, é importante a utilização de sistemas sustentáveis de uso do solo e insumos agrícolas que reduzam as emissões desse gás para a atmosfera.

Recentemente tem sido demonstrado o efeito do biochar na redução da emissão de gases de efeito estufa do solo, especialmente do óxido nitroso (Singh et al., 2010; Cayuela et al., 2013a). Este efeito tem sido verificado em biochars obtidos de diferentes matérias primas (Cayuela et al., 2013a). Apesar disso, ainda não foram estudados os efeitos do biochar de lodo de esgoto, obtidos por diferentes temperaturas de pirólise, na redução das emissões de óxido nitroso do solo.

Portanto, a produção de biochar a partir de lodo de esgoto ainda necessita ser melhor compreendida, obtendo-se temperaturas e tempos de pirólise adequados para uma produção de biochar com elevado poder de redução das emissões de óxido nitroso do solo.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial do biochar de lodo de esgoto, obtido por diferentes temperaturas de pirólise na redução das emissões de óxido nitroso do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Lodo de esgoto: importância, produção e uso

A Organização das Nações Unidas (ONU), em uma Assembleia Geral realizada em julho de 2010, definiu que o acesso à água potável e ao sistema de saneamento básico é um direito humano essencial. Contudo, visualizando o panorama mundial, verifica-se que cerca de 2,6 bilhões de pessoas ainda não são contempladas com um serviço de coleta e tratamento de esgoto.

O Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2013 divulgou que no Brasil, em 2010, cerca de 35% da população brasileira apresentava condições inadequadas de destinação do esgoto, sendo este lançado em fossa rudimentar, rio, lago, mar, ou outro escoadouro. Considerando também a avaliação dos dados contidos no PNSB de 2008, apenas 53% do volume de esgotos coletados passavam por algum tipo de tratamento antes de retornarem ao meio ambiente.

O serviço de esgotamento sanitário do Distrito Federal é responsabilidade da CAESB, que desempenha as funções de planejar, construir, operar e manter sistemas completos de esgotamento, além de comercializar serviços e atender clientes (CAESB, 2014). Esse sistema de coleta conta com 5.169 km de redes e 17 Estações de Tratamento de Esgotos (ETE). E assim, consegue atender de forma adequada 88,9 % das residências urbanas (IBGE, 2010).

As ETEs tem a finalidade de promover um tratamento adequado dos resíduos líquidos domésticos e industriais, utilizando processos físicos, químicos ou biológicos, para que consequentemente possam retornar a natureza sem ocasionar problemas ambientais e à saúde humana (CAESB, 2014).

O tratamento do esgoto promovido nas ETEs da CAESB é dividido em quatro etapas: tratamento preliminar (ou pré-tratamento), tratamento em caráter primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar faz uso de grades, peneiras ou caixas de areia para a retenção de resíduos maiores. O tratamento em nível primário se caracteriza pela sedimentação dos sólidos em suspensão, formando o lodo primário, que será removido para dar continuidade ao tratamento. Em âmbito secundário utiliza processo biológico, onde os microrganismos se alimentando da matéria orgânica, converte-a em gás carbônico e água. E em caráter terciário, são retirados elementos específicos, como

fósforo e nitrogênio, que em excesso prejudicam a qualidade da água resultante do processo de tratamento de esgoto.

O sistema de esgotamento da CAESB é composto de nove ETEs em caráter terciário e oito em caráter secundário. O uso de digestores no tratamento do lodo promove estabilização da matéria orgânica e favorece a etapa posterior de desidratação ou desaguamento, sendo o produto final denominado lodo de esgoto.

O alto teor de matéria orgânica no LE e a presença de macro e micronutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, promovem a melhoria de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Cezar et al., 2012). Observando tais características do lodo de esgoto, seu uso em substituição a adubação mineral pode favorecer o desenvolvimento de plantas, além da maior rentabilidade econômica quando se usa uma dose ótima (Quintana, 2006).

Além dos benefícios em áreas agrícolas, o LE também tem sido usado na recuperação de áreas degradadas, sendo uma das melhores alternativas para destinação final de tal material, que possui baixo custo, reutilização de nutrientes e menor dependência de fertilizantes químicos.

2.2. Biochar de lodo de esgoto: produção e uso agroambiental

Um dos fatores que mais entravam o uso do lodo de esgoto é a presença de microrganismos patogênicos, que somado à presença de metais tóxicos restringem o uso do LE a poucos destinos, sendo controlado por legislação específica, como a Resolução N° 375 de 2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2006). Quando usado de forma indiscriminada pode causar acúmulo de metais pesados nos solos, que podem ser absorvidos pelas plantas em quantidade suficiente para afetar negativamente o seu desenvolvimento e/ou a saúde dos consumidores (Chang et al., 1997).

Uma forma de solucionar o problema da presença de microrganismos patogênicos é o tratamento térmico do lodo de esgoto. O tratamento térmico por pirólise promove a eliminação de patógenos e componentes orgânicos perigosos (Caballero et al., 1997), tendo como produto principal o biochar.

O biochar é um produto sólido, rico em carbono, obtido pelo aquecimento de biomassa sob condições controladas de oxigenação, em processo conhecido como pirólise (Sohi, 2012), produzindo também um material líquido, o bio-óleo, e gases como H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_4 e C_2H_6 (Vieira, 2012). Diversas matérias primas podem ser utilizadas para a produção de biochar como madeiras utilizadas no aquecimento de

fornos e resíduos agroindustriais. Esta diversidade de matéria-prima utilizada sob diferentes condições resulta em produtos com propriedades variadas (Baldock & Smernik, 2002).

Segundo Downie (2009) a adição de biochar ao solo promove mudanças significativas nas propriedades físicas do solo, alterando atribuições como: agregados, porosidade e consistência, diâmetro dos poros, distribuição granulométrica, densidade, em função de sua maior área superficial específica. Com isso, as plantas têm apresentado maior desenvolvimento devido a maior disponibilidade de água na zona próxima ao sistema radicular.

Pesquisas envolvendo biochar e seus benefícios quando aplicado ao solo são crescentes. Além das propriedades físicas, o biochar tem se destacado por apresentar um potencial de retenção de metais pesados em solos contaminados, contudo esta característica é dependente da matéria-prima utilizada e da temperatura de pirólise para produção do biochar (Uchimyia et al., 2011).

O biochar tem sido objeto de diversos estudos devido sua ampla capacidade de gerar benefícios agroambientais, tais como: redução da perda de nutrientes por lixiviação, adição de nutrientes disponíveis para as plantas e calagem do solo. A interferência do biochar sobre propriedades químicas do solo tem garantido respostas fisiológicas nas plantas, sendo explicado pelo fato de o biochar aumentar os teores disponíveis de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e carbono (C), como também a eficiência no uso dos nutrientes (Petter, 2010).

Clough et al., (2013) destacam a interação entre o biochar e o ciclo do nitrogênio (N) no solo. De acordo com estes autores, a aplicação de fertilizantes nitrogenados em combinação com o biochar foi proposto para melhorar a sincronia temporal entre a demanda das culturas por N e a disponibilidade de N oriundo do solo, aumentando a eficiência de seu uso e redução dos impactos ao meio ambiente causados pelo excesso de adubação nitrogenada.

Além dos benefícios já citados, o biochar tem se destacado por seu potencial no sequestro de carbono (Kookana et al., 2011), como também seu efeito na redução das emissões de gases de efeito estufa do solo, especialmente do óxido nitroso (Singh et al., 2010; Cayuela et al., 2013a), fato verificado em biochars oriundos de diferentes matérias-primas.

2.3. Biochar e redução das emissões de óxido nitroso

O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR5 2014) divulgou resultados em que apontam o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera desde 1750, tendo como possíveis causas a intensificação das atividades humanas, mudança do uso da terra e a queima de combustíveis fósseis. Os principais gases envolvidos no aquecimento global são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), e óxido nitroso (N_2O). Sendo a agropecuária uma das principais responsáveis pelo aumento da concentração de metano e óxido nitroso.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída no Brasil por meio da Lei nº 12.187/2009, estabelece o compromisso nacional voluntário de adoção de ações de mitigação com propósito de reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020. De acordo com Decreto nº 7.390/2010, que regulamenta a PNMC, a projeção de emissões de gases de efeito estufa para 2020 foi estimada em 3,236 Gt CO_2eq. Dessa forma, a redução correspondente aos percentuais estabelecidos encontra-se entre 1,168 Gt CO_2eq e 1,259 Gt CO_2eq, respectivamente, para o ano em questão (MCTI, 2014).

De acordo com as estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil (MCTI, 2014) em torno de 37% das emissões CO_2eq provêm da agropecuária. As emissões de N_2O representam aproximadamente 15% do total das emissões de gases procedentes de diversos setores, como: energia, processos industriais, agropecuária, mudança no uso da terra e florestas e tratamento de resíduos. As emissões diretas de N_2O dos solos agrícolas provenientes do esterco dos animais em pastagem, do uso de fertilizantes sintéticos, da aplicação de adubo, da incorporação no solo dos resíduos agrícolas e das áreas de cultivo de solos orgânicos contribuem com 64% das emissões totais. Os fertilizantes sintéticos e aplicação de adubo são responsáveis por 12% das emissões.

Mais de dois terços das emissões globais de óxido nitroso provenientes do solo estão associados ao uso extensivo de fertilizantes nitrogenados na agricultura (Cayuela et al., 2013b). Em decorrência disso, inovações no desenvolvimento de tecnologias para sequestro de carbono, gestão de resíduos, melhoria das propriedades do solo, redução da emissão de gases, vem ganhando espaço no setor agrícola.

Três processos bióticos são indicados como principais contribuintes para as emissões de N_2O dos solos: nitrificação, desnitrificação e redução de nitrato (Baggs, 2011). Em solos agrícolas é geralmente assumido que a maior parte das emissões de N_2O seja proveniente do processo de desnitrificação, não restringindo o fato de os três mecanismos atuarem simultaneamente em diferentes microsítios do mesmo solo (Cayuela et al., 2013b).

O biochar e seus potenciais benefícios ao solo têm sido objeto de diversos estudos. A redução das emissões de N_2O do solo após adoção do biochar foi relatada pela primeira vez por Rondon et al. (2005). Uma revisão por meta-análise realizada por Cayuela et al. (2013a), com dados de 15 solos agrícolas, revelou uma redução média de 54% das emissões N_2O em solos que receberam biochar.

Diversos autores destacam as possíveis explicações para esse efeito do biochar na redução das emissões de óxido nitroso do solo. Steiner et al. (2010) propuseram que a diminuição nas quantidades de N que estão disponíveis para desnitrificação, adsorção e retenção de amônio é mais observada em solos contendo biochar. Entretanto, o grau de redução da emissão de N_2O pode variar dependendo da matéria-prima utilizada para produção do biochar, bem como pelo tipo de solo, a taxa de aplicação do biochar e condições de umidade do solo (van Zwieten et al., 2009).

Além disso, as condições de pirólise (temperatura e velocidade) e razão C:N do biochar também são apontados como fatores chave que influenciam as emissões de N_2O (Cayuela et al., 2013b). De acordo com estes autores, a aplicação de material orgânico de alta razão C:N pode reduzir a emissão devido a imobilização temporária de N no solo, enquanto que materiais com baixa razão C:N geralmente promovem uma rápida mineralização após incorporação ao solo, e assim maior emissão de N_2O.

Da mesma forma, também as interações entre a textura do solo e a forma química dos fertilizantes nitrogenados aplicados com o biochar possuem grande influência nas emissões do N_2O. Case et al. (2012) constataram que o aumento da aeração do solo tem uma contribuição mínima para a diminuição das emissões de N_2O. A textura do solo está fortemente relacionada com a capacidade do biochar em diminuir a proporção de $N_2O/(N_2 + N_2O)$ no momento da emissão máxima de N_2O, tendo o biochar favorecido a redução de N_2O a N_2, ou seja, propiciado a última etapa de desnitrificação predominantemente em solos de textura fina.

Em outra explicação apresentada por Cayuela et al. (2013a), o biochar poderia atuar como agente redutor e, adicionalmente, como um meio de transporte, facilitando a transferência de elétrons para microrganismos. O biochar pode competir com NO_3^- como receptor de elétrons, podendo explicar os menores teores de N total desnitrificado em muitos solos tratados com biochar. Na função de transportador de elétrons ligado ao seu efeito alcalinizante o biochar pode facilitar a atividade da N_2O redutase e, por consequência, promover a última etapa de desnitrificação, favorecendo a redução de N_2O para N_2, que é uma forma de N não reativa.

Os biochars geralmente possuem natureza alcalina, onde sua capacidade de neutralização dos ácidos varia com o tipo de matéria-prima e com a temperatura de produção (Yuan et al., 2011). A incorporação do biochar como estratégia de aumentar o pH do solo através do fornecimento de cátions básicos, teve como consequência a redução das emissões de N_2O (van Zwieten et al., 2010). Sendo também sugerido, que a diminuição das emissões de N_2O está correlacionada com o deslocamento estequiométrico do produto da desnitrificação, onde há aumento da produção de N_2 em relação a N_2O.

O N biodisponível ou reativo no solo é constituído pelas espécies de N orgânicos e minerais, incluindo o nitrato e amônio, que são prontamente assimilados por plantas e microrganismos (Huygens et al., 2008). A presença deste N está intimamente relacionada com as emissões de N_2O do solo (Butterbach-Bahl et al., 2013), tendo alguns estudos verificado que o biochar pode limitar sua disponibilidade no solo, reduzindo a presença de substrato para produção de N_2O.

No caso específico do biochar de lodo de esgoto, o desenvolvimento de pesquisas e de dados gerados ainda é limitado, principalmente seus benefícios quando incorporado a solos de regiões tropicais, como no caso dos Latossolos. Sua produção ainda necessita ser melhor compreendida, obtendo-se temperaturas e tempos de pirólise adequados para uma produção de biochar com elevado poder de redução das emissões de óxido nitroso do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Amostragem e caracterização do solo

As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) localizado na Fazenda Água Limpa, Brasília, DF. A caracterização química e mineralógica do solo é apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química e mineralógica do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA).

Componente[1]	**LVA**
Argila, g kg^{-1}	666,0
Silte, g kg^{-1}	206,0
Areia, g kg^{-1}	129,0
Área superficial específica, m^2 kg^{-1}	49,7
pH (H_2O; razão 1:2,5)	5,2
Fósforo, mg dm^{-3}	a
Potássio, $mmol_c$ dm^{-3}	0,8
Cálcio, $mmol_c$ dm^{-3}	a
Magnésio, $mmol_c$ dm^{-3}	a
H + Al^{3+}, $mmol_c$ dm^{-3}	31,0
Soma de bases, $mmol_c$ dm^{-3}	2,5
Capacidade de troca catiônica, $mmol_c$ dm^{-3}	33,5
Saturação por bases, %	7,0
Carbono orgânico, g kg^{-1}	16,6
Ponto de carga zero	3,8
Gibbsita, g kg^{-1}	296,2
Goethita, g kg^{-1}	139,9
Caulinita, g kg^{-1}	–
Ilita g kg^{-1}	83,8
SiO_2, g kg^{-1}	228,9
Al_2O_3, g kg^{-1}	380,0
Fe_2O_3, g kg^{-1}	145,1

[1] Argila e silte (método hidrômetro padrão); Areia (peneiramento); Área superficial específica (multiponto-BET); Carbono orgânico (Método Walkley-Black); a = abaixo do limite de quantificação; Soma de bases = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}); Capacidade de troca catiônica = (H + Al^{3+}) + SB; Ponto de carga zero (titulação potenciométrica); Gibbsita, goethita, caulinita e ilita (TDA-TG análise térmica); Ilita no LVA corresponde a ilita + caulinita, com predomínio de ilita seguindo resultados de XRD. SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Raio-X de fluorescência).

3.2. Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto

O biochar foi produzido a partir da biomassa de lodo de esgoto proveniente da estação de tratamento de esgoto da companhia de saneamento ambiental do Distrito Federal (CAESB), localizada na cidade do Gama, a 34 km do centro de Brasília, DF. Esta ETE utiliza o sistema de tratamento em nível secundário, no qual o lodo é tratado

em digestores com propósito de estabilizar a matéria orgânica. O lodo utilizado estava acondicionado em pátio de secagem e algumas propriedades são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Umidade, sólidos voláteis e cinzas do lodo de esgoto.

Parâmetro	Unidade	Valor
Umidade (65 ºC)	g g^{-1}	0,17
Sólidos voláteis	g g^{-1}	0,45
Cinzas	g g^{-1}	0,54

O biochar foi produzido em forno tubular elétrico (Linn Elektro Therm) sob diferentes temperaturas de pirólise. As amostras foram alocadas em um recipiente de metal adaptado ao espaço interno do forno que conta com um sistema de saída de gases e bio-óleo, e um mecanismo que evita o fluxo de oxigênio. O controle de temperatura durante a pirólise foi realizado com o uso de um termopar tipo K de penetração, modelo MTK-15, acoplado a um termômetro digital KT-160A.

O biochar foi produzido sob as seguintes temperaturas: 300, 400 e 500 °C, com taxa de aumento de temperatura igual a 11°C min^{-1} e tempo de pirólise de 30 min. Essa etapa do experimento foi realizada no Laboratório de Preservação da Qualidade da Madeira, situado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília. A caracterização do biochar é descrita na tabela 3.

Tabela 3. Propriedades físico-químicas do biochar produzido sob diferentes temperaturas de pirólise.

Propriedades	BC300	BC400	BC500
ASE (m^2/g)	20,17	29,85	52,470
VP (ml/g)	0,027	0,046	0,053
pH	5,8	6,5	6,5
CE (mS/cm)	1,7	1,3	2,3
C (%)	23,4	21,6	19,0
N (%)	3,3	2,9	2,3
H (%)	3,6	2,7	1,7
C/N	7,0	7,4	8,1
H/C	0,2	0,1	0,1
Nitrato (mg kg^{-1})	17,513	5,838	5,838
Amônio (mg kg^{-1})	431,975	198,475	169,288

ASE: área superficial específica; VP: volume de poros; CE: condutividade elétrica; C: carbono total; N: nitrogênio total; H: hidrogênio; BC300: biochar a 300°C; BC400: biochar a 400°C; BC500: biochar a 500°C.

3.3. Incubação e medição dos fluxos de N_2O

Foram utilizadas câmaras de incubação constituída por potes de vidro de um litro, hermeticamente fechados. Na tampa desses potes havia uma perfuração de 0,8 cm de diâmetro onde foi acoplado um tubo de silicone transparente de 10 cm de comprimento. Na extremidade superior deste tubo foi acoplado uma seringa de 1 mL, ligada a uma válvula que propiciava a adequada coleta dos gases. Após a coleta a válvula era fechada para evitar a saída de gases das câmaras.

Nessas câmaras, foram acondicionados 50 g de solo em um recipiente de acrílico, e adicionados 19 mL de água destilada para proporcionar que 80% dos poros do solo estivessem saturados por água. Ainda dentro da câmara foi adicionado um segundo recipiente contendo 5 mL de água destilada. As câmaras foram montadas com as mesmas prescrições e pré-incubadas em sala escura com temperatura e umidade controladas por um período de sete dias.

Após o período de pré-incubação, o experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por: 1) solo sem aplicação de biochar e de nitrogênio (controle); 2) Solo com aplicação de

nitrogênio, sem biochar; 3) solo com aplicação de nitrogênio e biochar 300 ºC; 4) solo com aplicação de nitrogênio e biochar 400 ºC; e 5) solo com aplicação de nitrogênio e biochar 500 ºC. A quantidade de nitrogênio aplicada foi de 10 mg de N kg^{-1} de solo, correspondendo a uma dose de 200 kg ha^{-1} de N, na forma nitrato de potássio. Cinco gramas do biochar passados em peneira de 2 mm foram incorporados ao solo. Após a montagem do experimento, os potes foram hermeticamente fechados e levados para a sala de incubação.

Após o fechamento de cada câmara de incubação foi feita a primeira extração de gases, sendo definida como a coleta de tempo zero. A coleta foi feita com uso de seringa de 60 mL, coletando-se 25 mL de gases e armazenando-os em *vials*. Nos dez primeiros dias, as medições foram realizadas em intervalos de dois dias. A partir do 10º dia, as coletas foram realizadas com intervalos de sete dias, totalizando 11 medições e 43 dias de incubação.

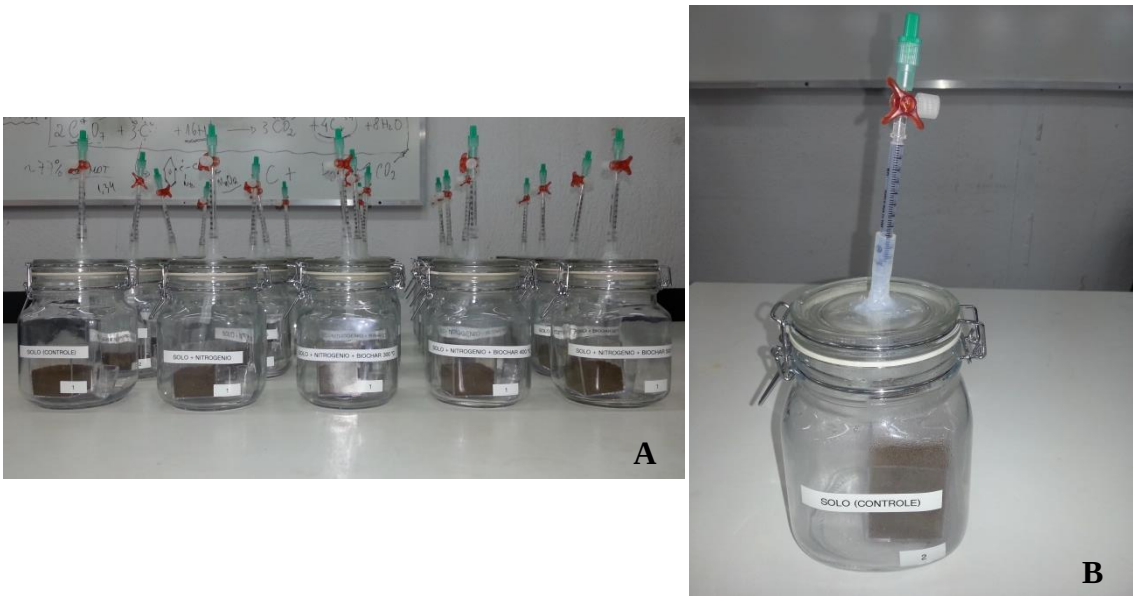

Figura 1. Câmaras de incubação utilizadas no experimento (A). Válvula utilizada para coleta de gases (B).

Os *vials* contendo os gases coletados foram enviados para o Laboratório de Cromatografia Gasosa da Embrapa Cerrados para a quantificação da concentração do óxido nitroso, sendo utilizado para medição o cromatógrafo gasoso Trace GC Ultra, da Thermo Scientific, com coluna preenchida com "Porapak Q" e detector de captura de elétrons.

Os dados de emissão de óxido nitroso acumulado e em cada coleta foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey (p=0,05). As análises foram realizadas no software XLSTAT (Addinsof, 2013).

Os dados, de todas as variáveis em conjunto, foram submetidos à análise de componentes principais (PCA), a partir de combinações lineares das variáveis originais em eixos ortogonais independentes. Esta análise foi realizada com o objetivo de identificar quais fatores (características físico-químicas dos diferentes biochars BC300, BC400 e BC500) mais se relacionam com o N_2O acumulado oriundo do solo. As análises foram realizadas utilizando-se o software XLSTAT 2013.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações de óxido nitroso (N_2O) quantificadas em onze extrações de gases são apresentadas na figura 2. Verificou-se um acréscimo na produção de N_2O quando foi adicionado nitrogênio ao solo, na forma de nitrato de potássio. As maiores variações na concentração de N_2O foram verificadas durante os primeiros 22 dias de incubação. Após esse período a concentração observada nos diferentes tratamentos tendeu a se estabilizar. Também em trabalho com aplicação de nitrogênio e biochar ao solo, Cayuela et al. (2013a) verificaram que após 30 dias de incubação o fluxo de N_2O em todos os tratamentos havia estabilizado, apontando para uma diminuição de NO_3^- ou de carbono orgânico disponível no solo.

A concentração dos gases nas câmaras de incubação dos cinco tratamentos visualizada na primeira extração, tempo zero, indica que os valores de N_2O eram similares, logo após a aplicação do nitrogênio, com valores médios variando de 0,307 a 0,383 ppm. Tal circunstância demonstra que características similares foram preservadas no início do experimento.

Nos primeiros dez dias após a aplicação do adubo nitrogenado, verificou-se um aumento das concentrações de N_2O. Nesse período, o BC300 apresentou as maiores liberações de N_2O, superiores aos demais tratamentos. O biochar de lodo de esgoto obtido em baixa temperatura (300 ºC) apresenta algumas características que podem elevar as emissões de N_2O como maiores teores de NO_3^- e NH_4^+ e menor relação C/N (Tabela 1). De acordo com Baggs et al. (2000) a aplicação de material orgânico com baixa relação C/N geralmente promove rápida mineralização após incorporados ao solo, levando a maiores emissões de N_2O, enquanto materiais com alta relação C/N pode levar a reduções nas emissões de N_2O devido a uma imobilização temporária de N no solo. O pico de produção de N_2O oriundo do BC300 ocorreu no sexto dia de incubação. Após esse período verificou-se um forte decaimento, tendendo a estabilização aos vinte dias.

O tratamento que recebeu fertilizante nitrogenado sem a presença de biochar apresentou um gradual aumento na liberação de N_2O, ultrapassando os demais tratamentos a partir da quinta extração. O fornecimento de uma fonte de nitrogênio de rápida liberação de nitrato (KNO_3) elevou a emissão de N_2O do solo. O N biodisponível ou reativo no solo constituído por espécies orgânicas e minerais, incluindo nitrato (NO_3) e amônio (NH_4^+), pode ser facilmente utilizado por microrganismos (Huygens et al.,

2008). A disponibilidade deste N é o principal constituinte para as emissões de N_2O do solo (Butterbach-Bahl et al., 2013).

A fonte de nitrogênio utilizada na fertilização (ureia, nitrato de amônio) para o fornecimento N para as culturas, associado com o modo de aplicação, sendo em superfície ou incorporado, na linha de semeadura ou entre linhas, influenciam o fluxo de NO (Skiba et al., 1997; Signor, 2013). A produção de N_2O no solo está relacionada com a disponibilidade de N. Em solos que apresentam condições favoráveis de umidade, a emissão do óxido nitroso pode chegar a 1,25% do N-fertilizante aplicado (Dalal et al., 2003).

O uso dos biochars BC400 e BC500 promoveu redução das emissões de N_2O durante todo o período de incubação, quando comparado com o solo que recebeu apenas a adubação nitrogenada. Van Zwieten et al. (2010) têm relacionado reduções nas emissões de N_2O ao aumento do pH do solo induzido pelo biochar, o que pode promover um deslocamento do produto estequiométrico da desnitrificação, aumentando a produção de N_2 em relação ao N_2O. Cayuela et at. (2013b) também demonstraram, por meio do ^{15}N, que o biochar favorece a última etapa de desnitrificação, diminuindo a relação N_2O/N_2 em 15 tipos de solos. Com isso, revelou que o efeito de calagem do biochar não é o único aspecto para redução das emissões de N_2O durante a desnitrificação.

O biochar tem se destacado por sua capacidade de aumentar a aeração do solo, favorecer a imobilização de N, interagir com o carbono orgânico disponível e N no solo, modificar as atividades enzimáticas, e induzir um efeito tóxico sobre as comunidades nitrificadoras e desnitrificadoras, e em consequência a tudo isso, promover uma redução na emissão de N_2O (Cayuela et al., 2013b).

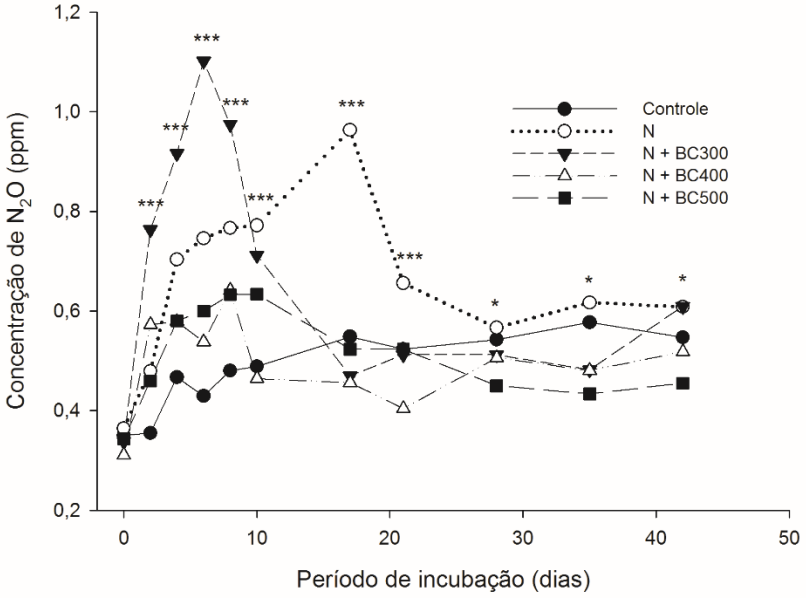

Figura 2. Concentrações de N_2O oriundas de solo após aplicação de adubo nitrogenado e biochar de lodo de esgoto. * e *** indicam diferenças, entre tratamentos, significativas a P<0,05 e P<0,001, respectivamente.

As concentrações acumuladas de N_2O durante os 43 dias de incubação nos diferentes tratamentos são apresentadas na figura 3.

A produção de N_2O até os dez dias de incubação é bastante intensa. Dos dez dias até o final do período de incubação, verifica-se a distinção de dois grupos quanto a emissão de N_2O do solo. No primeiro grupo estão o solo que recebeu apenas fertilizante nitrogenado e o solo que recebeu N mais biochar 300 ºC (BC300). Ambos os tratamentos promoveram maiores concentrações de N_2O oriundo do solo, com valores que chegaram a 7,38 ppm no BC300 e 7,23 ppm no S + N. O segundo grupo foi formado pelos tratamentos Controle, BC400 e BC500 que não se diferenciaram e apresentaram as menores emissões de N_2O. Resultados semelhantes foram observadas com biochars produzidos a partir de madeira e a elevadas temperaturas, sendo estes mais propensos a adsorver NO_3^- (Dempster et al., 2012), assim como, maior capacidade de sorção de nutrientes quando comparados aos biochars produzidos a baixas temperaturas, tendo como argumento sua maior área superficial e capacidade de sorção de matéria orgânica (Mukherjee et al., 2013).

Redução nas emissões de óxido nitroso também foi verificada por Cayuela et al. (2013a) em um ensaio de incubação com 15 solos incorporados com biochar, onde

foram utilizados nove materiais orgânicos (mistura de lascas de madeiras, pinheiro, carvalho, bambu, folhas, entre outros) para produção de biochars, a uma temperatura de pirólise de 500 ºC. O acúmulo de N_2O nos tratamentos com incorporação de N foi superior ao controle, evidenciando a responsabilidade das fertilizações nitrogenadas no aumento das emissões de óxido nitroso do solo.

O biochar de lodo de esgoto produzido em elevadas temperaturas (400 e 500 ºC) mostrou-se eficiente na redução da concentração de N_2O. Singh et al. (2010) avaliaram em seu experimento quatro tipos de biochars, dois obtidos a partir de madeira e temperatura de pirólise de 400 ºC e 550 ºC, e dois de esterco de galinha produzidos a 400 ºC e 550 ºC. Utilizando uma taxa de aplicação de 10 t ha^{-1}, observaram que após três ciclos de umedecimento e secagem do solo, os tratamentos com biochar apresentaram redução de 14 a 73% das emissões de N_2O quando incorporado a um Luvissolo e de 23 a 52% a um Vertissolo, em relação ao controle.

O biochar proveniente de biossólidos promoveu uma redução de 84% da produção de N_2O em solos alagados quando comparados ao controle (tratamento sem uso de biochar e com aplicação de 165 kg de N na forma de ureia), sendo tal redução atribuída a maior adsorção de NO_3^-, bem como ao aumento do pH, que pode favorecer a desnitrificação com produto final o N_2 (Zwieten et al., 2010).

Cayuela et al. (2013b) relataram que estão surgindo novas evidências que o biochar pode limitar a disponibilidade de N no solo, reduzindo assim a disponibilidade de substrato para a produção óxido nitroso. Visto que a aplicação de fertilizantes nitrogenados em combinação com o biochar foi proposto para melhorar a sincronia temporal entre a demanda de N pela lavoura e a disponibilidade de N no solo, aumentando a eficiência do uso de N e redução dos impactos ambientais.

A concentração atmosférica global de óxido nitroso aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 270 ppb (partes por bilhão) para 319 ppb em 2005 (IPCC, 2007). O presente estudo reafirma a influência das fertilizações nitrogenadas na produção de N_2O, da mesma forma que a incorporação de biochar de lodo de esgoto ao solo pode ser uma alternativa para contornar tal condição. Sendo observado que os biochars produzidos a elevadas temperaturas têm se mostrado mais eficientes na mitigação das emissões de N_2O, como é o caso do bichar produzido a 400 e a 500 ºC.

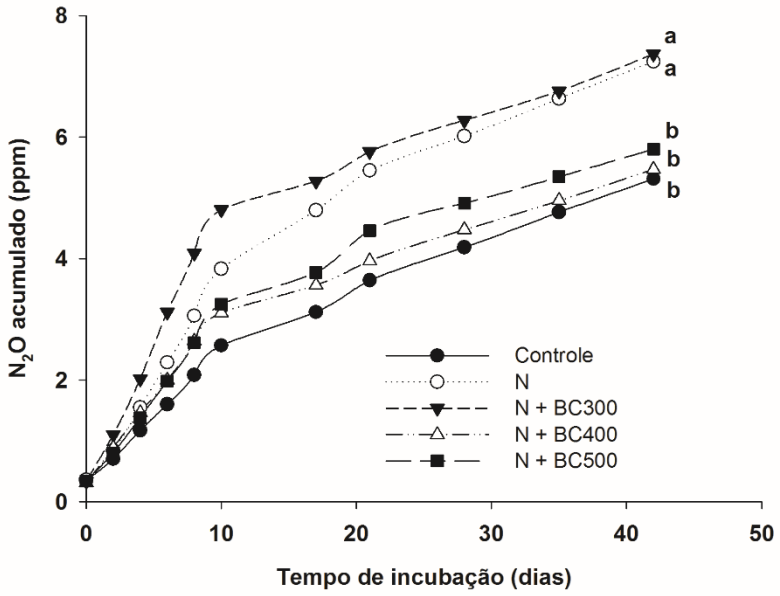

Figura 3. N_2O acumulado oriundo do solo após 43 dias de incubação, após aplicação de adubo nitrogenado e biochar de lodo de esgoto. Letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos de acordo como teste de Tukey ($p<0,05$).

O diagrama de ordenação derivado da análise de componentes principais dos *scores* de N_2O acumulado e dos atributos químicos de biochar de lodo de esgoto pirolisado a 300 ºC, 400 ºC e 500 ºC é apresentado na figura 4.

O diagrama avaliou as propriedades com maior contribuição para produção de N_2O acumulado. Pela distribuição observada no componente principal 1 (eixo F1), os biochars foram agrupados em dois grupos, sendo o BC300 separado do BC400 e BC500. Como demonstrado na Figura 3, o BC300 proporcionou maiores liberações de N_2O acumulado durante o período de incubação, quando comparado aos demais biochars. Entre as diversas características físico-químicas do biochar, os teores de NO_3^- e NH_4^+ foram aquelas que mais se relacionaram com a emissão de N_2O do solo. Siqueira Neto et al. (2011) também observaram que em áreas de maior disponibilidade de N-NO_3^- juntamente com maior umidade do solo havia correlação positiva com a emissão de N_2O.

Características do biochar como área superficial específica (ASE), relação C/N, pH e volume de poros (VP) estão associadas às menores concentrações de N_2O decorrentes do uso do biochar produzido em elevadas temperaturas, como o BC400 e BC500. O aumento da porosidade do solo, a incorporação de material com alta relação

C/N e aumento do pH são propriedades discutidas em diversos trabalhos e relacionadas com a redução da emissão de N_2O.

Em estudo realizado por Albuquerque et al. (2015) foi descrito que a temperatura de pirólise para produção de biochar, a partir de madeira de pinho influencia, em sua capacidade de mitigação de N_2O. O biochar de baixa temperatura (350 ºC) tem menor capacidade de supressão das emissões quando comparado ao biochar de alta temperatura (550 ºC). O aumento das emissões N_2O produzidas por biochars de baixa temperatura é devido à maior disponibilidade das fontes de C e N, estimulando a atividade de microrganismos envolvidos nas vias de produção N_2O. Em outro experimento, localizado na China, também foram verificadas pequenas reduções nas emissões de N_2O quando da aplicação de biochar, cujas reduções foram proporcionais aos aumentos na taxa de aplicação do biochar (Xiang et al., 2014).

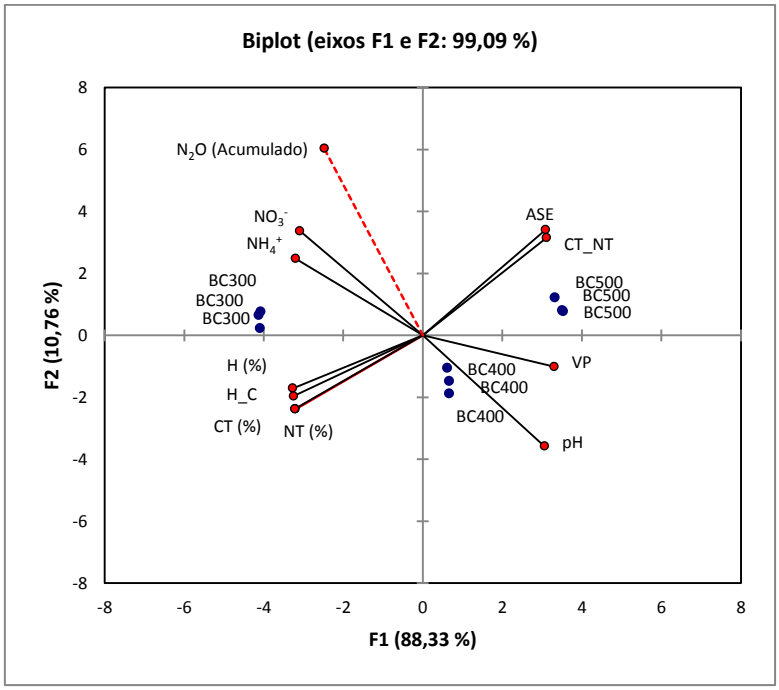

Figura 4. Diagrama de ordenação derivado da análise de componentes principais dos scores de N_2O acumulado e atributos químicos de biochar de lodo de esgoto pirolisado a 300 °C (BC300), 400 °C (BC400) e a 500 °C (BC500).

5. CONCLUSÕES

1) A aplicação de fertilização nitrogenada mineral elevou as emissões de N_2O do solo.

2) O efeito do biochar de lodo de esgoto na emissão de N_2O é dependente da temperatura de pirólise: biochar produzido em baixa temperatura (BC300) eleva as emissões de N_2O do solo; enquanto que aqueles produzidos em elevadas temperaturas (BC400 e BC500) reduzem as emissões desse gás do solo.

3) Entre as propriedades físicos-químicas do biochar avaliadas, os teores de NO_3^-, NH_4^+ e pH são aquelas que mais se relacionam com emissões de N_2O do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alburquerque, J.A.; Sánchez-Monedero, M.A.; Roig, A.; Cayuela, M.L. High concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (naphthalene, phenanthrene and pyrene) failed to explain biochar's capacity to reduce soil nitrous oxide emissions. 2014. Environmental Pollution, v. 196, p. 72-77, 2015.

Baggs, E.M.; Rees, R.M., Smith, K.A.; Vinten, A.J.A. Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. Soil Use Management, v. 16, p. 82-87, 2000.

Baggs, E.M. Soil microbial sources of nitrous oxide: recent advances in knowledge, emerging challenges and future direction. Current Opinion in Environmental Sustainability, v. 3, p. 321-327, 2011.

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

Butterbach-Bahl, K.; Baggs, E.M.; Dannenmann, M.; Kiese, R.; Zechmeister-Boltenstern, S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 368, p. 1-13, 2013.

Caballero, J.A.; Front, R.; Marcilla, A.; Conesa, J.A. Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 4041, p. 433–450, 1997.

Case, S.D.C.; McNamara, N.P.; Reay, D.S.; Whitaker, J. The effect of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from a sandy loam soil-the role of soil aeration. Soil Biology & Biochemistry, v. 51, p. 125-134, 2012.

Cayuela, M.L.; Sanchez-Monedero, M.A.; Roig, A.; Hanley, K.; Enders, A.; Lehmann, J. Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N_2O emissions? Scientific Reports, v. 3, p. 1-7, 2013a.

Cayuela, M.L.; van Zwieten, L.; Singh, B.P.; Jeffery, S.; Roig, A.; Sánchez-Monedero, M.A. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. 2013b. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 191, p. 5-16, 2014.

Cerri, C.C.; Cerri, C.E.P. Agricultura e aquecimento global. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 23, p. 40-44, 2007.

Cézar, R.; Silva, M.; Colonese, J.; Bidone, E.; Egler, S.; Castilhos, Z.; Polivanov, H. Influence of the properties of tropical soils in the toxicity and bioavailability of heavy metals in sewage sludge-amended lands. Environmental Earth Science, Berlin, v. 66, p. 2281-2292, 2012.

Chang, A.C.; Hyun, H.; Page, A.L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sewage sludge treated field plots: plateau or time bomb? Journal of Environmental Quality, Standford, v. 26, p. 11-19, 1997.

Clough, T.; Condron, L.; Kammann, C.; Müller, C. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. Agronomy, v. 3, p. 275–293, 2013.

Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). Disponível em**:** < www.caesb.df.gov.br/esgoto/sistemas-de-esgotamento.html>. Acesso em: 06 de outubro de 2014.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Conama 375/06. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf/>. Acesso em: 09 de outubro de 2014.

Dalal, R.C.; Wang, W.; Robertson, G.P.; Parton, W.J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. Australian Journal of Soil Research, v. 41, p. 165-195, 2003.

Dempster, D.N.; Jones, D.L.; Murphy, D.V.; Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. Soil Research, v. 50, p. 216–221, 2012.

Downie, A.; Crosky, A.; Munroe, P. Physical Properties of Biochar. In: Lehmann, J.; Joseph, S (ed). Biochar for Enviromental Management: Science and Technology. Ed. Londres: Earthscan, v. 1, p. 13-32, 2009.

Houghton, J.T.; Ding, D.J.; Noguer, M.; Linden, P.J. van der.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A. (Ed.). Climate change 2001: the scientific basics. New York: Cambridge University Press. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report oh the Intergovernamental Painel on Climate Change, p. 881, 2001.

Huygens, D.; Boeckx, P.; Templer, P.; Paulino, L.; Van Cleemput, O.; Oyarzun, C.; Muller, C.; Godoy, R. Mechanisms for retention of bioavailable nitrogen in volcanic rainforest soils. Nature Geoscience, v. 1, p. 543–548, 2008.

IBGE (2010). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas do Censo Demográfico 2010. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/apps/atlas/>. Acesso em: 16 de outubro de 2014.

IPCC (2007). Mudança do clima 2007: a base das ciências físicas-Sumário para os formuladores de política. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/portuguese/ar4-wg1-spm.pdf>. Acesso em: 13 de outubro de 2014.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2014.

Kookana, R.S.; Sarmah, A.K.; van Zwieten, L.; Krull, E.; Singh, B. Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. Advances in Agronomy, v. 112, p. 103–143, 2011.

Lehmann, J. Bio-energy in the black. Frontiers in Ecology and the Environment, v. 5, p. 381-387, 2007.

MCTI. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2ª Edição, 2014.

Mukherjee, A.; Zimmerman, A.R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. Geoderma 193-194, p. 122-130, 2013.

Petter, F.A. Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agronômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado. Tese (Doutorado em Agronomia: Produção Vegetal) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, f. 130, 2010.

Quintana, N.R. Análise econômica da aplicação de biossólido na agricultura. (Tese de Mestrado), Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, f. 133, 2006.

Rondon, M.A.; Ramirez, J.A.; Lehmann, J. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils. In: Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases & Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry, p. 208. 2005.

Singh, B.P.; Hatton, B.J.; Balwant, S.; Cowie, A.L.; Kathuria, A. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. Journal of Environmental Quality, v. 39, p. 1224-1235, 2010.

Skiba, U.M.; Fowler, D.; Smith, K.A. Nitric oxide emissions from agricultural soils in temperate and tropical climates: sources, controls and mitigation options. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 48, p. 139-153, 1997.

Steiner, C.; Das, C.K.; Melear, N.; Lakly, D. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. Journal of Environmental Quality, v. 39, p. 1-7, 2010.

Signor, D.; Cerri, C.E.P.; Conant, R. N_2O emissions due to nitrogen fertilizer application in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. Environmental Research Letters, v. 8, p. 015013, 2013.

Siqueira Neto, M.; Piccolo, M.C.; Costa JR, C.; Cerri, C.C.; Bernoux, M. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, p. 63-72, 2011.

Sohi, S.P. Carbon storage with benefits. Science, v. 338, p. 1034-1035, 2012.

Uchimiya, M.; Wartelle, L.H.; Klasson, K.T.; Fortier, C.A.; Lima, I.M. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 59, p. 2501-2510, 2011.

van Zwieten, L.; Singh, B.; Joseph, S.; Kimber, S.; Cowie, A.; Chan, Y.K. Biochar and emissions of non-CO_2 greenhouse gases from soil. Lehmann, J.; Joseph, S. (Eds.), Biochar for Environmental Management Science and Technology, Earthscan Press, UK, p. 227–249, 2009.

van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Downie, A.; Berger, E.; Rust, J.; Scheer, C. Influence of biochars on flux of N_2O and CO_2 from ferrosol. Australian Journal of Soil Research, v. 48, p. 555–568, 2010.

Vieira, N.D. Estudo da pirólise de lodo sanitário visando, sua valorização energética. (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2012.

Xiang, J.; Liu, D.; Ding, W.; Yuan, J.; Lin, Y. Effects of biochar on nitrous oxide and nitric oxide emissions from paddy field during the wheat growth season. Journal of Cleaner Production, 2014.

Yuan, J.H.; Xu, R.K.; Qian, W.; Wang, R.H. Comparison of the ameliorating effects on an acidic ultisol between four crop straws and their biochars. Journal of Soils and Sediments, v. 11, p. 741-750, 2011.