

NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO SORGO SACARINO E
ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS DO SOLO PELA APLICAÇÃO DE
LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO

LIDIANE DE LIMA LOUSADA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2015

NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO SORGO SACARINO E
ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS DO SOLO PELA APLICAÇÃO DE
LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO

LIDIANE DE LIMA LOUSADA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutora em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA / UENF** 193/2015

Lousada, Lidiane de Lima

Nutrição e crescimento do sorgo sacarino e alterações nos atributos do solo pela aplicação de lodo de esgoto doméstico / Lidiane de Lima Lousada. – 2015.

f. 121: il.

Orientador: Cláudio Roberto Marciano
Tese (Doutorado - Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2015.

Bibliografia: f. 99 – 108.

1. Lodo de esgoto 2. Caleação 3. Absorção de nutrientes 4. Crescimento 5. Fotossíntese I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD–
633.62

NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO SORGO SACARINO E
ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS DO SOLO PELA APLICAÇÃO DE
LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO

LIDIANE DE LIMA LOUSADA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutora em Produção Vegetal.

Aprovada em 30 de abril de 2015

Comissão Examinadora

Prof. Gilmar Santos Costa (D.Sc., Produção Vegetal) – IFF

Prof^a. Luciana Aparecida Rodrigues (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

Prof. Sílvio de Jesus Freitas (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – UENF
(Orientador)

A todos aqueles que procuram contribuir para um mundo melhor através do conhecimento, que é a maior arma contra as injustiças e desigualdades.

Dedico este trabalho

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

(Martin Luther King).

AGRADECIMENTOS

A Deus, que permitiu que eu chegasse até aqui, me amparando e dando forças para prosseguir. Sem Ele nada seria possível e nem teria sentido;
Aos meus pais Enio e Linda Célia pela confiança, pelo amor e pelo carinho;

Ao meu esposo Vítor, pelo amor, pela paciência e carinho;

À minha irmã Laila pelo amor e pelo carinho;

À Barbara, pelo companheirismo, amor e parceria em todos os anos de nossa caminhada. Por ser mais que uma amiga, ser uma irmã.

Ao Professor Cláudio Roberto Marciano, pelas orientações valiosas, pela amizade e excelente convivência e principalmente por tentar extrair de mim o que eu nem sabia que seria capaz;

Às minhas amigas Roselaine, Rosely e Livia pela convivência diária e pelos bons momentos compartilhados;

Ao técnico do LSOL, Ederaldo Silva, pelo apoio na condução do experimento e pela boa convivência;

À minha coorientada de Iniciação Científica, Priscila Gurgel, pela amizade, pelo auxílio na condução deste experimento e por ter me proporcionado adquirir uma experiência nova;

Ao amigo David Pessanha, pela boa convivência e momentos de descontração e pelo auxílio neste experimento;

Aos amigos do LSOL: Damaris, João Pedro, Reginaldo, Élide e Gabriela pela convivência agradável e pelos momentos bons compartilhados;

À professora Aline Intorne e sua aluna Thaís pelo apoio nas análises microbiológicas e pelas contribuições valiosas para a realização deste trabalho;

Ao professor Olney e à técnica Solange por permitirem a utilização do Laboratório de Sanidade Animal (LSA) da UENF/CCTA para realização das análises microbiológicas;

Ao professor Carlos Eduardo de Rezende, do Laboratório de Ciências Ambientais (LCA) da UENF/CBB, e seu aluno Diogo pela realização das análises nutricionais no sorgo e de metais pesados no lodo de esgoto utilizado;

À concessionária Águas do Paraíba por conceder o lodo de esgoto que foi alvo de estudo;

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela oportunidade do doutoramento;

A CAPES e a FAPERJ pelas bolsas de estudo e pelo apoio financeiro para a realização dos experimentos;

E a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Meu muito obrigada!

SUMÁRIO

Resumo.....	Ix
Abstract	Xi
1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura.....	5
2.1. Lodo de esgoto.....	5
2.1.1. Considerações gerais.....	5
2.1.2. Higienização e estabilização do lodo de esgoto.....	7
2.1.3. Uso agrícola do lodo de esgoto doméstico.....	8
2.1.3.1. Restrições ao uso de lodo de esgoto na agricultura.....	9
2.1.3.2. Alterações na qualidade física e química do solo pelo uso do lodo de esgoto doméstico.....	12
2.2. Sorgo sacarino.....	15
2.2.1. Aspectos gerais.....	15
2.2.2. Aspectos nutricionais do sorgo sacarino	17
3. Materiais e Métodos.....	20
3.1. Local de realização do trabalho e materiais utilizados.....	20
3.2. Ensaio 1: Adequação do lodo de esgoto para uso agrícola.....	21
3.2.1. Coleta, caracterização e higienização do lodo de esgoto.....	21
3.2.2. Higienização e estabilização do lodo.....	22
3.2.3. Caracterização e potencial agrônômico do lodo de esgoto.....	23
3.3. Ensaio 2: Adubação de sorgo sacarino com lodo de esgoto doméstico	24
3.3.1. Coleta e caracterização dos solos utilizados no experimento.....	24
3.3.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	25
3.3.3. Implantação e condução do experimento.....	26

3.3.4. Variáveis analisadas.....	28
3.3.4.1. Atributos do solo.....	28
3.3.4.1.1. Atributos físicos.....	28
3.3.4.1.2. Atributos químicos.....	29
3.3.4.2. Avaliações do sorgo.....	30
3.3.4.2.1. Análises biométricas.....	30
3.3.4.2.2. Análises fisiológicas.....	30
3.3.4.2.3. Análises nutricionais.....	31
3.4. Análise dos dados.....	32
4. Resultados e Discussão.....	33
4.1. Ensaio 1: Adequação do lodo de esgoto doméstico para uso agrícola..	33
4.1.1. Higienização e estabilização do lodo de ETE.....	33
4.1.2. Potencial agrônômico do lodo de esgoto.....	35
4.1.2.1. Poder de neutralização (PN) da acidez do solo.....	36
4.1.2.2. Níveis de metais pesados.....	37
4.1.2.3. Potencial para adubação na região Norte Fluminense.....	39
4.2. Ensaio 2: Adubação de sorgo sacarino com lodo de esgoto doméstico	41
4.2.1. Efeito nos atributos químicos dos solos.....	41
4.2.2. Efeito nos atributos físicos dos solos.....	59
4.3. Efeito da aplicação das doses de lodo de esgoto no desenvolvimento de sorgo sacarino.....	65
4.3.1. Efeito das doses de lodo na absorção de nutrientes pelo sorgo sacarino.....	65
4.3.2. Efeito das doses de lodo na biometria do sorgo sacarino.....	85
4.3.3. Efeito das doses de lodo na fisiologia do sorgo sacarino.....	90
5. Conclusões.....	97
6. Referências Bibliográficas.....	99

RESUMO

LOUSADA, Lidiane de Lima, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Abril de 2015. Nutrição e crescimento do sorgo sacarino e alterações nos atributos do solo pela aplicação de lodo de esgoto doméstico. Orientador: Prof. Cláudio Roberto Marciano.

A partir da coleta e tratamento de esgoto realizado nas ETEs (Estações de tratamento de esgoto), um subproduto dessa atividade é gerado, o lodo de esgoto, rico em nutrientes e que tem sido utilizado mundialmente na produção agrícola. O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso agrícola do lodo de esgoto doméstico na qualidade física e química de dois solos da região Norte Fluminense e no desenvolvimento da espécie sorgo sacarino. O presente trabalho foi realizado no período de janeiro de 2013 a abril de 2014. Ensaio de laboratório e de casa-de-vegetação foram conduzidos neste período. O resíduo utilizado para as análises foi proveniente da ETE-Chatuba cedido pela concessionária Águas do Paraíba. O lodo foi caracterizado quanto a sua potencialidade agrônômica, metais pesados e patógenos. Para a higienização e estabilização do lodo optou-se pela técnica de caleação e para determinar a dose de cal adequada foi realizado um ensaio de incubação. Após a adequação do resíduo um experimento para avaliar os efeitos agrônômicos da aplicação ao solo de diferentes doses foi realizado. Foram utilizados dois solos provenientes da região: Argissolo Amarelo Distrófico e

Cambissolo Háplico. Foram determinadas cinco doses, 2, 5, 9, 19 e 37 Mg ha⁻¹ de lodo, baseadas na quantidade de N recomendada para a cultura. Para cada solo foram implementados, ainda, um tratamento com adubação mineral e um controle absoluto (sem lodo e sem outra fonte de adubação). As unidades experimentais consistiram em vasos plásticos de 11 L de capacidade. Foram realizadas análises biométricas, fisiológicas e nutricionais no sorgo sacarino; e nos solos análises físicas e químicas foram realizadas antes e depois da incorporação do lodo. Os resultados do ensaio de adubação foram analisados com auxílio do programa Assistat Beta 7.1. A aplicação de doses de lodo de esgoto nos dois solos da Região se mostrou promissora, indicando que melhorias podem ser advindas dessa aplicação. As alterações observadas nas características físicas e químicas do solo, assim como na absorção de nutrientes, biomassa e fisiologia do sorgo sacarino foram mais expressivas no Argissolo, devido à natureza depauperada desse solo. O lodo caleado proporcionou aumento do pH, saturação por bases, capacidade de troca catiônica, teor de fósforo e cálcio nos dois solos. Os teores de magnésio, com o aumento das doses de lodo, foram reduzidos no solo. Para os dois solos foi observado aumento na macroporosidade, porosidade total e aeração e redução na umidade na Capacidade de Campo, em relação à adubação mineral. A microporosidade do solo foi maior na adubação mineral em relação à adição de lodo, em ambos os solos. Assim como para os teores no solo, a caleação realizada no lodo afetou as relações entre os cátions Ca, K e Mg, causando um desbalanço entre os mesmos e que refletiu além dos teores no solo na absorção dos mesmos pelo sorgo. Ocorreram reduções nos teores de manganês com o aumento das doses de lodo devido ao aumento do pH ocasionado pela caleação do lodo. Para o zinco e cobre as doses de lodo proporcionaram aumento nos níveis de absorção, demonstrando que o lodo atuou como fonte dos mesmos. Para os dois solos foi observado aumento nos valores de fotossíntese, transpiração e teor de clorofila, sendo que para a condutância estomática os tratamentos não foram significativos. Mais estudos se fazem necessários a fim de averiguar a aplicação desse resíduo no campo. Devido à sua composição ele proporcionou ganhos para os solos e para o sorgo sacarino. No entanto, seu potencial de contaminação deve ser levado em consideração, sendo que a utilização do lodo só pode ser feita após higienização desse resíduo.

ABSTRACT

LOUSADA, Lidiane de Lima, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. April, 2015. Agricultural use of urban sewage sludge: changes in physical quality and soil chemistry and development of sweet sorghum
Advisor: Prof. Cláudio Roberto Marciano.

From the collection and treatment of sewage held in STPs (sewage treatment plants), a by-product of this activity is generated, the sewage sludge, rich in nutrients and has been used worldwide in agricultural production. The objective of this study was to evaluate the agricultural use of sewage sludge in the physical and chemical quality of two North Part of Rio de Janeiro State region of soils and development of sorghum species saccharine. This work was carried out from January 2013 to April 2014. Laboratory tests and house-of-vegetation were conducted during this period. The residue used for the analysis came from the ETE-Chatuba donated by Paraíba water utility. The sludge was characterized as their agronomic potential, heavy metals and pathogens. For cleaning and sludge stabilization was chosen liming technique and to determine the appropriate dose of lime was made an incubation test. After the adequacy of the residue an experiment to evaluate the agronomic effects of land application of different doses was performed. Two soils were used from the region: Ultisol Dystrophic and

Cambisol. Were determined five doses, 2, 5, 9, 19, and 37 mg sludge ha⁻¹, based on the amount of N recommended for the crop. For each soil were implemented also a treatment with mineral fertilizer and absolute control (no mud and no other source of fertilization). The experimental units consisted of plastic pots of 11 L capacity. Biometric, physiological and nutritional analyzes were carried out sweet sorghum; and physical and chemical analyzes soils were taken before and after the sludge addition. The results of fertilizer experiment were analyzed using the Beta program Assistat 7.1. The application of sewage sludge doses in two soils of the region was promising, indicating that improvements can be resultant from the application. The observed changes in physical and chemical characteristics of the soil, as well as the absorption of nutrients, biomass and physiology of sweet sorghum was more important in Argisol due to the depleted nature of the soil. The limed sludge provided increasing pH, base saturation, cation exchange capacity, phosphorus and calcium in both soils. The magnesium content, with increasing doses of sludge, soil was reduced. For the two soils was observed increased macroporosity and total porosity and aeration and reduced moisture in the field of capacity in relation to mineral fertilization. The soil was higher microporosity in mineral fertilizer against sludge addition, in both soils. As for contents in the soil, liming held in sludge affected relations between the cations Ca, K and Mg, causing an imbalance between them and reflected in addition to the content in the soil in the absorption thereof by sorghum. There were decreases in manganese content with increasing doses of sludge due to the increase of pH caused by sludge liming. For zinc and copper, the sludge doses provided increased levels of absorption, demonstrating that the sludge served as source thereof. For the two soils was observed increase in photosynthetic rates, transpiration and chlorophyll content, and for the stomatal conductance treatments were not significant. More studies are needed to ascertain the application of this residue in the field. Due to its composition it led to gains for the soil and sweet sorghum. However, its potential for contamination must be taken into account, and the use of the sludge can then only be made after this cleaning residue.

1. INTRODUÇÃO

O aumento dos níveis de urbanização e industrialização tem efeito significativo sobre a quantidade de esgoto produzido em todo o mundo (Frac et al., 2012) e seu descarte em rios e em mananciais de água é um dos principais problemas ambientais enfrentados pelas cidades brasileiras e causador de degradação acelerada das reservas de água (Souto et al., 2005).

Dados do IBGE (2010) apontam que apenas 28,5% dos municípios brasileiros fizeram, no ano de 2008, o tratamento de seu esgoto, o que impacta negativamente na qualidade dos recursos hídricos. Mesmo na Região Sudeste, onde 95,1% dos municípios possuíam coleta de esgoto, menos da metade desses (48,4%) o trataram. É nesta Região, que concentra grande parte da população brasileira, ocasionando grande pressão sobre os recursos hídricos do país, tornando-se urgente a utilização de medidas que venham mitigar esse impacto constante ao meio ambiente.

Nesse contexto, há expressivo aumento nas estações de tratamento de esgoto (ETE's) que têm a função de tratar os mesmos e transformá-los em águas de qualidade compatível com sua destinação prevista, normalmente a devolução aos corpos hídricos da qual foram retiradas. Desse tratamento gera-se um volume grande de lodo de esgoto, no qual são concentradas as impurezas do esgoto tratado, sendo, portanto, o último resíduo do ciclo urbano da água (Fernandes e Silva, 1999).

O lodo de esgoto tem características específicas conforme o tratamento dado ao esgoto doméstico, apresentando variações em sua composição química, física e biológica que dependem de fatores como os hábitos da população e a infraestrutura urbana. Quando processado e tratado de maneira adequada, poderá ser utilizado para diversos fins, como o aproveitamento dos seus nutrientes, principalmente na agricultura, atividades florestais e recuperação de solos degradados (Rigo et al., 2014), o emprego como recurso alternativo no reuso industrial (produção de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmica e produção de cimento) e na conversão em óleo combustível (Bettiol e Camargo, 2000), entre outros.

O uso do lodo na agricultura alia baixo custo e impacto ambiental positivo quando é realizado dentro de critérios seguros. Ambientalmente é a solução mais correta, pois promove o retorno dos nutrientes ao solo, colaborando para o fechamento no ciclo dos elementos (Ricci et al., 2010; Ferreira e Andreoli, 1999). Para o Brasil, particularmente, onde é importante a reposição do estoque de matéria orgânica dos solos devido ao predomínio de argilas de baixa atividade química resultantes do intenso intemperismo nas condições climáticas, a utilização do lodo, estabilizado e tratado, é uma alternativa promissora (Ferreira e Andreoli, 1999). Outro aspecto importante do uso agrícola de lodo de esgoto está associado a seu papel de condicionador de solos, promovendo a melhoria de sua estrutura (Frac et al., 2012; Quintana et al., 2011; Lemainski e Silva, 2006; Barbosa e Tavares Filho, 2006; Guedes et al., 2006), o que é função principalmente do conteúdo orgânico do resíduo (Simonete et al., 2003).

Apesar de todas as vantagens, o lodo de esgoto pode apresentar em sua composição elementos tóxicos e agentes patogênicos ao homem (Bettiol e Camargo, 2000). Os principais riscos associados à utilização agrícola do lodo referem-se à questão dos metais pesados, aspectos sanitários, micropoluentes orgânicos e nitrogênio. Tanto os metais quanto os agentes patogênicos, como ovos de helmintos, esporos de fungos e colônias de bactérias, tendem a coprecipitar com o esgoto e se concentrar no lodo (Ferreira e Andreoli, 1999).

O risco sanitário do uso do lodo pode ser minimizado por meio da adoção de técnicas de higienização, que proporcionem a eliminação dos organismos patogênicos presentes. Dentre os processos de higienização e estabilização do lodo de esgoto, a caleação é um dos mais difundidos, o que é decorrente,

principalmente, do seu baixo custo e facilidade de aplicação (Andreoli, 2001). Mesmo com a higienização, a utilização de lodo no cultivo de plantas que não sejam para o consumo direto dos seres humanos ou em que a parte consumida não entre em contato com o solo, como as culturas do milho, girassol, sorgo e plantas florestais, ou para recuperação de áreas degradadas e fruticultura (Rigo et al., 2014) representa uma alternativa mais viável para o uso deste resíduo na atividade agrícola da região.

No contexto da produção de biocombustíveis, o sorgo sacarino vem se destacando mundialmente como relevante opção de matéria-prima para produção de etanol, tanto do ponto de vista agrônomo quanto industrial (Fernandes, 2013). Apresenta-se como alternativa ideal para o complemento na produção de etanol durante o período de entressafra da cana-de-açúcar, quando a cana-de-açúcar ainda se encontra em estado de desenvolvimento vegetativo e possui pouca concentração de açúcares, permitindo ampliar o período de uso das usinas de etanol em três meses (Pereira Filho et al., 2013). Estudos com sorgo sacarino têm sido realizados na Região Norte Fluminense (Fernandes et al., 2014), porém ainda são necessárias informações sobre aspectos relacionados a nutrição e desenvolvimento da cultura nas condições locais, com o intuito de permitir que ela expresse plenamente seu potencial produtivo.

Tendo em vista que a vocação agrícola da Região Norte Fluminense tem sido historicamente o plantio de cana-de-açúcar, a utilização do sorgo sacarino aliada à adubação com o lodo de esgoto disponível na região proporcionaria a otimização das áreas agrícolas, bem como a adição de matéria orgânica aos solos utilizados em monocultivo.

Pelo exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos do uso agrícola do lodo de esgoto doméstico na nutrição e crescimento do sorgo sacarino na Região Norte Fluminense e as alterações nos atributos do solo decorrentes de sua aplicação. Paralelamente, objetivos específicos foram estabelecidos: (i) determinação da dose de cal para a higienização e estabilização do lodo de esgoto através da técnica de caleação; (ii) avaliação do potencial agrônomo do lodo de esgoto caleado, tanto pela presença de matéria orgânica e nutrientes de plantas como pela presença de metais pesados e patógenos; (iii) avaliação dos atributos físicos e químicos dos dois solos antes e após a incorporação do lodo; e

(iv) avaliação das variáveis biométricas, nutricionais e fisiológicas de plantas de sorgo sacarino adubadas com doses crescentes de lodo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – Lodo de esgoto

2.1.1 – *Considerações gerais*

A preocupação com o tratamento dos esgotos surgiu primeiramente na Inglaterra, após nova epidemia de cólera ocorrida em 1848, com 25.000 vítimas fatais. Esse país, devido a pouca extensão de seus rios e ao crescimento acelerado de algumas cidades, foi um dos primeiros a sofrer as consequências da poluição hídrica, decorrente do lançamento dos esgotos (sem tratamento) nos corpos d'água. Foi também pioneiro na promulgação das primeiras leis de saneamento e saúde pública (Metcalf e Eddy, 1991).

Pode-se afirmar que a partir daí os países desenvolvidos, não só a Inglaterra, mas a maioria dos outros países europeus, os EUA, o Canadá, a extinta União Soviética e o Japão, começaram a tratar os esgotos de suas cidades. Nas cidades brasileiras, salvo alguns casos isolados, somente a partir da década de 70 começou a ocorrer certo avanço nessa área, ainda em poucas cidades (Siqueira, 2001).

Ainda hoje, a maior parte do esgoto gerado nos centros urbanos e nas cidades às margens dos rios é inconvenientemente lançada nesses corpos hídricos. Legislações mais rigorosas e que regulamentam a descarga de efluentes

e esgoto nos recursos hídricos têm acelerado o aumento no número de estações de tratamento de esgoto (ETE). Como o esgoto é tratado, ele atravessa uma série de processos que reduzem as concentrações dos materiais orgânicos mais facilmente degradáveis. O resíduo sólido insolúvel remanescente após tratamento de esgoto é referido como biossólido, resíduos de águas residuais domésticas, ou lodo de esgoto (Singh e Agrawal, 2008).

A disposição final dos resíduos das ETEs é uma crescente preocupação mundial, com reflexos na disponibilidade e na qualidade da água para consumo humano e animal e nas atividades econômicas. O destino final adequado do lodo é um fator fundamental para o sucesso de um sistema de saneamento. É muito comum que os projetos de ETEs omitam o tema da gestão de resíduos, fazendo com que esta complexa atividade seja realizada sem planejamento pelos operadores das estações, muitas vezes em condições emergenciais. Por esta razão, alternativas inadequadas de disposição final têm sido adotadas, comprometendo os benefícios dos investimentos realizados nos sistemas de esgotamento sanitário (Sperling e Andreoli, 2001).

Os esgotos costumam ser classificados em dois grupos principais: domésticos e industriais. Os primeiros são constituídos essencialmente de despejos domésticos, uma parcela de águas pluviais e águas de infiltração. Eventualmente uma parcela de despejos industriais é misturada ao esgoto doméstico. Os esgotos domésticos ou domiciliares provêm principalmente de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas, ou qualquer dispositivo de utilização da água para fins domésticos. Os esgotos industriais, extremamente diversos, provêm de qualquer utilização da água para fins industriais, e adquirem características próprias em função das características da indústria, do sistema de tratamento utilizado pela empresa e do processo industrial empregado (Sanepar, 1997).

O lodo de esgoto tem características específicas conforme o tratamento dado ao esgoto doméstico, apresentando variações em sua composição química, física e biológica que dependem de fatores como os hábitos da população e a infraestrutura urbana. As alternativas de processamento e destino final, quando realizadas dentro da ótica sustentável, devem se preocupar em produzir um lodo de melhor qualidade, reduzindo o percentual de patógenos e metais e reciclando

ao máximo o lodo produzido (Tsutiya 2000). Quando processado, tratado e utilizado de uma maneira adequada, poderá ser utilizado para o aproveitamento dos seus nutrientes, principalmente na agricultura, atividades florestais e recuperação do solo degradado (Rigo et al., 2014).

2.1.2 – Higienização e estabilização do lodo de esgoto

A estabilização do lodo é empregada principalmente para reduzir substancialmente o número de organismos patogênicos e, desse modo, minimizar os riscos a saúde, para o controle de odores ofensivos e para diminuir a possibilidade de decomposição posterior (Faria, 2011; Chagas, 2000). É um passo importante do tratamento de esgotos e influencia muitas características do lodo.

A caleação é uma das alternativas de estabilização mais utilizadas devido ao seu baixo custo e à facilidade operacional (Matos e Matos, 2012). Além de reduzir os patógenos em níveis permitidos e eliminar odores desagradáveis, esta técnica torna o lodo com pH básico e, por esta razão, atribui ao resíduo o papel de corretivo da acidez do solo. Como a maior parte dos solos brasileiros é ácida, faz-se necessário a aplicação de corretivos para aumentar o seu potencial produtivo podendo ser realizado com o lodo caleado, concorrendo para aumento de sua fertilidade (Matos e Matos, 2012).

Matos e Matos (2012) procuraram obter a dose de cal hidratada ideal para ser utilizada na higienização do lodo de esgoto doméstico produzido na ETE José Cirilo, de Muriaé-MG. Os mesmos encontraram que a dose de cal deve ser de 29,1 kg m⁻³, considerando-se um tempo de reação de 2 h, para atender o estabelecido pela legislação, sendo este considerado suficiente para redução de patógenos a limites seguros.

A compostagem também se apresenta como uma alternativa eficiente na estabilização do lodo. A alta concentração de bactérias que o processo favorece e que são antagônicas aos agentes patogênicos presentes no lodo garante que não ocorra a reinfestação no resíduo armazenado (Mininni e Santori, 1987).

Outra técnica utilizada para higienização do lodo, e que é recomendada e descrita nas normas do CONAMA, é a solarização. Eiras (2014) utilizando lodo de esgoto doméstico de uma estação de Campos dos Goytacazes-RJ, em

experimento de adubação do feijão caupi, utilizou a técnica de solarização para higienizar o resíduo obtendo êxito. No entanto, a autora não relata o tempo de incubação e o efeito da técnica sobre o solo e a espécie utilizada.

2.1.3 – Uso agrícola do lodo de esgoto doméstico

A disposição de esgotos na agricultura é uma prática antiga, sendo realizada na China, e frequentemente utilizada em países como Inglaterra (1800) e Prússia (desde 1560) (Rigo et al., 2014).

A aplicação do lodo de esgoto em solo agrícola, em decorrência da riqueza da matéria orgânica e nutrientes dessa matriz, tem sido a maneira mais difundida de disposição em diversos países do mundo. Estima-se que nos EUA 54% do lodo de esgoto produzido são aplicados em solo agrícola, enquanto no Reino Unido são 64%, na França e Irlanda 62%, na Dinamarca 55%, em Luxemburgo 47%, na República Checa 45%, na Bulgária 40%, na Bélgica e Itália 32%, na Alemanha 30%, na Hungria 26%, na Polônia 14%, e na Áustria e Finlândia 12% (Matta, 2011). Segundo Alméri (2010), estima-se que no Brasil apenas 3% do lodo de esgoto gerado seja aplicado em solo agrícola.

Estudos sobre efeitos de longo prazo da aplicação de lodo de esgoto aos solos nas condições edafoclimáticas brasileiras ainda são incipientes para servir como base para uma norma nacional. Entretanto, como o uso agrícola do lodo de esgoto já é uma prática utilizada em algumas regiões do País, a falta de regulamentação poderia resultar em danos ambientais graves, fato esse que justifica a normalização com base em resultados preliminares e normas de outros países (Pires, 2006).

No Brasil, a reciclagem agrícola do lodo de esgoto segue as determinações da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 375/06 (BRASIL, 2006). Nesta resolução são estabelecidos critérios para a determinação da taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto, sendo determinado que tal aplicação (em $t\ ha^{-1}$) não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura (em $kg\ ha^{-1}$), segundo a recomendação agrônômica oficial do Estado, e o teor de nitrogênio disponível no lodo de esgoto ou produto derivado (em $kg\ t^{-1}$). Outra determinação importante é em relação ao pH, de modo a garantir que o pH final da mistura solo-lodo de esgoto não

ultrapasse o limite de 7,0. Estudos indicam que o lodo é um produto rico em matéria orgânica e nutrientes, em especial o N e o P, com potencial para aproveitamento agrícola, isolado ou em combinação com adubos minerais, além de atuar como condicionador do solo, melhorando sua estrutura (Frac et al., 2012; Quintana et al., 2011; Lemainski e Silva, 2006; Barbosa e Tavares Filho, 2006; Guedes et al., 2006).

A disposição do lodo de esgoto, estabilizado e tratado, em solos tem se mostrado uma alternativa viável, uma vez que pode ser feita com baixo custo e sem provocar impactos negativos, desde que realizada dentro de critérios seguros, contribuindo também para o restabelecimento das características originais de alguns solos que sofreram processos de degradação. A aplicação do lodo no solo não é um processo simples, dada a grande variação na sua composição e a complexidade dos diferentes tipos de solo. Estudos que indicam o efeito da disposição desse resíduo no solo, nos diferentes componentes do sistema solo-planta-água, são ferramentas importantes para o uso sustentável (Ricci et al., 2010).

A utilização do lodo de esgoto na agricultura é uma alternativa importante no que diz respeito ao destino final desse produto, tendo em vista que a produção de resíduos é proporcional ao crescimento populacional. Conhecer a origem e as características físicas, químicas e biológicas que fazem parte do lodo de esgoto é de extrema importância, principalmente para utilização agrícola. A aplicação desse resíduo deve ser avaliada em diversos ambientes e condições de solo a fim de gerar informações sobre os impactos ambientais que poderão ocorrer.

2.1.3.1 – Restrições ao uso de lodo de esgoto na agricultura

O lodo produzido em estações de tratamento de esgotos sanitários pode apresentar características físicas, químicas e microbiológicas bastante diferenciadas, dependendo das características do esgoto bruto e dos processos de tratamento empregados (Andreoli et al., 2001a). Segundo Paraíba e Saito (2005), além de poluentes como microrganismos e metais pesados, substâncias químicas sintéticas, provenientes de diversas fontes, podem estar presentes na solução ou podem ser sorvidas nos sólidos de lodo de esgoto. A ocorrência de

poluentes orgânicos em lodo de esgoto tem crescido em virtude do aumento da produção de substâncias sintéticas, de diversas naturezas, pela indústria química.

Diversos países possuem normas técnicas regulamentando a maneira adequada de utilizar lodo de esgoto na agricultura. Nos Estados Unidos, o órgão responsável pelo controle de impactos ambientais, a United States Environmental Protection Agency (USEPA), desenvolveu normas regulamentando o uso e a disposição seguros de lodo de esgoto, incluindo o uso agrícola. A Legislação Federal dos EUA encoraja o uso racional do resíduo, dispensando-o da jurisdição e regulamentação relativas a resíduos perigosos, mas assegurando-se da proteção à saúde humana e ao ambiente de qualquer efeito adverso previsto, em função da presença de poluentes nesses resíduos. O Código Federal de Regulamentações dos EUA, Título 40, Partes 257, 403 e 503 refere-se aos “Critérios para a utilização e disposição de lodo de esgoto” e foi finalizado em 1993 (Pires, 2006).

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 375/2006 foi criada com o intuito de estabelecer diretrizes para reciclagem agrícola do lodo de esgoto. Os parâmetros estabelecidos nesta Resolução foram determinados com base nas legislações dos Estados Unidos (USEPA) e União Europeia e nela são encontrados os níveis permitidos de substâncias inorgânicas, orgânicas e microrganismos patogênicos para sua utilização agrícola. Nesta Resolução também são apresentados os responsáveis pelas etapas de gerenciamento do lodo, como a UGL, que é a unidade responsável pelo recebimento, processamento, caracterização, transporte, destinação do lodo de esgoto produzido por uma ou mais estações de tratamento de esgoto sanitário e monitoramento dos efeitos ambientais, agrônômicos e sanitários de sua aplicação em área agrícola.

A concentração de patógenos no esgoto doméstico varia, principalmente, em função do estado de saúde da população que o produz (Mininni e Santori, 1987). A maioria dos micro-organismos que estão presentes no esgoto e que não são eliminados durante seu processo de tratamento acaba se acumulando no lodo, conferindo ao mesmo um elevado número de micro-organismos patogênicos que necessita ser eliminado de forma adequada (Capizzi-Banas et al., 2004; Fukushi et al., 2003).

A presença de patógenos no lodo é indesejada, quer pelos riscos às pessoas que o manipulam, quer pela sobrevivência dos micro-organismos

patogênicos após sua aplicação ao solo agrícola e contaminação das partes das culturas que mantêm contato direto com o lodo. Entre os patógenos, são particularmente importantes os estreptococos, *Salmonella* sp., *Shigella* sp., larvas e ovos de helmintos, protozoários (cistos) e vírus (enterovírus e rotavírus). Enquanto alguns destes patógenos não suportam o ambiente edáfico por mais de algumas horas, outros, como ovos de helmintos, podem permanecer viáveis por vários anos. No Brasil, comumente os agentes patogênicos constituem o elemento de limitação ao uso do lodo na agricultura. Porém, é o fator mais facilmente controlado através da adoção de soluções técnicas de higienização do lodo que levem à eliminação do patógeno, como a caleação ou a compostagem (Ferreira e Andreoli, 1999).

A Resolução CONAMA nº375/2006 define parâmetros quanto à concentração de patógenos para a utilização do biossólido na agricultura: coliformes termotolerantes (< 1000 NMP por g de sólidos totais, sendo NMP: “número mais provável”), ovos viáveis de helmintos (< 0,25 ovo por g de sólidos totais), *Salmonella* (ausência em 10 g de sólidos totais) e vírus (< 0,25 UFF por g de sólidos totais, sendo UFF: “unidade formadora de foco”).

A legislação estabelece ainda, procedimentos para a redução significativa de patógenos presentes no lodo, caso ele não se enquadre nos parâmetros estabelecidos acima, são eles:

- a) digestão aeróbia - a ar ou oxigênio, com retenções mínimas de 40 dias a 20°C ou por 60 dias a 15°C;
- b) secagem em leitos de areia ou em bacias, pavimentadas ou não, durante um período mínimo de 3 meses;
- c) digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias a 35-55°C ou de 60 dias a 20°C;
- d) compostagem por qualquer um dos métodos citados anteriormente, desde que a biomassa atinja uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período; e
- e) estabilização com cal, mediante adição de quantidade suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas.

Deve-se levar em consideração que o lodo pode apresentar características prejudiciais à saúde humana, contaminando o solo e seus recursos hídricos. Sendo assim, este resíduo deve ser adequado em níveis seguros e permitidos quanto à sua qualidade microbiológica ou, dependendo de sua origem (proveniente de atividades industriais), quanto aos teores de metais pesados, para que não se constitua em risco ao homem e meio ambiente.

2.1.3.2 – Uso de lodo de esgoto doméstico: alterações na qualidade física e química do solo

A definição da degradação do solo está associada à própria definição de qualidade do solo, ou seja, à medida que as características são alteradas negativamente, estabelece-se um processo de degradação (Alves e Souza, 2008). A degradação química do solo, segundo Bonini (2015), resulta na queda de sua fertilidade, ocasionada pela redução dos teores e da qualidade da matéria orgânica e pela redução dos teores de macro e micronutrientes. Comumente, há aumento dos teores de Mn e Al, devido à redução do pH. Os referidos atributos constituem indicadores importantes da qualidade do solo.

O solo submetido a um manejo inadequado tende a perder a estrutura original, pelo fracionamento dos agregados em unidades menores, com conseqüente redução no volume de macroporos e aumento no volume de microporos e na densidade do solo, processo que resulta na degradação de suas propriedades físicas. Assim, a estabilidade dos agregados pode ser utilizada como indicadora da degradação ou da recuperação da qualidade do solo (De Maria et al., 2007).

O alto conteúdo de matéria orgânica faz do lodo de esgoto um resíduo com enorme potencial para utilização agrícola, principalmente considerando sua aplicação em regiões tropicais, cujos solos apresentam-se geralmente em estágio avançado de intemperismo, com predomínio na fração argila de óxidos de ferro e alumínio e caulinita que possuem baixa capacidade de troca catiônica (Nascimento et al., 2014).

O lodo de esgoto pode melhorar os atributos físicos do solo, pois favorece a formação de agregados, com a conseqüente melhoria na infiltração da água no perfil, a retenção de água e a aeração do solo, e causa reflexos ambientais

imediatos, como a redução da erosão (Souza et al., 2005). A adição de material orgânico no processo de recuperação do solo pode promover uma melhoria na sua estrutura, alterando favoravelmente a proporção de agregados estáveis em água (Campos et al., 2011).

Alves et al. (2007), Campos et al. (2011) e Bonini et al. (2015) realizaram no Município de Selvíria-MS, diferentes estudos em um Latossolo Vermelho distrófico degradado, remanescente de uma área de onde se retirou solo para terraplanagem e fundação da construção da Usina Hidroelétrica de Ilha Solteira, SP. Alves et al. (2007) objetivaram recuperar as propriedades físicas deste solo com a utilização de adubação verde, lodo de esgoto e plantas da espécie gonçalo-alves; como indicadores de qualidade física utilizaram a densidade do solo e a infiltração de água. Os autores observaram que ocorreram melhorias na qualidade do solo com o seu preparo e adição de lodo de esgoto e adubos verdes, e os indicadores utilizados (densidade e infiltração de água do solo) foram adequados para a avaliação dessas melhorias; e a combinação de lodo de esgoto mais braquiária proporcionou maior crescimento da espécie gonçalo-alves. Campos et al. (2011) objetivaram definir a interferência do lodo de esgoto na recuperação dos atributos físico-hídricos do solo. Os tratamentos utilizados foram vegetação natural de Cerrado; solo degradado, sem tratamento para recuperação; solo degradado, cultivado com eucalipto e braquiária, sem aplicação de lodo de esgoto e adubo mineral; solo degradado, cultivado com eucalipto e braquiária com adubação mineral de acordo com a necessidade da cultura e a análise do solo; solo degradado, cultivado com eucalipto e braquiária com uso de 30 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca); solo degradado, cultivado com eucalipto e braquiária com uso de 60 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca). Os autores concluíram que os tratamentos com adição de adubação mineral e orgânica estão agindo de forma semelhante para a recuperação dos atributos físico-hídricos e o teor de matéria orgânica, sendo que o lodo de esgoto está sendo mais promissor na camada superficial do solo. Segundo os autores, para solos degradados pela construção de obras civis, o lodo é viável na recuperação de suas propriedades físico-hídricas. Bonini et al. (2015) analisaram a recuperação dos atributos químicos do solo utilizando lodo de esgoto e adubação mineral. Os autores concluíram que o lodo de esgoto influenciou positivamente os atributos químicos do solo estudados, sendo que os teores de fósforo, matéria orgânica (MO) e

saturação por bases foram bons indicadores da qualidade química do solo. Segundo os autores a dose de 60 Mg ha^{-1} foi o tratamento com melhor resultado, indicado pelo incremento de MO e bases trocáveis do solo, enquanto a testemunha, com vegetação nativa, obteve os melhores resultados para os demais atributos do solo.

Em um experimento com duas aplicações sucessivas de doses crescentes de lodo de esgoto e composto de lixo urbano em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar, Marciano et al. (2001) obtiveram resultados com um infiltrômetro de tensão e verificaram que após a segunda aplicação dos resíduos a condutividade hidráulica do solo saturado aumentou em relação à testemunha, o que foi associado ao aumento do volume de poros, principalmente os de maior tamanho. Para o solo não saturado (sob tensões de 0,25, 0,5 e 1,0 kPa) já na primeira aplicação dos resíduos houve efeito depressivo sobre a condutividade hidráulica, o que foi justificado pela redução da área disponível ao fluxo e aumento na tortuosidade do filme de água que recobre as partículas do solo em função do esvaziamento dos poros maiores, o que limita a movimentação da água nessas condições.

Oliveira et al. (1995) estudaram os efeitos da aplicação de doses de lodo de esgoto, complementadas ou não com nitrogênio e/ou potássio, sobre parâmetros de fertilidade do solo, absorção de macronutrientes e produção de matéria seca por plantas de sorgo granífero cultivadas em um Latossolo Vermelho Escuro. Os autores observaram aumento nos teores de fósforo e matéria orgânica do solo quando a maior dose foi aplicada (20 Mg ha^{-1}). Para os outros parâmetros do solo avaliados não foi observada diferença entre a adubação mineral e doses de lodo.

Oliveira et al. (2002) objetivaram avaliar os efeitos causados por duas aplicações sucessivas de doses crescentes de lodo de esgoto sobre os teores de carbono orgânico (C-org), condutividade elétrica (CE), pH e CTC ao pH atual (CTC efetiva) de um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar. Os autores concluíram que, em ambos os anos agrícolas estudados, as aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto promoveram aumentos na CE do solo, porém não houve efeito cumulativo sobre esta variável na camada 0-20 m em decorrência da segunda aplicação de lodo, diferente do que ocorreu nas camadas mais profundas do solo, onde o aumento da CE indica que as chuvas

promoveram a lixiviação de sais. Os autores observaram aumento nos teores de C-org com as doses de lodo, inclusive com efeito cumulativo na segunda aplicação. Observaram ainda que os valores de pH do solo e da CTC efetiva nos tratamentos com lodo de esgoto foram maiores que na testemunha, mas não sofreram efeito cumulativo da segunda aplicação e variaram pouco entre as doses, ficando, na maior parte do período experimental, o pH entre 6,0 a 7,4 e a CTC efetiva entre 43 e 45 $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$, onde concluíram que as alterações na CTC foram mais bem explicadas pelas variações no pH do que pelos acréscimos de c-orgânico.

Araújo et al. (2009) avaliaram os efeitos da aplicação de lodo de esgoto e da adubação mineral nitrogenada em um Argissolo, sobre a fertilidade do solo, a atividade microbiana, o rendimento de matéria seca e o fornecimento de nutrientes à cultura da braquiária. Os autores observaram que o menor teor foliar de fósforo foi apresentado por plantas que receberam apenas adubação mineral nitrogenada, enquanto houve decréscimo dos teores de enxofre, ferro e boro nos tratamentos que receberam as maiores dosagens de lodo. Nos tratamentos com lodo de esgoto, os teores foliares de fósforo aumentaram gradativamente, mas, mesmo na maior dose de lodo, não diferiu significativamente do controle. Observaram também que, aos 100 dias após a semeadura da braquiária, o tratamento com a maior dose de lodo (que correspondeu à aplicação de 80 mg dm^{-3} de N ao solo, equivalente a quatro vezes a exigência da cultura) proporcionou aumentos significativos na produção de massa seca da parte aérea.

2.2 – Sorgo sacarino

2.2.1 – Aspectos gerais

O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) é o quinto cereal mais plantado no mundo, vindo logo depois do trigo, arroz, milho e cevada. No Brasil, tem despontado como excelente alternativa para as diversas regiões brasileiras (Ribeiro Filho et al., 2008). É uma planta de origem africana, da mesma família botânica do milho, que é utilizada na alimentação animal, principalmente de bovinos, na forma de feno e de silagem (sorgo forrageiro). Sua estrutura radicular é composta por raízes que, por possuir sílica na endoderme, grande quantidade de pelos absorventes e altos

índices de lignificação de periciclo, conferem à cultura maior tolerância à seca. O caule, por sua vez, é dividido em nós e entrenós, e as folhas ocorrem ao longo de toda a planta. Sua inflorescência é uma panícula e seu fruto é uma cariopse ou grão seco (Diniz, 2010). O grão do sorgo (sorgo granífero não taninoso) atende à alimentação animal e humana. Já o sorgo granífero taninoso pode, sem problemas, ser utilizado na alimentação de poligástricos.

Basicamente, existem cinco tipos de sorgo – granífero, sacarino, vassoura, forrageiro e sudanense. O sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench) apresenta porte alto, com altura de planta superior a dois metros, caracterizado, principalmente, por apresentar colmo doce e succulento como o de cana-de-açúcar. A panícula é aberta e produz poucos grãos (sementes) (Silva et al., 2012).

Iniciativas de introdução desta gramínea no Brasil foram realizadas e contaram com os esforços de institutos de pesquisa e universidades, sobretudo a partir da década de 50. A Embrapa iniciou um programa de melhoramento de sorgo em meados da década de 70, acreditando no potencial desta cultura no país, e hoje a área plantada de sorgo no Brasil é de aproximadamente 1,5 milhões de hectares.

O sorgo sacarino se assemelha à cana-de-açúcar, uma vez que o armazenamento de açúcares se localiza nos colmos, além de fornecer quantidade de bagaço suficiente para geração de vapor para a operação industrial. Entretanto, ele difere de maneira acentuada da cana-de-açúcar pelo fato de ser cultivado a partir de sementes e apresentar um ciclo vegetativo bem mais curto, de 120 a 130 dias. Apresenta ainda como vantagem a produção de grãos que podem ser utilizados para a produção animal ou outras finalidades (Teixeira et al., 1999). No entanto, como o sorgo e a cana-de-açúcar pertencem à mesma família, *Poaceae*, tem-se como desvantagem a incidência das mesmas pragas e doenças, não havendo uma rotação de cultura.

Tendo em vista as características apresentadas acima, o sorgo sacarino representa uma alternativa promissora para a produção de etanol no Brasil, na época de entressafra da cana-de-açúcar. Plantado entre os meses de setembro e dezembro (dependendo da região produtora), ele pode fornecer matéria-prima de qualidade entre os meses de janeiro a abril, época em que as usinas de beneficiamento da cana ficam ociosas e a produção de etanol diminui consideravelmente no país. Sendo o processamento dos colmos o mesmo já

utilizado para a cana-de-açúcar, o sorgo sacarino representa uma alternativa importante para plantio em áreas de reforma de canaviais, sem a necessidade de ocupação de novas áreas (Landau e Schaffert, 2011).

2.2.2 – Aspectos nutricionais do sorgo sacarino

Informações acerca das exigências nutricionais do sorgo sacarino ainda são escassas e a maioria delas se refere à época do início da introdução da cultura no Brasil, onde as variedades utilizadas eram provenientes dos Estados Unidos (Malavolta et al., 1979; Rosolem e Malavolta, 1981; Lima e Malavolta, 1982; Coutinho et al., 1987).

Sendo assim, o estudo do acúmulo de nutrientes em função da idade das plantas é de fundamental importância para auxiliar na definição das quantidades e épocas de aplicações de fertilizantes, contribuindo para o aumento da eficiência no manejo da cultura proporcionando ganhos em produtividade e na redução dos custos de produção, através da utilização racional e eficiente dos insumos (Soares et al., 2014).

O sorgo sacarino responde intensamente a incrementos no suprimento de água e à adubação, alcançando ou superando, em alguns casos, as produções de massa seca e de grãos normalmente obtidas com a cultura do milho (Coelho et al., 2011). Assim, quando não é possível usar irrigação, deve-se buscar o condicionamento do perfil do solo em subsuperfície, principalmente com relação ao fornecimento de cálcio e redução da toxidez por alumínio por meio da calagem e gessagem. Essa estratégia torna o ambiente edáfico favorável ao maior aprofundamento do sistema radicular, amenizando os efeitos dos períodos de déficit hídrico sobre a produtividade (Coelho, 2011).

O sorgo sacarino tem recomendações especiais porque todo material é cortado e removido do campo antes que a cultura complete seu ciclo. Com isso, a remoção de nutrientes é muito maior do que aquela para a cultura que tem como principal objetivo a produção de grãos (Coelho, 2011). Segundo Rosolem et al. (1982), com respeito a respostas e adubações na cultura do sorgo sacarino, embora os teores de sacarose, açúcares redutores, açúcares totais e fibra sejam características importantes, a produção de colmos parece ser de maior significância para a produção de álcool por hectare. Estas considerações

permitem inferir que a produção de álcool por área é função principalmente da quantidade de caldo produzido, desde que a cultivar apresente as características tecnológicas dentro de um limite razoável.

Rosolem et al. (1982) estudaram os efeitos das adubações com nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) e micronutrientes no teor de sacarose, açúcares redutores, fibra e produção de álcool do sorgo sacarino (cvs Brandes e Rio) em dois solos (Latosolo Roxo e Latosolo Vermelho-Escuro textura média) localizados no Município de Barra Bonita, Estado de São Paulo. A aplicação dos adubos fez com que fosse diminuído o brix na cultivar Brandes, ao contrário do que aconteceu para a cultivar Rio, onde a aplicação de N fez com que fosse aumentado seu brix. Em relação à produção de álcool por hectare, os autores observaram que a cultivar Brandes respondeu significativamente ao N no Latosolo Roxo e ao N e K no Latosolo Vermelho-Escuro, ao passo que a cultivar Rio não apresentou respostas significativas às adubações. Concluíram que as produções de álcool foram explicadas principalmente pelas produções de colmos e pelos teores de sacarose encontrados nos colmos.

Lima e Malavolta (1982) avaliaram a eficiência do fosfato de Catalão (fosfato natural produzido pela FOSFAGO) em relação ao superfosfato triplo em função do tipo de solo, calagem, localização, dose e efeito residual (em três cultivos sucessivos); em plantas de sorgo sacarino em condições controladas (casa de vegetação) usando solos da região de cerrado. Os autores observaram que nos tratamentos com calagem a absorção de Ca foi sempre maior do que naqueles sem calagem. Nos tratamentos sem calagem, com superfosfato, ocorreram diferenças na absorção de Ca em relação às doses de adubo empregadas, evidenciando o aproveitamento do Ca do fertilizante. A eficiência relativa nos tratamentos com calagem foi muito superior àqueles sem calagem, mostrando o efeito do Ca como nutriente e da calagem aumentando a disponibilidade do P. Sendo assim, os autores concluíram que a aplicação do Ca via calagem favoreceu a absorção do P.

Alves et al. (1988) realizaram experimento objetivando aferir a distribuição do K, Ca e Mg nas várias partes do sorgo sacarino e estimar as exigências da espécie com relação a esses nutrientes, além de averiguar a existência de efeitos antagônicos do K sobre o Ca e Mg acumulados nas plantas e "consumo de luxo" de potássio. Os autores obtiveram as seguintes conclusões: o K acumula-se em

maior quantidade nos colmos, enquanto que o Ca e o Mg nas folhas; o K, dependendo de dose, exerce efeitos sinérgicos ou antagônicos sobre as quantidades de Ca e Mg das folhas; há um acentuado "consumo de luxo" de K pelo sorgo sacarino, sendo o colmo o principal órgão acumulador; e para evitar um esgotamento do K do solo, as folhas devem ser deixadas na lavoura ou o vinhoto, rico em K, deve ser colocado nas áreas exploradas.

Leão et al. (2011) avaliaram o efeito de diferentes doses de fósforo aplicado ao solo no acúmulo de macro e micronutrientes, na parte aérea de plantas de sorgo granífero submetidas ao estresse hídrico. Os autores observaram que a adubação fosfatada proporcionou aumento na absorção de N, P, Ca, S, Mn e Fe e reduziu a absorção de Zn. O fornecimento de P acima de 125 mg dm⁻³ foi prejudicial às plantas, por promover a redução no acúmulo de macronutrientes.

Soares et al. (2014) procuraram determinar em função do tempo o acúmulo de matéria seca e macronutrientes em quatro cultivares de sorgo sacarino. Os autores observaram que os colmos acumulam maior percentual de K, Ca, Mg e S e os grãos maior de N e P. Para todas as cultivares avaliadas a ordem decrescente de exportação de macronutrientes, considerando apenas a colheita dos colmos, é: K>N>Ca>Mg>S>P. Os autores concluíram que há diferença entre as cultivares de sorgo sacarino quanto ao acúmulo e à exportação de macronutrientes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Local de realização do trabalho e materiais utilizados

O presente trabalho foi realizado no período de janeiro de 2013 a fevereiro de 2015. Os ensaios e experimentos foram conduzidos em casa de vegetação localizada na Unidade de Apoio à Pesquisa Vegetal (UAP-Vegetal) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), situada na cidade de Campos dos Goytacazes, RJ.

Segundo o sistema Köppen, o clima da Região Norte Fluminense é classificado como Aw, isto é, clima quente e úmido, com temperatura do mês mais frio superior a 18 °C e temperatura média anual em torno de 24 °C. A precipitação anual média está em torno de 868,87 mm, concentrando-se nos meses de outubro a março (André et al., 2008).

Para a realização do trabalho foram utilizados dois solos típicos da Região Norte Fluminense, um Argissolo Amarelo (do Colégio Agrícola Antônio Sarlo) e um Cambissolo Háptico (da UAP-Vegetal da UENF).

O lodo de esgoto foi cedido pela concessionária Águas do Paraíba, de Campos dos Goytacazes, RJ. Os solos e lodo de esgoto terão os aspectos relativos à sua coleta, preparação e caracterização descritos nos tópicos subsequentes.

3.2 - Ensaio 1: Adequação do lodo de esgoto para uso agrícola

3.2.1 - Coleta, caracterização e higienização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado neste experimento foi cedido pela concessionária Águas do Paraíba, que, além do fornecimento de água, realiza a coleta e o tratamento de esgoto em Campos dos Goytacazes, RJ. No município existem seis ETEs, sendo que apenas a ETE-Chatuba apresenta tratamento terciário (remoção de cerca de 98% de impurezas do efluente que é lançado no corpo hídrico após tratamento). Sendo assim, optou-se por utilizar o lodo desta estação, pois a maior eficiência no tratamento possibilita que uma maior carga de nutrientes seja retirada da água e permaneça no lodo, o que seria vantajoso do ponto de vista agrônomo.

Na ETE-Chatuba, em uma das últimas etapas para obtenção do lodo, já durante processo de centrifugação para redução de seu grau de hidratação, é realizada a adição de cal hidratada (cerca de 1% com base no peso seco do lodo) e de polímero espessante (com finalidade de deixar o lodo pastoso). Na sequência o lodo é depositado no leito de secagem, ao ar livre, onde fica até ser levado ao aterro sanitário. Para a realização do presente trabalho, o lodo foi coletado imediatamente após sua chegada ao leito de secagem, tendo sido acondicionado em dois recipientes plásticos de 70 L cada, com tampa, sendo então transportado para uma casa de vegetação localizada na UAP-Vegetal da UENF/CCTA, sob responsabilidade do Laboratório de Solos (LSOL).

Uma amostra do lodo foi coletada e levada ao LSOL, onde foram realizadas as determinações de pH e da umidade do lodo, em triplicata, por meio da pesagem de amostras antes e após secagem a 65 °C em estufa por 72 horas. As análises microbiológicas foram realizadas no Laboratório de Sanidade Animal (LSA) da UENF/CCTA, com intuito de verificar se o lodo atendia o padrão estabelecido na legislação vigente (resolução Conama nº375/2006) em relação à qualidade microbiológica, sendo que, segundo a legislação, a partir de 2011 o lodo utilizado na atividade agrícola não poderia apresentar presença de *Salmonella spp.*

3.2.2 - Higienização e estabilização do lodo

Tendo sido identificados problemas microbiológicos no lodo de esgoto (conforme apresentado no item “Resultados e Discussão”, em tópico pertinente), foi realizado um ensaio de incubação do lodo com diferentes doses de cal hidratada (Ca(OH)_2), com o intuito de determinar a quantidade de cal necessária para higienizar e estabilizar o lodo coletado.

Em relação à recomendação constante na Resolução Conama (2006) de que os valores de pH preconizados devem ser alcançados sem que seja feita uma aplicação adicional de álcali, a adição feita pela concessionária Águas do Paraíba em uma das últimas etapas da obtenção do lodo não foi considerada impeditiva para a realização do presente ensaio de caleação, tendo em vista a referida dose inicial ser muito pequena (cerca de 1% com base no peso seco do lodo) e, possivelmente, sem interferência na eficiência do processo de higienização do lodo.

O experimento foi realizado em julho de 2013. O delineamento foi inteiramente casualizado e as unidades experimentais consistiram em potes plásticos de 750 mL preenchidos com lodo em nível de 500 mL, que foram distribuídos em bancada de madeira em casa-de-vegetação (Figura 1). Os tratamentos consistiram em seis doses de cal hidratada (0, 5, 10, 15, 30 e 45%), com base no peso seco do lodo (65 °C por 72h em estufa de circulação forçada de ar), monitorado o pH do material em quatro tempos após a incubação (2, 24, 48 e 72 h).



Figura 1: Ensaio para obtenção da curva de pH x doses de cal hidratada, realizado em casa-de-vegetação.

Durante o período de incubação, o pH em água do lodo (extrato 2,5:1, V/V) foi monitorado, com o intuito de acompanhar sua variação com o tempo e sua estabilização. A partir da curva de pH em relação ao tempo foi identificada a menor dose que permitiu a manutenção de um pH no mínimo igual a 12 durante as duas primeiras horas e superior a 11,5 nas 22 horas subsequentes (condição preconizada pela Resolução CONAMA nº 375/2006 como efetiva para a higienização do lodo). Após o último tempo de monitoramento (72 h) amostras do tratamento testemunha (sem cal - 0%) e do tratamento com a menor dose efetiva de cal hidratada (15%) foram levadas ao Laboratório de Sanidade Animal para determinar a ausência ou presença de *Salmonella* spp., como preconiza a legislação.

Confirmado o atendimento da Resolução CONAMA nº 375/2006 no que se refere à condição microbiológica, todo o lodo de esgoto disponível, que seria usado no experimento, recebeu a aplicação da dose efetiva de cal (15% do peso seco).

3.2.3 - Caracterização e potencial agrônomico do lodo de esgoto

Amostras do lodo caleado foram coletadas e enviadas para o Centro de Análises da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campus Leonel Miranda, Campos dos Goytacazes-RJ para determinação dos parâmetros agrônomicos. As análises foram realizadas com base na metodologia descrita pela Norma técnica P4.230 da CETESB (1999), que utiliza as metodologias internacionais U.S.E.P.A. (1986) e APHA (1992). A determinação dos metais pesados foi realizada no Laboratório de Ciências Ambientais da UENF/CBB, onde o equipamento utilizado foi o ICP720 e a metodologia foi baseada nas normas descritas na resolução Conama nº375/2006 (Tabela 1).

Tabela 1: Atributos químicos do lodo de esgoto caleado utilizado no experimento.

Umidade	pH	N	P	K	Ca	Mg	S	C	Fe	Cu
%		-----g kg ⁻¹ -----						---mg kg ⁻¹ ---		
38,2	8,0	15,75	5,84	1,22	111,70	3,07	12,53	129,6	40.300	306
Na	Zn	Mn	B	Al	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Sr
-----mg kg ⁻¹ -----										
403,52	588	244	20,06	5457,28	102,60	1,95	19,92	7,58	14,77	202,56

Os valores de metais pesados do lodo, apresentados na Tabela 2, se encontraram em faixas adequadas de acordo com a resolução Conama nº375/2006.

3.3 – Ensaio 2: Adubação de sorgo sacarino com lodo de esgoto doméstico

3.3.1 – Coleta e caracterização dos solos utilizados no experimento

Foram utilizados dois solos, provenientes de dois ecossistemas encontrados na região: Tabuleiros Costeiros e Baixada Campista. O primeiro, classificado como Argissolo Amarelo Distrófico, foi coletado no Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo, próximo à área urbana de Campos, com altitude aproximada de 15 m. O segundo, classificado como Cambissolo Háptico, foi coletado na Unidade de Apoio à Pesquisa (UAP) da UENF, com altitude de 10 m. O material desses solos foi coletado na camada superficial, até 0,2 m de profundidade. Após breve secagem ao ar, a sombra, os solos foram destorroados e passados em peneira de 4 mm de malha antes de sua utilização. Amostras dos dois solos foram coletadas e submetidas a análises físicas (granulometria e densidade de partículas), no Laboratório de Solos (LSOL) da UENF/CCTA, e à análise química de rotina para fins de fertilidade, no Centro de Análises da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campus Leonel Miranda, Campos dos Goytacazes-RJ. Na Tabela 2 encontram-se os atributos químicos e físicos dos solos utilizados no experimento.

Tabela 2: Atributos químicos e físicos dos solos utilizados no experimento.

Parâmetros	Unidades	Amostras	
		Argissolo	Cambissolo
pH	-	4,9	6,0
P	mg dm ⁻³	6	22
K	mg dm ⁻³	83	248
Ca	cmol _c dm ⁻³	1,2	4,8
Mg	cmol _c dm ⁻³	1,3	3,8
Al	cmol _c dm ⁻³	0,5	0,0
H+Al	cmol _c dm ⁻³	3,8	3,4
Na	cmol _c dm ⁻³	0,04	0,12
C	%	1,48	2,08
MO	g dm ⁻³	25,5	35,9
SB	cmol _c dm ⁻³	2,8	9,4
T	cmol _c dm ⁻³	6,6	12,8
t	cmol _c dm ⁻³	3,3	9,4
m	%	15	0
V	%	42	73
Fe	mg dm ⁻³	26,0	19,0
Cu	mg dm ⁻³	0,4	1,5
Zn	mg dm ⁻³	2,4	6,2
Areia	g kg ⁻¹	158	372
Silte	g kg ⁻¹	491	100
Argila	g kg ⁻¹	351	528

*Análise granulométrica: dispersão de 20 g de solo com 20 mL de NaOH (0,1 mol L⁻¹) + 200 mL de água e agitação por 16 horas a 120 ciclos por minuto (agitador horizontal), com areia obtida em peneira de malha 53 µm, argila pelo método da pipeta e silte por diferença. Densidade de partículas (Dp): método do balão volumétrico com álcool (Embrapa, 1997).

3.3.2 – Delineamento experimental e tratamentos

As doses de lodo aplicadas foram determinadas com base na quantidade de nitrogênio presente no lodo e na necessidade do sorgo sacarino, cv BRS 506. Foram testadas cinco doses de lodo, 2,3 (4,6 Mg ha⁻¹), 4,6 (9,3 Mg ha⁻¹), 9,3 (18,5 Mg ha⁻¹), 18,5 (37,1 Mg ha⁻¹) e 37,1 (74,2 Mg ha⁻¹) g de lodo por kg de solo, correspondendo ao fornecimento de 50, 100, 200, 400 e 800% da quantidade de N recomendada (Borgonovi et al., 1982). Para cada solo foram implementados, ainda, um tratamento com adubação mineral e um controle absoluto (sem lodo e sem outra fonte de adubação), configurando-se o esquema fatorial 2x7, com dois solos e sete tratamentos para cada solo, e 14 tratamentos no total.

O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com cinco repetições, sendo que as unidades experimentais consistiram em vasos plásticos de 11 L de capacidade. Na montagem do experimento foi colocada no fundo dos vasos cerca de 1 kg de brita nº01, para permitir melhor drenagem da água de irrigação excedente. Dois meses antes da semeadura do sorgo foi realizada incubação do solo nos vasos, já homogeneizados com suas respectivas doses de lodo e de calcário. A calagem mostrou-se necessária apenas no Argissolo, que apresentou baixa saturação por bases (inferior a 70%) e pH abaixo da faixa considerada ideal para a cultura, sendo implementada apenas no tratamento com adubação mineral, que recebeu a dose de calcário de $0,50 \text{ g kg}^{-1}$. Para ambos os solos, no tratamento com adubação mineral esta seguiu as recomendações técnicas para a cultura do sorgo apresentadas no Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro (Freire et al., 2013). A adubação mineral foi feita usando como fontes a ureia, o superfostato simples e o cloreto de potássio, sendo as quantidades de N, P e K utilizadas, respectivamente, de 0,14, 0,33 e $0,034 \text{ g kg}^{-1}$, para o Argissolo, e 0,14, 0,11 e 0 g kg^{-1} , para o Cambissolo. A aplicação da ureia, para ambos os solos, foi dividida em duas parcelas, sendo realizadas aos sete e trinta dias após emergência.

3.3.3 – Implantação e condução do experimento

O experimento foi realizado em casa-de-vegetação na UAP-Vegetal, onde foi instalada uma miniestação meteorológica WhatchDog 2900ET para monitoramento das condições de temperatura e umidade do ambiente. Na Figura 2 encontram-se as condições de radiação solar, umidade relativa e temperatura do ar dentro da casa-de-vegetação durante o período experimental.

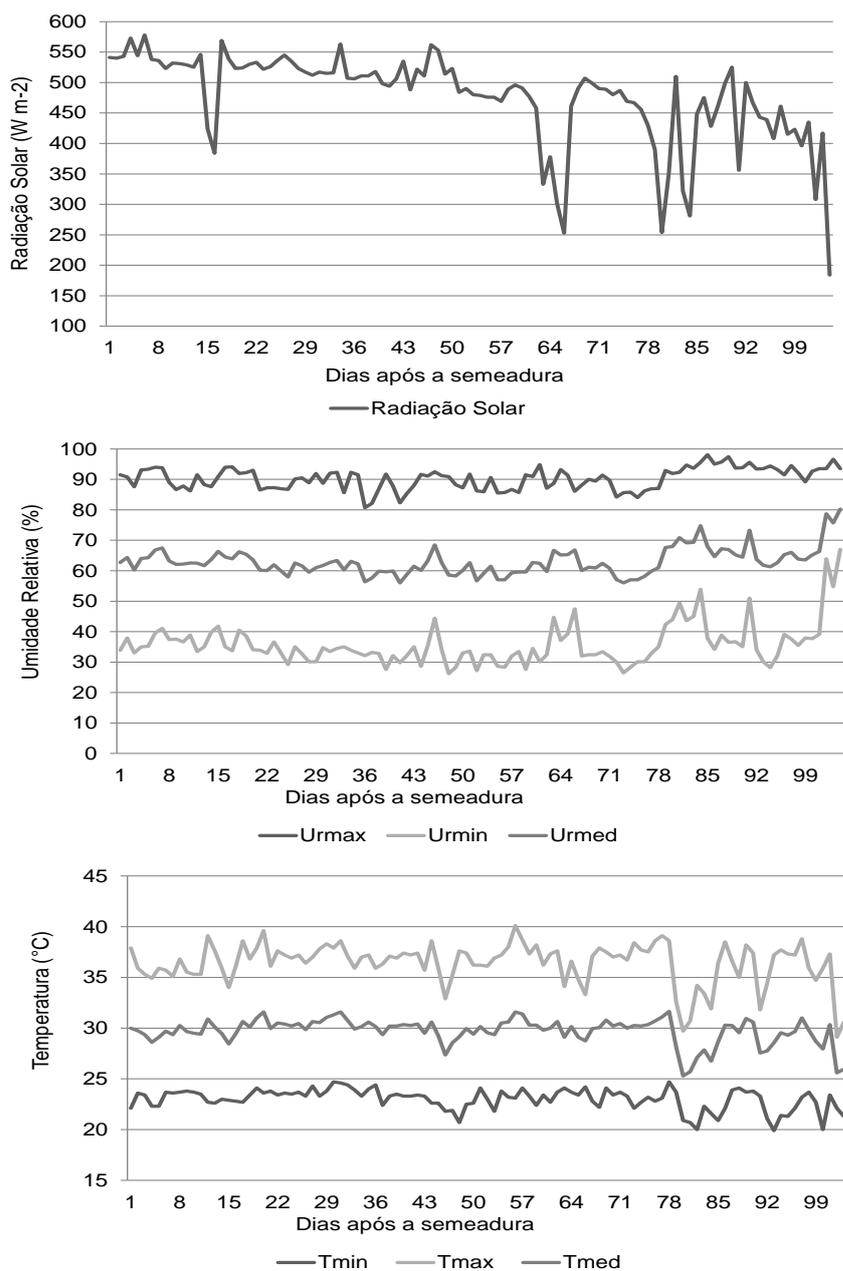


Figura 2: Elementos meteorológicos dentro da casa-de-vegetação, no período experimental (janeiro a abril), em Campos dos Goytacazes: radiação solar global, umidade relativa máxima (URmax), mínima (URmin) e média (URmed), temperatura do ar máxima (Tmax), mínima (Tmin) e média (Tmed).

A semeadura do sorgo foi realizada no dia 13 de janeiro e a emergência iniciou-se cinco dias após o semeio. Foram semeadas três sementes por vaso, realizando-se o desbaste sete dias após a emergência, deixando-se apenas uma planta por vaso. A irrigação era realizada diariamente duas vezes ao dia, no início da manhã e final da tarde. O experimento foi encerrado 90 dias após a emergência, quando o sorgo apresentava-se no ponto de corte adequado para

sua utilização na indústria sucroalcooleira (grão leitoso-pastoso) (Marchezan e Silva, 1984).

Após um mês de emergência da cultura ocorreu incidência da doença fúngica helmintosporiose, comum e muito agressiva para o sorgo. O controle da doença foi realizado em três aplicações, quinzenais, do fungicida Tilt, sendo aplicado 140 mL de calda em 0,1% por vaso.

Ao longo do experimento foram realizadas três avaliações biométricas (nos três estádios de crescimento) das plantas, assim como duas avaliações fisiológicas. Na ocasião da colheita foram feitas medidas de produção e realizadas coletas de amostras de planta e solo, conforme detalhado nos tópicos subsequentes.

3.3.4 – Variáveis Analisadas

3.3.4.1- Atributos do solo

3.3.4.1.1 - Atributos físicos

Após a colheita do experimento amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de 100 mL, com três repetições, sendo utilizadas para a determinação da densidade do solo (D_s) e da porosidade total (PT) (Embrapa, 1997). Antes, porém, estas amostras foram utilizadas para a determinação de valores de umidade volumétrica (θ) de equilíbrio em pontos de “baixa tensão” (1, 3, 6 e 10 kPa, em funil de placa porosa) e de “alta tensão” (33, 100, 500 e 1500 kPa, em câmaras de pressão de Richards) (Figura 3), permitindo a obtenção da curva de retenção, sendo os dados ajustados à Equação 1 (van Genuchten, 1980):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) (1 + (\alpha \tau)^n)^{-m} \quad (1)$$

em que: τ é a tensão da água no solo (kPa); α (kPa^{-1}) e n e m (adimensionais) são coeficientes de ajuste; θ_r é o valor umidade residual (obtido também durante o ajuste) e θ_s é o valor da umidade do solo saturado, admitido como correspondente à porosidade total do solo.

A partir da curva de retenção de água foram obtidos os valores de microporosidade, da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), considerados correspondentes às umidades nos potenciais mátricos -6 kPa, -10 kPa e -1500 kPa, respectivamente. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total (PT) e a microporosidade, a porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}) pela diferença entre a porosidade total e a umidade na capacidade de campo, e a água disponível (AD) pela diferença entre a umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

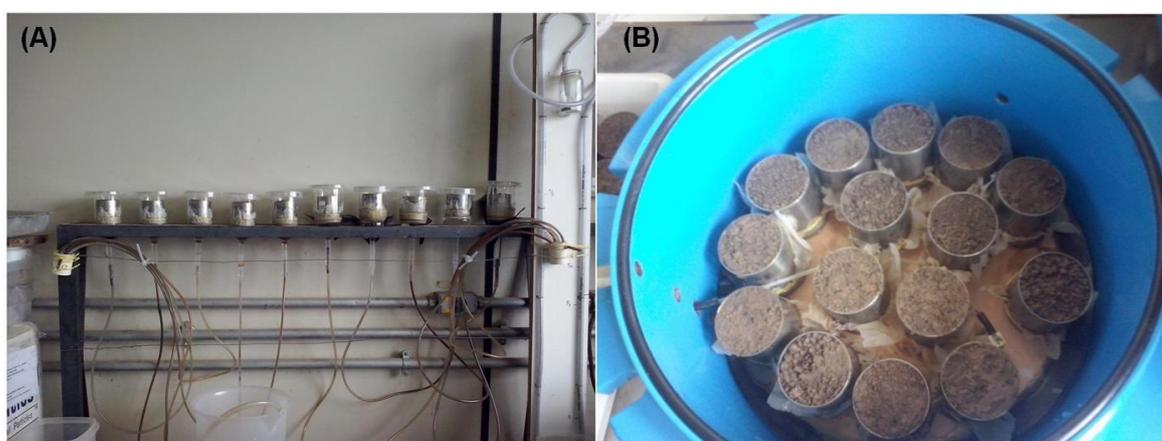


Figura 3: (A) amostras no funil de placa porosa e (B) amostras na câmara de pressão de Richards.

3.3.4.1.2 - Atributos químicos

Ao término do experimento amostras de solo de cada tratamento foram identificadas, colocadas em sacos plásticos e enviadas para o Centro de Análises da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em Campos dos Goytacazes-RJ, no Campus Leonel Miranda. As análises químicas dos solos foram realizadas segundo metodologia da Embrapa (1997).

3.3.4.2- Avaliações do sorgo

3.3.4.2.1 - Análises biométricas

A cada estágio de crescimento do sorgo a altura e o diâmetro médio foram avaliados. A altura foi determinada com auxílio de trena, sendo a medição realizada rente ao solo até a ponta da última folha ou até o ápice do pendão (se presente). Os diâmetros foram determinados com auxílio de paquímetro digital.

No momento do corte dos colmos do sorgo, além das avaliações biométricas acima mencionadas, foram medidos ainda o diâmetro basal e apical do colmo. Após o corte, as plantas eram separadas em folhas, colmo e pendão e, depois de identificadas quanto ao tratamento, eram levadas ao LSOL para prosseguimento das avaliações. No laboratório o material vegetal foi pesado em balança de precisão, para obtenção do peso fresco. Após pesagem, os colmos eram moídos em moenda manual para extração do caldo. Na sequência, os materiais vegetais foram acondicionados em sacos de papel e colocados em estufa de circulação forçada de ar a 70°C até atingir peso constante, para determinação da biomassa seca (para o colmo, determinada a partir do bagaço).

3.3.4.2.2 - Análises fisiológicas

Aos 69 dias após a emergência do sorgo (início do último estágio de crescimento) foram realizadas as medições das trocas gasosas, em três plantas por tratamento (escolhidas a partir de sorteio), utilizando-se a folha bandeira da cultura para medição. A taxa fotossintética líquida, a transpiração e a condutância estomática foram obtidas com o auxílio de um analisador de gás na faixa infravermelho portátil (IRGA), modelo Li-6400 (LI-COR, Lincoln, NE, USA), utilizando uma fonte luminosa fixa artificial em 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de intensidade de fluxo de fótons fotossintéticos, em horário de 8:00 às 10:00 da manhã.

Para estimar a clorofila nas folhas foi utilizado um medidor portátil SPAD-502. O SPAD (Soil Plant Analysis Development) mede a transmissão de luz vermelha a 650 nm, em que ocorre absorção de luz pela molécula de clorofila, e de luz infravermelha, a 940 nm, sem absorção. Foram realizadas medições na

folha bandeira de todas as plantas utilizadas no experimento aos 69 dias após emergência.

3.3.4.2.3 - *Análises nutricionais*

Após determinação da biomassa da folha, do colmo e do pendão, a partir da secagem em estufa, estes materiais foram moídos em moinho de facas tipo Willey e acondicionados em frascos plásticos para determinação dos nutrientes P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Cu, Mn, Na e S.

A determinação dos nutrientes foi realizada no extrato de digestão similar à nítricoperclórica descrita por Campbell e Plank et al.(1992), com as modificações descritas a seguir.

Foram pesadas 150 mg das amostras que foram colocadas no fundo de tubos de ensaio para a digestão. Os tubos foram colocados em bloco digestor, adicionando-se às amostras 3 mL de HNO₃, na noite anterior à digestão, com a amostra permanecendo em repouso por 16 h (Figura 4). Após isso, iniciou-se a digestão com a elevação gradual da temperatura até 90 °C. Estabilizada a temperatura foi adicionado 2 mL de H₂O₂ às amostras e promoveu-se nova com elevação da temperatura do bloco até 130 °C, adicionando-se então mais 1 mL de H₂O₂. A temperatura foi novamente elevada, agora até 220°C, em que foi mantida até total eliminação da parte líquida das amostras contidas nos tubos. Ao término desse prazo, os tubos com as amostras digeridas foram retirados do bloco e resfriados em temperatura ambiente. Após o resfriamento adicionava-se HNO₃ diluído, em água deionizada, em 0,5% para dissolver o resíduo da digestão e trazer as amostras para o volume final de 10 mL. Após diluição, as amostras foram colocadas em agitador para homogeneização e depois deixadas em repouso até a decantação total do resíduo no fundo do tubo possibilitando a coleta do sobrenadante transparente, que foi acondicionado em tubos plásticos para posterior leitura em Espectrômetro de emissão atômica por plasma (ICPE-720-OES).

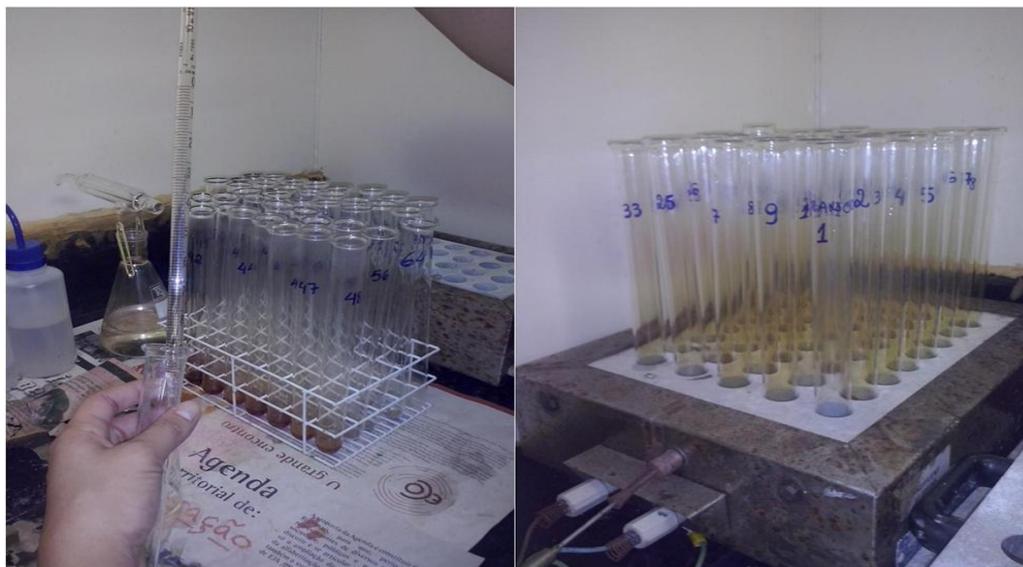


Figura 4: Digestão similar à nítricoperclórica realizada no material vegetal do sorgo, em blocos digestores.

3.4 – Análise dos dados

Os resultados do ensaio de adequação do lodo de esgoto para uso agrícola foram analisados a partir da comparação com valores padrão estabelecidos na legislação vigente e com valores constantes em manuais de recomendações de adubação da cultura do sorgo. Os resultados do ensaio de adubação foram analisados com auxílio do programa Assistat Beta 7.1. Na análise de variância os dois tratamentos com adubação mineral (um para cada solo) foram admitidos como tratamentos adicionais e avaliados considerando-se os seguintes contrastes ortogonais: C1 - adubação mineral *versus* demais tratamentos (ou “AM vs. demais”); e C2 - adubação mineral no Argissolo *versus* adubação mineral no Cambissolo (ou “AM-Arg vs. AM-Camb”). Os demais tratamentos foram admitidos como um fatorial 2x6, com dois solos e seis níveis de lodo de esgoto, sendo avaliados os efeitos dos solos (F1, ou “fator F1”, que também caracteriza um contraste ortogonal), das doses de lodo (F2, ou “fator F2”) e da interação entre solos e níveis de lodo (F1xF2). A significância dos contrastes C1 e C2, dos fatores F1 e F2, e da interação F1xF2 foi analisada pelo teste F. Sendo significativos o fator F1 ou a interação F1xF2, as médias das doses foram submetidas à análise de regressão polinomial, sendo testados os modelos de 1º e 2º graus.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Ensaio 1: Adequação do lodo de esgoto doméstico para uso agrícola

4.1.1 – Higienização e estabilização do lodo de ETE

O lodo de esgoto coletado na concessionária “Águas do Paraíba” foi inicialmente submetido à análise microbiológica, tendo sido constatada a presença de *Salmonella spp.*, o que não é permitido pelas normas vigentes (Conama, 2006) quando o que se pretende é dar-lhe destinação agrícola. Sendo, então, constatada a necessidade de higienização do lodo, o ensaio de incubação do lodo de esgoto com doses crescentes de cal hidratada foi realizado, estando os resultados da curva de pH da mistura ao longo do tempo apresentados na Figura 5.

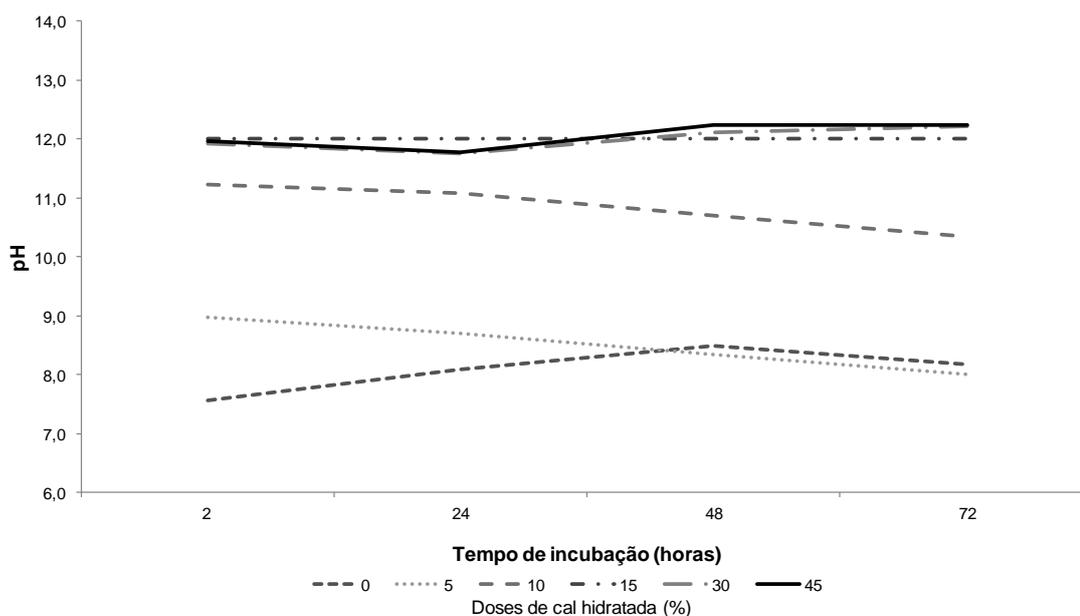


Figura 5: Curva de pH da mistura lodo de esgoto e doses crescentes de cal hidratada em diferentes tempos de incubação.

As menores doses de cal utilizadas, 5 e 10%, não foram suficientes para elevar o pH da mistura acima de 12, nos tempos observados. As doses de 15, 30 e 45% já foram eficientes no primeiro tempo de incubação observado (2 horas). Tal resultado vai ao encontro com o que é preconizado pela legislação, sendo que para eliminação de patógenos, como a *Salmonella*, a quantidade de álcali misturada com o lodo de esgoto deve ser suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12 por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas. Estes valores devem ser alcançados sem que seja feita uma aplicação adicional de álcali (Conama, 2006).

Segundo Wong e Fang (2000), um pH acima de 11,5 destrói a maioria dos micro-organismos endógenos presentes no lodo e inibe o crescimento de potenciais patógenos. Portanto, a estabilização com cal é um método eficaz de desinfecção. Tendo isso em vista e também que a presença de *Salmonella spp.* nas amostras de lodo não é permitida nem em baixos índices, para que, no presente caso, a eficiência da caleação para a desinfecção do lodo fosse confirmada e para que se pudesse definir a dose de cal adotada para tratar o lodo que seria usado na segunda etapa do presente trabalho, a análise microbiológica foi feita apenas as amostras de lodo incubadas sem a adição cal e aquelas com 15% de cal adicionado, exclusivamente quanto à presença do referido patógeno.

Os resultados mostraram que o lodo sem caleação estava contaminado com *Salmonella spp.*, enquanto que a mistura lodo e cal em 15% se encontrava livre do patógeno. Sendo assim, a dose de 15% de cal foi a menor dose efetiva e, então, adotada para a higienização do lodo.

Lembre-se aqui que o lodo utilizado no presente trabalho recebeu uma aplicação inicial de cal hidratada ainda quando na concessionária Águas do Paraíba. É evidente que, como as doses de cal hidratada testadas no presente ensaio foram adicionais à essa dose inicial (ainda que esta tenha sido pequena e insuficiente para ter elevado o pH do lodo e eliminado a presença de *Salmonella spp.* no mesmo), a eventual adequação do processo de caleação pela Águas do Paraíba para a higienização de seu lodo demandaria que novos ensaios para a definição da dose adequada fossem realizados em material que não tenha recebido a referida dose inicial. Outras concessionárias, para a higienização do lodo que produzem, precisariam também realizar ensaios específicos para a definição da dose de cal adequada, considerando as particularidades do próprio lodo, dos insumos utilizados e dos aspectos ambientais envolvidos.

4.1.2 - Potencial agrônômico do lodo de esgoto

O potencial agrônômico de um resíduo orgânico (ou qualquer outro material) pode ser analisado por diversos aspectos. Para o lodo de esgoto caleado em estudo, foram destacados na sequência sua ação sobre a acidez do solo, a possibilidade de levar à contaminação do solo com metais pesados e seu potencial como fornecedor de nutrientes, particularmente os chamados macronutrientes primários - N, P e K. Adicionalmente aos anteriormente citados, destaca-se aqui de forma breve outros aspectos do uso do lodo poderiam ser abordados: (i) fornecedor dos demais macronutrientes (os ditos secundários - Ca, Mg e S) e também dos micronutrientes (alguns deles intimamente associados à matéria orgânica); (ii) fonte de contaminação com patógenos e compostos químicos; e (iii) condicionador químico e físico do solo.

Quanto à sua atuação como condicionador, o lodo incorporado ao solo geralmente melhora as condições físicas deste, principalmente pelo aumento da agregação, porosidade total e macroporosidade, e pela redução da densidade e resistência mecânica. Em relação às condições químicas, além de incorporar

nutrientes ao solo, a matéria orgânica traz consigo importantes atributos coloidais, em particular sua capacidade de troca de cátions, o que aumenta o tamanho do complexo de troca do solo (eleva sua CTC a $\text{pH}=7,0$). Soma-se a isso o fato de que o lodo caleado eleva o pH do solo, aumentando também a CTC efetiva.

4.1.2.1 – Poder de neutralização (PN) da acidez do solo

O poder de neutralização (PN) indica a capacidade potencial ou teórica de um corretivo em neutralizar a acidez dos solos. O PN de um corretivo depende não só do teor de neutralizantes presentes, mas também da natureza química do neutralizante. Cada espécie neutralizante tem uma determinada capacidade de neutralização, onde as capacidades estão expressas em relação à capacidade do CaCO_3 , tomado como padrão. A identificação de um produto como corretivo de acidez dos solos é feita determinando-se os teores de cálcio e de magnésio. A ausência ou teores muito baixos desses elementos indicam que o produto não é corretivo de acidez dos solos (Alcarde, 2005).

Sendo assim, a técnica de higienização através da caleação realizada no lodo de esgoto confere a este resíduo uma qualidade apreciável, que é o poder de agir como corretivo de solos. Segundo Andreoli (2001), a cal, por ser um produto alcalino forte e de preço acessível, normalmente é utilizada na estabilização química do lodo de esgoto, processo que adiciona ao lodo elementos essenciais à agricultura, como o cálcio e o magnésio, e dá ao resíduo a capacidade de corrigir a acidez do solo, podendo substituir total ou parcialmente a calagem. Durante a estabilização química, ocorre uma série de reações, gerando um resíduo sólido estável química, biológica e fisicamente, com baixo potencial para exalação de odores, reduzida quantidade de organismos patogênicos e metais pesados eventualmente presentes com sua mobilidade reduzida.

Com base nos resultados da análise química do lodo de esgoto apresentados na Tabela 1, os teores de cálcio foram utilizados para determinar o PN do lodo utilizado no experimento, sendo o valor encontrado de 29,19%. Devido à natureza granulométrica do lodo, que se encontra em uma faixa menor que 0,3 mm de diâmetro, considerou-se que sua reatividade é de 100% e, assim, todo o lodo aplicado agiria nos primeiros três meses após sua aplicação. Neste caso, o PRNT (poder relativo de neutralização total) do lodo seria também igual a

29,19%. Considerando a recomendação de calagem para sorgo granífero constante em Raij et al. (1992) e o valor da saturação por bases do Argissolo (42%), apresentado na Tabela 2, encontrou-se que para elevação da saturação por bases (valor V) deste solo para 70% a dose de lodo seria de 6,37 Mg ha⁻¹, enquanto para que fosse atingido um valor V de 100% a dose seria de 13,2 Mg ha⁻¹ (o que elevaria o pH a um valor próximo de 7,0). Para o Cambissolo, cujo valor V já era inicialmente superior a 70% (de 73%, conforme Tabela 2), sua elevação a 100% demandaria uma dose de lodo de 11,9 Mg ha⁻¹ (também atingindo valor de pH de cerca de 7,0) Segundo o Conama (2006), o cálculo da taxa de aplicação máxima anual do lodo deverá levar em conta os resultados dos ensaios de elevação de pH provocado pelo lodo de esgoto, de modo a garantir que o pH final da mistura solo-lodo de esgoto ou produto derivado não ultrapasse o limite de 7,0.

Fia et al. (2005) objetivaram a obtenção da curva de caleação para higienização do lodo de esgoto doméstico gerado em lagoa de estabilização e a observação dos efeitos de diferentes doses de lodo caleado sobre características químicas de um Latossolo Vermelho Amarelo distroférico, quando aplicado como fertilizante no cultivo de plantas de milho. Os autores observaram que a aplicação do lodo promoveu aumento significativo no pH do solo que foi elevado de 4,7 para 6,8 com uma dose de 168,4 Mg ha⁻¹ de lodo. Os autores concluíram que considerando que as doses de lodo caleado, consideradas adequadas para a nutrição mineral das plantas, proporcionarão aumentos não desejáveis no pH do solo, recomenda-se que, para o cálculo da dose de aplicação, o lodo seja considerado, primordialmente, um corretivo de acidez do solo e não somente um adubo orgânico.

4.1.2.2 – Níveis de metais pesados

De acordo com a Tabela 3, os níveis de metais pesados presentes no lodo de esgoto utilizado neste experimento se encontravam dentro da faixa permitida para seu uso agrícola.

Tabela 3: Limites estabelecidos pelo Conama (2006) quanto à presença de metais pesados em lodo de esgoto e à carga máxima acumulada no solo, bem como os teores de metais encontrados no lodo utilizado no experimento, a dose máxima aplicável e a altura da coluna de lodo correspondente.

Metal pesado	Concentração		Carga máxima de metal pelo Conama ⁽²⁾ (kg ha ⁻¹)	Dose máxima para o lodo utilizado (Mg ha ⁻¹)	Espessura da camada de lodo na dose máxima (m)
	Limite máximo pelo Conama ⁽¹⁾ (mg kg ⁻¹)	Presente no lodo utilizado no trabalho (mg kg ⁻¹)			
Bário	1300	102,60	265	2583	0,258
Cádmio	39	1,95	4	2051	0,205
Chumbo	300	185,40	41	221	0,022
Cobre	1500	189,11	137	724	0,072
Cromo	1000	12,31	154	12510	1,251
Níquel	420	4,68	74	15812	1,581
Zinco	2800	363,38	445	1255	0,126

⁽¹⁾ Concentração máxima permitida no lodo de esgoto em base seca; ⁽²⁾ Quantidade máxima de metais pesados acumulados no solo em uma ou mais aplicações. (Fonte: Conama, 2006). Obs.: Na resolução (Conama, 2006) constam, ainda, limites para arsênio, mercúrio, molibdênio e selênio, os quais não puderam ser determinados na análise química do lodo de esgoto.

Não somente os teores, mas também o acúmulo de metais pesados em solos agrícolas, devido às aplicações sucessivas de lodo de esgoto, é outro aspecto que causa grande preocupação com relação a segurança ambiental necessária para a viabilização desta prática (Oliveira e Mattiazzo, 2001). Para a aplicação devem ser levados em consideração as concentrações máximas de metais pesados nele contido, as concentrações máximas de metais em solos agrícolas e as cargas cumulativas máximas de metais em solos pela aplicação do lodo (Tsutiya, 2001). No presente caso, considerando-se os teores observados no lodo utilizado e o valor de cargas acumuladas teóricas de metais pesados permitidas em solos agrícolas (Conama, 2006), verifica-se que as doses acumuladas de lodo de esgoto a serem aplicadas (Tabela 3) seriam muito superiores àquelas previstas por critérios agronômicos usuais (vide doses anteriormente mencionadas para elevação do valor V para 70% ou para 100% no Argissolo e no Cambissolo). Ressalta-se que, dentre os metais pesados

analisados, o chumbo é o que causa maior preocupação, pois a carga máxima permitida (41 kg ha^{-1}) poderia ser atingida, por exemplo, com cinco aplicações anuais de lodo de 45 Mg ha^{-1} . Para uma abordagem mais completa acerca dos riscos envolvidos no uso agrícola do lodo há que se determinar, ainda, os elementos arsênio, mercúrio, molibdênio e selênio, que não puderam ser analisados no âmbito do presente trabalho.

4.1.2.3 – Potencial do lodo para adubação na Região Norte Fluminense

Segundo May et al. (2013), há o mito de que os sorgos são pouco exigentes em fertilidade do solo. Isso é parcialmente verdade para o sorgo granífero, que comumente é cultivado no Brasil em período de safrinha, época de cultivo que apresenta menor potencial produtivo condicionado pela escassez de água, pelas menores temperaturas e pela menor radiação solar. O menor potencial produtivo faz com que a exigência em nutrientes seja baixa. Diferentemente do sorgo granífero, o sacarino, que acumula açúcares no colmo de forma similar à cana-de-açúcar, é cultivado no verão com boa disponibilidade hídrica, maior radiação solar e temperaturas adequadas. Com isso, o potencial produtivo é alto e, por conseguinte, também o é a demanda de nutrientes.

Existem poucos estudos sobre a nutrição do sorgo sacarino nas condições brasileiras (May et al., 2013). Tanto no Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro (Freire et al., 2013) quanto no Boletim Técnico nº 100 do IAC - Instituto Agrônomo de Campinas (Raij et al., 1992) só são encontradas recomendações para o sorgo granífero e que são estendidas para o sorgo forrageiro. Sendo assim, no presente trabalho foram utilizadas tais informações para o cálculo de adubação do sorgo sacarino.

Na Tabela 4 estão apresentados as doses de nitrogênio, fósforo e potássio recomendados por Freire et al. (2013) e por Raij et al. (1992) para o sorgo granífero, tanto para cultivo no Argissolo e quanto no Cambissolo, doses essas obtidas com base nas faixas de teor desses nutrientes nesses solos (Tabela 2).

Tabela 4: Recomendações de adubação para o sorgo sacarino nos dois solos utilizados no experimento e o teor dos nutrientes encontrados no lodo.

Nutriente (expresso na forma comercial de representação)	Manual Rio de Janeiro ⁽¹⁾		Manual São Paulo ⁽²⁾		Teor no lodo g kg ⁻¹
	Cambissolo	Argissolo	Cambissolo	Argissolo	
	----- kg ha ⁻¹ -----				
N	60	60	60	60	15,75
P ₂ O ₅	30	80	40	60	13,40
K ₂ O	0	20	20	40	1,47

⁽¹⁾ Valores extraídos do Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro (Freire et al., 2013); ⁽²⁾ Valores extraídos do Boletim Técnico nº 100 do IAC - “Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo” (Rajj et al., 1992).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4 pode-se calcular que seriam necessários 3809 kg de lodo de esgoto por ha para atender à recomendação de N para o sorgo sacarino (para ambos os solos, de acordo com ambos os manuais de recomendação). Em relação ao P₂O₅, pelo manual do Rio de Janeiro seriam necessários 2238 kg ha⁻¹ para o Cambissolo e 5968 kg ha⁻¹ para o Argissolo, enquanto pelo Boletim de São Paulo seriam 2984 kg ha⁻¹ para o Cambissolo e 4477 kg ha⁻¹ para o Argissolo. Para o K₂O o manual do Rio de Janeiro não indica adubação para o Cambissolo e a adubação com 13605 kg de lodo por ha para o Argissolo, enquanto para São Paulo a recomendação seria de 13605 kg ha⁻¹ para o Cambissolo e 27211 kg ha⁻¹ para o Argissolo.

Segundo May et al. (2013), os nutrientes demandados em maiores quantidades pelo sorgo sacarino são o potássio e o nitrogênio. As extrações de potássio e de nitrogênio podem ultrapassar 3,91 e 3,22 kg por tonelada de colmos, respectivamente. Sendo assim, a grande disponibilidade do lodo relativa à sua alta produção na ETE demonstra que ele pode ser considerado um adubo mais barato e que se apresenta ainda como boa fonte de nutrientes para o sorgo sacarino e outras culturas da região que apresentem necessidades de adubação menor ou semelhantes às do sorgo. A partir das doses recomendadas mencionados no parágrafo anterior, verifica-se que o lodo de esgoto pode suprir integralmente a demanda de N e P₂O₅, mesmo quando aplicado em doses usualmente empregadas na adubação orgânica (até 10 Mg ha⁻¹, de acordo com Leal et al., 2013). Por outro lado, a demanda de K₂O seria suprida somente com a aplicação de doses maiores que as usuais, o que poderia gerar efeitos indesejáveis em relação à fertilidade do solo, decorrentes tanto do incremento de

elementos tóxicos quanto da elevação excessiva do pH (como a consequente redução da disponibilidade de certos nutrientes). Quando for utilizada uma dose de lodo na faixa apenas usual, a complementação de adubação com potássio pode ser demandado a partir de uma fonte mineral, possivelmente na forma de adubação em cobertura.

4.2 - Ensaio 2: Adubação de sorgo sacarino com lodo de esgoto doméstico

4.2.1 – Alterações na qualidade do solo

4.2.1.1 - Efeito da aplicação do lodo nos atributos químicos

O resultado da análise de variância para os atributos químicos dos solos adubados com fertilizante mineral e níveis crescentes de lodo está apresentado na Tabela 5, onde se verifica que, para todas as variáveis, houve diferenças significativas, a 1 ou 5% de probabilidade. Na Tabela 6 são comparadas as médias dos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3.

Para o C não foi verificada diferença significativa entre a média da adubação mineral (1,7%) e a média geral dos tratamentos sob os diversos níveis de lodo de esgoto (1,8%), incluído a testemunha. Por outro lado, foi altamente significativa a diferença entre os dois solos, tanto quando sob adubação mineral (1,5% para o Argissolo e 2,0% para o Cambissolo) quanto quando sob os níveis de lodo (1,5% para o Argissolo e 2,0% para o Cambissolo), revelando que os tratamentos não alteraram a superioridade inicial do Cambissolo, já identificada na análise química dos solos antes da implantação do experimento (Tabela 1).

Para os tratamentos do fatorial, além do efeito simples de solo (F1), na Tabela 5 observa-se o efeito simples das doses de lodo (F2) sobre o teor de C, o que resultou no modelo de regressão linear $y = 0,00417x + 1,7314$, significativo a 1% de probabilidade. Na Figura 6, o referido modelo é apresentado como equações específicas para o Argissolo e para o Cambissolo, podendo-se observar que estas têm o mesmo coeficiente angular (consequência da interação não significativa) e diferem quanto ao coeficiente linear (efeito simples de solo).

Tabela 5. Valores de quadrado médio para cada contraste ou fonte de variação (FV) considerada na análise de variância dos atributos químicos do solo do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Contraste ou FV	GL	pH	P	K	C	T	t	Na ⁺	V%	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca:Mg
C1	1	0,360*	902,000**	2,469 ^{ns}	0,009 ^{ns}	13,973**	38,483**	0,008**	766,574**	45,474**	0,210**	26,596**
C2	1	0,121 ^{ns}	147,456*	2992,900**	0,852**	95,310**	86,274**	0,053**	688,069**	22,201**	17,689**	3,473**
F1 (ou C3)	1	0,308*	2,360 ^{ns}	16941,1207**	4,160**	720,765**	696,532**	0,345**	3074,838**	252,970**	90,774**	98,739**
F2	5	1,784 ^{ns}	2768,708 ^{ns}	349,973 ^{ns}	0,038**	41,446**	75,223 ^{ns}	0,005 ^{ns}	1173,295 ^{ns}	91,593 ^{ns}	0,615 ^{ns}	81,677 ^{ns}
F1 x F2	5	0,134*	175,442**	95,189**	0,005 ^{ns}	1,687 ^{ns}	2,712**	0,003*	193,357**	1,805**	0,151**	26,474**
CV(%)	-	3,73	22,16	8,54	4,31	7,41	8,56	10,20	3,53	9,55	7,57	17,47

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; C1- contraste ortogonal entre “adubação mineral” (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); F1 (ou contraste C3)- fator “solo” do fatorial solo x lodo (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- fator “adubação com lodo” do fatorial solo x lodo (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); e F1xF2- interação entre F1 e F2 no fatorial solo x lodo; CV- coeficiente de variação. Atributos químicos analisados: pH (potencial hidrogeniônico), P (fósforo), T (capacidade de troca catiônica a pH=7,0), t (capacidade de troca catiônica efetiva), Ca (cálcio), Mg (magnésio), Na (sódio), V% (saturação por bases), C (carbono), K (potássio), Ca:Mg (relação cálcio/magnésio). Teste F: ** - significativo em nível de 1% de probabilidade; * - significativo em nível de 5% de probabilidade; e ^{ns} - não significativo.

Tabela 6. Médias dos atributos químicos do solo nos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3 do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Tratamento	pH	P	K	T	t	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	V%	C	Ca:Mg
	-	-----mg.kg ⁻¹ -----	-----cmol _c .kg ⁻¹ -----	-----%	-----%	-	-				
Contraste C1											
Adubação mineral	6,1b	12,0b	46,00a	10,5b	7,2b	4,4b	2,4a	0,37a	66,5b	1,7a	2,1b
Fatorial solo x lodo	6,3a	22,3a	45,53a	11,7a	10,6a	6,7a	2,2b	0,34b	76,0a	1,8a	2,6a
Contraste C2											
AM-Arg	6,0a	8,2b	29b	7,4b	4,3b	2,9b	1,0b	0,29b	58,2b	1,5b	2,8a
AM-Camb	6,2a	15,8a	63a	13,5a	10,1a	5,8a	3,7a	0,44a	74,8a	2,0a	1,6b
Contraste C3 (ou fator F1)											
Lodo-Arg	6,2	22,1	28,90b	8,3b	7,2	4,6	1,0	0,26	68,8	1,5b	5,2a
Lodo-Camb	6,4	22,5	62,17a	15,2a	13,9	8,7	3,4	0,41	83,1	2,0a	2,6b

C1- contraste ortogonal entre “adubação mineral” (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); C3 (ou fator F1)- fator “solo” do fatorial solo x lodo (Lodo-Arg: Argissolo; Lodo-Camb: Cambissolo). Atributos químicos analisados: pH (potencial hidrogeniônico), P (fósforo), T (capacidade de troca catiônica a pH=7,0), t (capacidade de troca catiônica efetiva), Ca (cálcio), Mg (magnésio), Na (sódio), V% (saturação por bases); C (carbono), K (potássio), Ca:Mg (relação cálcio/magnésio). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5%; médias não seguidas de letras no contraste C3 foram comparadas posteriormente considerando-se o desdobramento da interação significativa solo x lodo.

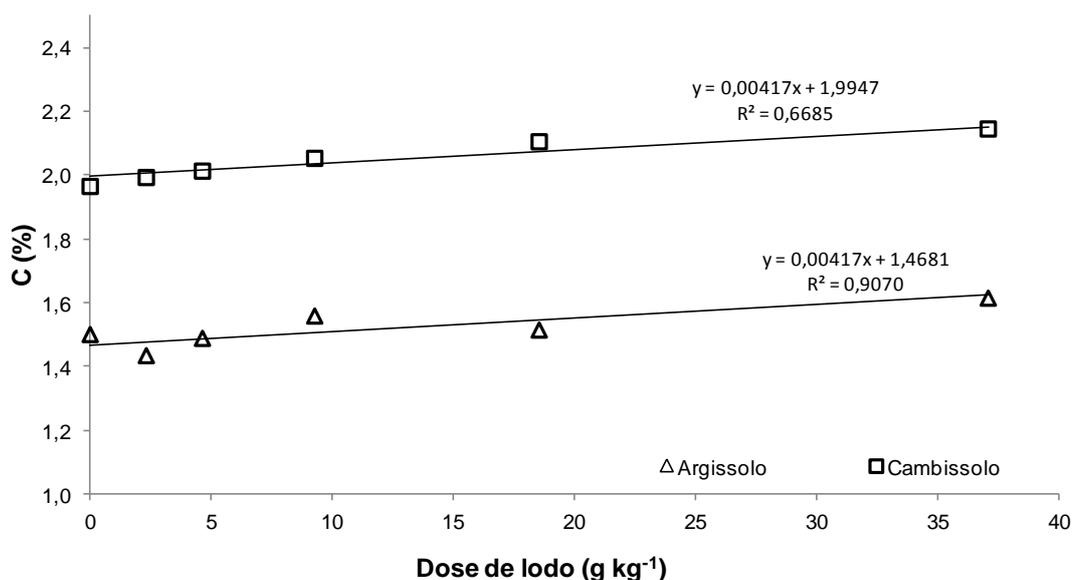


Figura 6: Teores de carbono no Argissolo e no Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

A maior dose de lodo proporcionou incremento no teor de carbono orgânico de 0,15% em relação à testemunha, correspondendo a incrementos relativos de 10,5% para o Argissolo e 7,8% para o Cambissolo. Este resultado está de acordo com o observado por Roig et al. (2012), que verificaram que as concentrações de C-orgânico (e nitrogênio) total nas amostras de solo aumentaram com a aplicação de lodo de esgoto, enquanto a adubação mineral não afetou as concentrações de C-orgânico do solo.

Trabalhando em um Latossolo Amarelo Distrófico cultivado com cana de açúcar que recebeu doses crescentes de lodo de esgoto (33, 66 e 99 Mg ha⁻¹, no primeiro ano de cultivo, e 37, 74 e 110 Mg ha⁻¹, no segundo ano), Oliveira et al. (2002) observaram que os teores de C-orgânico do solo decresceram ao longo de cada ciclo, mantendo, no entanto, o comportamento linear crescente em relação às doses aplicadas. Respectivamente para as doses mencionadas, os teores de C-orgânico foram, ao final do 1º ano, 13, 14 e 15% superiores aos da testemunha não adubada, e, ao final do ciclo da 2º ano, 10, 17 e 33% superiores aos observados nas respectivas parcelas antes da 2ª aplicação. Os autores atribuíram os efeitos observados às doses e à frequência das aplicações, onde seriam necessárias várias aplicações anuais e sucessivas até que seus efeitos sobre o C-orgânico do solo fossem detectados por um período superior ou igual a um ano.

Quanto ao P no solo, considerando os tratamentos sob adubação mineral, embora o Argissolo tenha recebido dose de 330 mg kg^{-1} e o Cambissolo de apenas 110 mg kg^{-1} , o teor no Cambissolo ($15,8 \text{ mg kg}^{-1}$) foi significativamente maior que no Argissolo ($8,2 \text{ mg kg}^{-1}$), não ocorrendo diferenças expressivas em relação aos teores iniciais nesses solos ($6,0 \text{ mg kg}^{-1}$ no Argissolo e $22,0 \text{ mg kg}^{-1}$ no Cambissolo, conforme Tabela 2). Admitindo como improvável que, entre os dois tratamentos considerados, tenha ocorrido grande diferença de extração deste nutriente pelas plantas, verifica-se que a adubação com fontes solúveis de P (neste caso, superfostato simples) não garante alta disponibilidade do nutriente no solo ao final do ciclo da cultura, mesmo no decurso de poucos meses, possivelmente em decorrência da adsorção deste no solo, que passaria a formas pouco lábeis.

Considerando o teor de P no lodo ($6,14 \text{ g kg}^{-1}$) e a maior dose de lodo aplicada, o fornecimento de P foi de 228 mg kg^{-1} em ambos os solos (valor intermediário ao aplicado via adubação mineral), enquanto o fornecimento médio para os tratamentos sob os diversos níveis de lodo de esgoto (incluindo a testemunha) foi de 74 mg kg^{-1} , inferior ao aplicado via adubação mineral. Apesar disso, o teor médio de P no solo dos tratamentos sob adubação mineral ($12,0 \text{ mg kg}^{-1}$) foi significativamente inferior ao verificado para os tratamentos sob níveis de lodo ($22,3 \text{ mg kg}^{-1}$), revelando que o fósforo do lodo está menos sujeito a processos de adsorção do solo. Tal resultado está de acordo com o que Hue (2005) afirma, que além de ser fonte de P, o lodo pode atuar diminuindo a adsorção do elemento em solos, graças ao elevado teor de matéria orgânica que poderá fornecer íons orgânicos que competem com o fosfato pelos sítios de adsorção.

Em relação aos tratamentos do fatorial solo x lodo, o desdobramento da interação (Figura 7) revelou que o incremento nos teores de P foi mais expressivo no Argissolo que no Cambissolo, aumentando, respectivamente, de $6,8$ e $12,4 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento controle para $60,8$ e $47,2 \text{ mg kg}^{-1}$ na maior dose de lodo. Tal comportamento revela que o Cambissolo, mesmo tendo teor de argila inferior ao do Argissolo, apresenta maior poder tampão em relação ao fósforo, o que possivelmente está relacionado à natureza da argila nele presente, que inclui argilas expansivas (2:1) e outras de baixa cristalinidade.

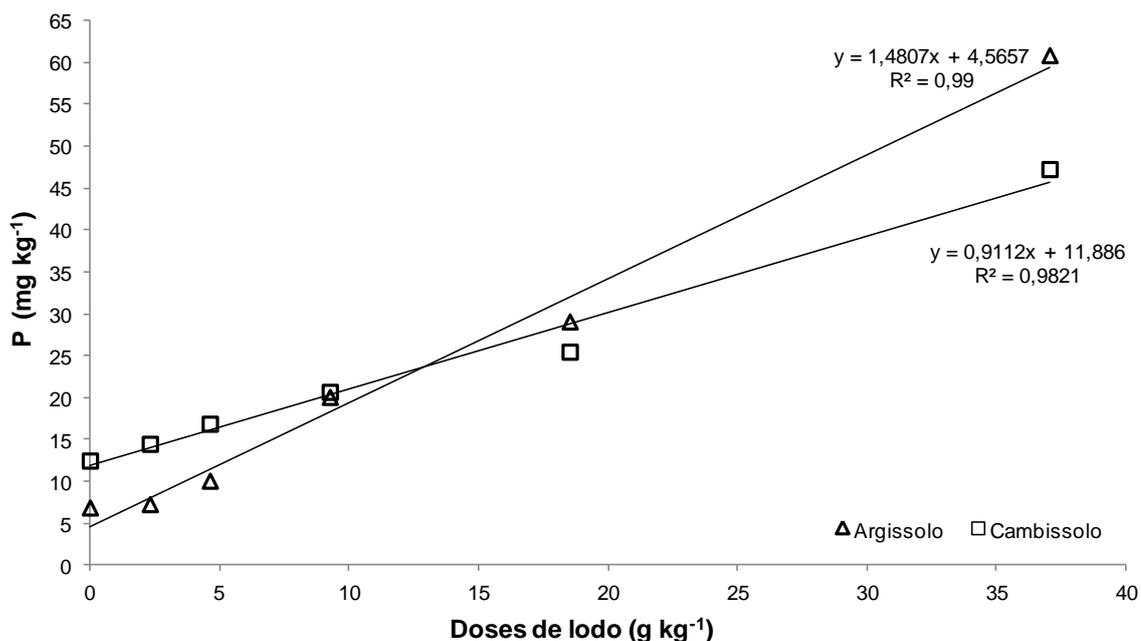


Figura 7: Teores de fósforo no Argissolo e no Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Nascimento et al. (2004), aplicando lodo de esgoto em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, observaram que os teores de P mais que dobraram do controle ($1,60 \text{ mg dm}^{-3}$) em relação a maior dose aplicada (60 Mg ha^{-1} – $3,46 \text{ mg dm}^{-3}$). No entanto, os autores destacaram que mesmo com o aumento nos teores de P o mesmo ainda se encontrava em valores baixos para a cultura utilizada, milho. Segundo May et al. (2013) o teor de P no solo adequado para cultivo de sorgo sacarino deve estar acima de 40 mg dm^{-3} , assim como foi observado nos tratamentos utilizando lodo no presente trabalho.

Os valores de pH (Tabela 6) não apresentaram diferença significativa para o contraste C2, que compara ambos os solos sob adubação mineral. Enquanto no Cambissolo, que não recebeu calagem, o valor médio foi de 6,2 (era de 6,0 no solo original), no Argissolo, que recebeu calagem, o valor médio atingiu 6,0, considerado adequado para a cultura do sorgo (e evidenciando um expressivo aumento em relação ao pH do solo original, que era 4,9).

Para o contraste C1, a média de pH dos dois tratamentos com adubação mineral (6,1) foi inferior à média dos 12 tratamentos sob níveis de lodo (6,3), evidenciando a eficiência das doses de lodo aplicadas em corrigir a acidez dos solos, em particular do Argissolo. É importante destacar que, devido à acidez da maior parte dos solos brasileiros, é muito comum a adoção de práticas agrícolas

de correção do pH dos solos por meio da aplicação de calcário. Dependendo da proporção de cal e das doses de uso, o lodo alcalino pode minimizar ou mesmo substituir essa operação, trazendo grandes vantagens ao produtor rural (Andreoli, 2011).

A interação dos fatores solo x lodo (F1 X F2) foi significativa, verificando-se, na Figura 8, que ocorreu aumento linear nos valores de pH dos solos com aumento das doses de lodo, sendo este aumento mais pronunciado no Argissolo (variou de 5,9 a 7,1) que no Cambissolo (de 6,0 a 6,9). A capacidade de troca catiônica (CTC) a pH 7,0 mais elevada do Cambissolo (13,20 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) proporciona maior poder tampão a esse solo que ao Argissolo (cuja CTC a pH 7,0 é 6,52 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$). Segundo Melo et al. (2001), a CTC de um solo diz respeito ao número de cargas negativas que existe na superfície dos colóides e dá ideia de sua capacidade de adsorver nutrientes catiônicos das plantas, no caso de K, Ca e Mg. Funciona também como indicador do poder tampão do solo, ou seja, de sua capacidade de resistir às mudanças no pH.

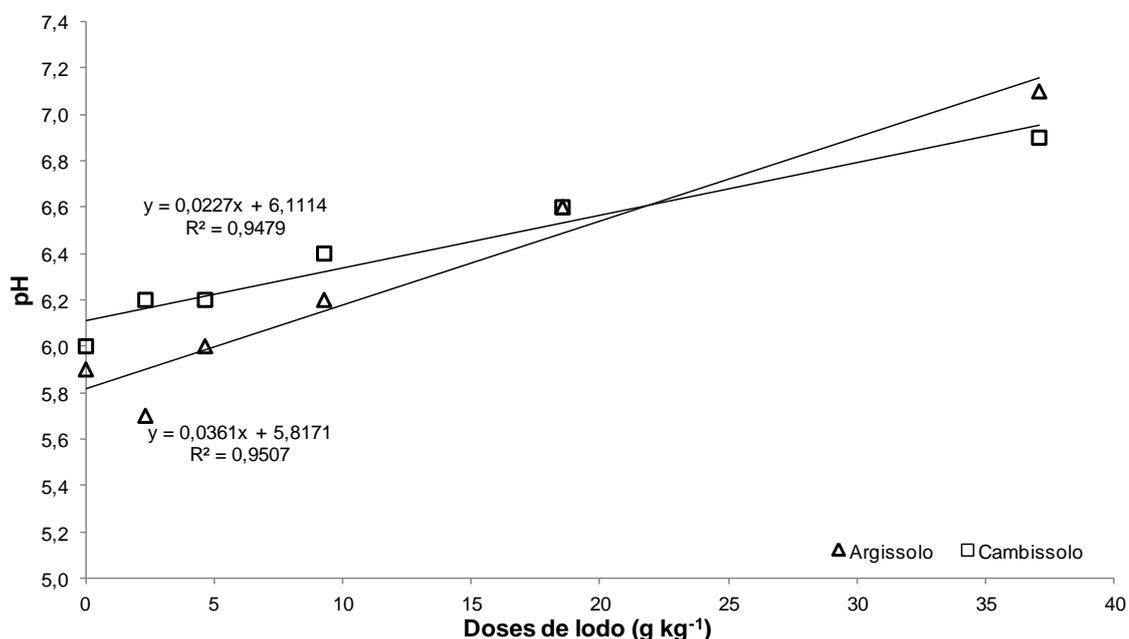


Figura 8: Valores de pH no Argissolo e no Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Fia et al. (2005), utilizando diferentes doses de lodo calcado em um Latossolo Vermelho Amarelo Distroférrico, observaram que a maior dose de lodo utilizada (168,4 Mg ha^{-1}) elevou o pH do solo de 4,7 para 6,8. Segundo os autores

o aumento de pH do solo para a faixa 5,5-6,5 é desejável, por proporcionar a disponibilização de macronutrientes e micronutrientes e reduzir, no caso de problemas de excesso, a disponibilidade de Cu, Fe, Mn, Zn e Al, os quais poderiam trazer efeitos tóxicos às plantas (Oliveira et al., 2005).

Nascimento et al. (2004), avaliando os efeitos da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto em um Argissolo Vermelho-Amarelo e em um Espodossolo Cárbico, observaram que os valores de pH de ambos os solos (7,3 e 7,2), que anteriormente haviam sido corrigidos através de calagem, apresentaram decréscimos lineares e significativos com o aumento das doses utilizadas, ao contrário do observado neste experimento; no entanto, mesmo para a maior dose aplicada (60 Mg ha^{-1}), o pH permaneceu em valores adequados para o crescimento de plantas (5,9 e 6,2), para os dois solos mencionados.

Para o Ca foram observadas diferenças significativas para os contrastes C1 e C2 (Tabela 5). No C1 a média dos dois tratamentos com adubação mineral ($4,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi inferior à média dos 12 tratamentos sob níveis de lodo ($6,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), o que decorre do elevado teor de Ca no lodo ($111,7 \text{ g kg}^{-1}$), consequência do uso da caleação (cal hidratada - Ca(OH)_2) - na dose de 15%) para sua higienização e estabilização. Considerando a média das doses de lodo aplicadas aos solos nos referidos 12 tratamentos (12 g kg^{-1}), a adição de Ca é da ordem de $6,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, maior que o adicionado aos solos sob adubação mineral por meio da calagem e aplicação de superfosfato simples.

No contraste C2, que compara os dois solos sob adubação mineral, verifica-se que o teor de Ca foi maior no Cambissolo que no Argissolo. Para este último o teor, que era de $1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo original, ficou em $2,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ao final do experimento, consequência principalmente da calagem realizada para correção do pH. Para o Cambissolo, que não recebeu calcário, o teor também aumentou, porém de forma menos acentuada, passando de $4,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo original para $5,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ao final do experimento. Apesar de que alterações químicas no solo possam decorrer das condições térmicas, hídricas e de aeração inerentes ao cultivo em vasos, parte do incremento do teor de Ca no Cambissolo (e também no Argissolo) pode ser consequência da adubação com superfosfato simples, que contém Ca em quantidade correspondente a 25-28% de CaO (Freire et al.; 2013). Considerando a dose de adubo aplicada em cada solo, sua completa solubilização e a total manutenção do Ca no complexo de troca, o

incremento no teor de Ca seria da ordem de $1,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o Cambissolo e de $3,95 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o Argissolo.

Em relação aos tratamentos do fatorial, o desdobramento da interação (Figura 9) revelou que os teores de Ca aumentaram com o aumento das doses de lodo segundo funções quadráticas, porém de forma mais pronunciada no Argissolo que no Cambissolo. Enquanto no primeiro os valores encontrados no controle e na maior dose foram, respectivamente, de 2,2 e $10,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no segundo foram, também respectivamente, de 5,5 e $13,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, comportamento esse que decorre do já mencionado maior poder tampão do Cambissolo.

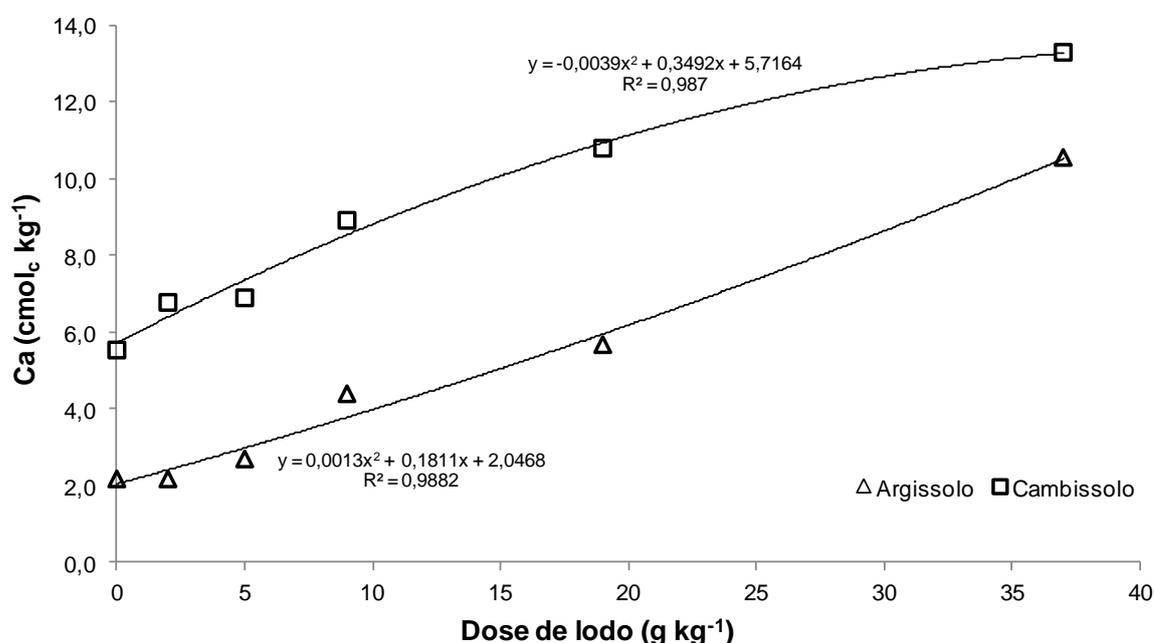


Figura 9: Teores de cálcio no Argissolo e no Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

O Mg apresentou resposta para análise estatística semelhante ao Ca, sendo apenas o efeito simples do fator dose (F2) não significativo. No entanto, enquanto para o contraste C2 (solos sob adubação mineral) os teores tiveram comportamento similar ao Ca, com a média no Cambissolo ($3,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) maior que no Argissolo ($1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), para o C1 o comportamento foi inverso ao do Ca, com a média dos solos sob adubação mineral ($2,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi superior a média dos tratamentos com lodo, incluídas as testemunhas, nos dois solos ($2,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). No primeiro caso, a adição de calcário apenas no Argissolo não foi

suficiente para reverter a superioridade inicial do Cambissolo quanto ao teor de Mg (era de $3,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o Cambissolo e de $1,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o Argissolo - Tabela 2), seja por ter sido utilizado calcário pobre em Mg, seja pela maior capacidade do Cambissolo em reter cátions quando no mesmo pH do Argissolo. No segundo caso, ressalta-se o fato do lodo utilizado ter sido caleado com cal hidratada, fonte apenas de Ca, o que o manteve muito pobre em Mg ($3,07 \text{ g kg}^{-1}$ - Tabela 2). Em ambos os casos, contrastes C1 e C2, a elevada extração de Mg pelo sorgo pode ter reduzido eventuais efeitos no início do cultivo. May et al. (2013) afirmam que no cultivo do sorgo sacarino ocorre grande exportação de Mg, devendo-se dar preferência a corretivos com menor relação Ca:Mg. Segundo os autores, o uso de corretivos com maior relação entre esses nutrientes pode levar à deficiência de Mg ao longo de cultivos. Sendo assim, a utilização do lodo caleado pode representar um problema para a cultura do sorgo, uma vez que a grande quantidade de cálcio adicionada ao lodo desloca o magnésio do complexo de troca do solo, impedindo sua absorção.

Para os tratamentos do fatorial, o desdobramento da interação (Figura 10) mostra que, de maneira oposta ao observado para o Ca, com o aumento das doses de lodo verifica-se redução nos teores de Mg nos solos. Os valores encontrados no controle e na maior dose variaram de 1,08 a $0,78 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no Argissolo, e de 3,74 a $2,76 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no Cambissolo. Esta redução é consequência da elevação do teor de Ca no solo, advindo do lodo caleado, que concorre com o Mg e com outros cátions pelos sítios de troca e desloca-os para a solução do solo. Se, em um primeiro momento, o aumento da concentração (do íon deslocado) na solução do solo pode favorecer a nutrição da cultura, também deixa tais cátions menos sujeitos à remoção por lixiviação, pois aumenta a CTC efetiva. Então, há que se atentar para a manutenção da relação entre nutrientes (Ca:Mg:K) em níveis não prejudiciais à absorção desses pelas culturas, tanto no curto como no médio ou longo prazo.

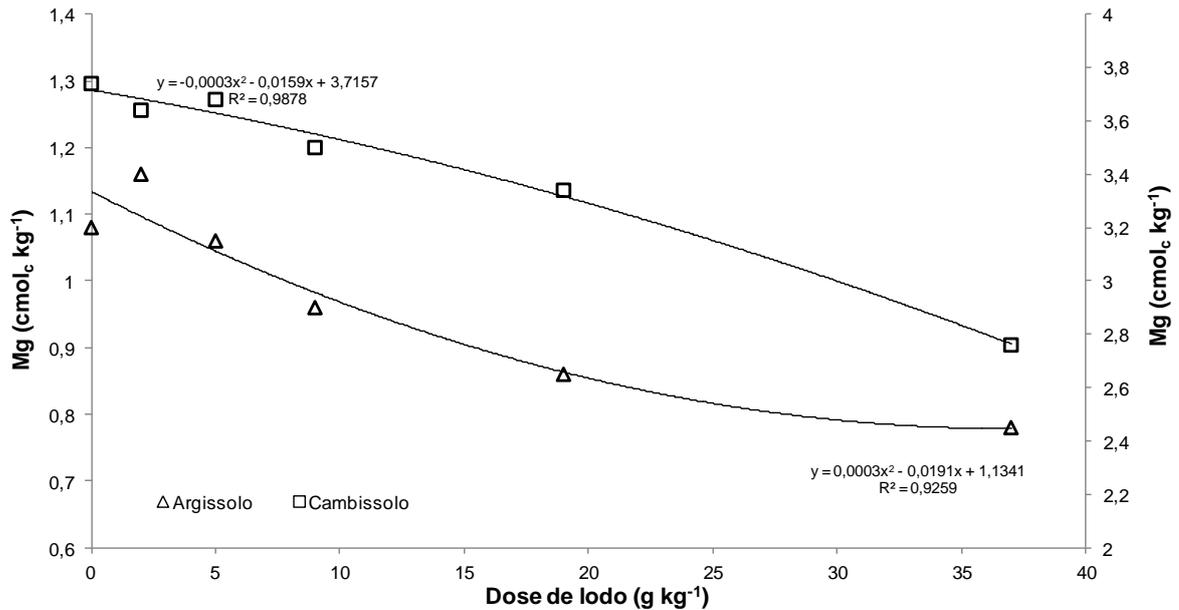


Figura 10: Teores de magnésio no Argissolo e no Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

A inter-relação entre os nutrientes cálcio e magnésio na nutrição vegetal está relacionada à proximidade de suas propriedades químicas, como o raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade, fazendo com que haja competição pelos sítios de adsorção no solo, e na absorção pelas raízes. Como consequência, a presença de um pode prejudicar os processos de adsorção e absorção do outro, fato ocorrente para os íons Ca^{+2} e Mg^{+2} (Orlando Filho et al.; 1996).

No presente caso, considerando ambos os solos sob adubação mineral (contraste C2), a relação Ca:Mg foi significativamente maior no Argissolo que no Cambissolo. Em relação ao solo original, o valor aumentou de 1,3 para 1,6, no Cambissolo, e de 0,9 para 2,8, no Argissolo. Enquanto o primeiro que recebeu moderada adubação com superfosfato simples, o segundo recebeu dose de superfosfato simples três vezes maior e também calcário, ambos fontes de Ca. Conforme contraste C1, o aumento da relação Ca:Mg foi ainda mais destacada nos solos que receberam aplicação de lodo calcado, rico em Ca, atingindo o valor de 2,6 (média de 12 tratamentos), estatisticamente superior à média dos dois solos sob adubação mineral, que foi de 2,1.

Para o fatorial solo x lodo as relações Ca:Mg encontradas constam na Figura 11, observando-se, em função das doses de lodo, incremento linear para o

Cambissolo e quadrático para o Argissolo que, conforme já discutido, tem menor poder tampão. Para a maior dose de lodo aplicada ($37,09 \text{ g kg}^{-1}$), as relações Ca:Mg foram de 13,5 para o Argissolo e de 4,8 para o Cambissolo, enquanto para o controle foram de 2,0 e 1,5, respectivamente, para os mesmos solos.

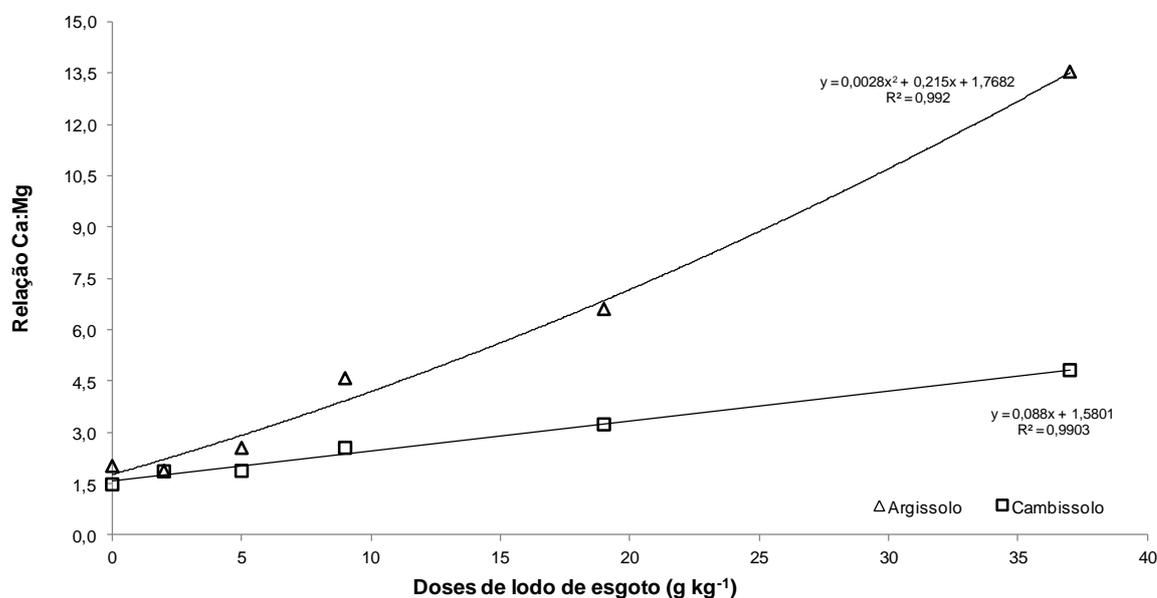


Figura 11: Relação Ca:Mg no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Embora seja sabido que a relação Ca:Mg no solo contribui com a sua fertilidade, sendo uma das condições que o solo oferece à planta na absorção de nutrientes, não se sabe ao certo até quando a relação Ca:Mg no complexo de troca do solo vai afetar as plantas de modo negativo (Costa et al., 2012). Rosolem et al. (1984), observaram em seu estudo que as diferentes relações de Ca/Mg não afetaram as produções de sorgo sacarino. Segundo Medeiros et al. (2008), a maioria dos trabalhos considera relações Ca:Mg entre 4:1 e 8:1 como adequadas para as plantas, valores estes que, no presente trabalho, foram superados quando a maior dose de lodo foi aplicada ao Argissolo. Por ter sido submetido à calcação, o lodo de esgoto utilizado no presente trabalho teve seus teores de cálcio aumentados, ocasionando, conseqüentemente, desbalanço entre esses nutrientes, apontando que a natureza dos resíduos adicionados ao solo podem modificar tais relações.

Ricci et al. (2010), avaliando o potencial de dosagens de um composto orgânico de lodo de esgoto e resíduos de roçagem na recuperação de um solo

decapitado, observaram aumento na relação Ca:Mg ao longo de dois anos de aplicação do composto, sendo esta relação no controle de 2,0 e na maior dose (80 Mg ha^{-1}) de 4,1, dentro dos limites mencionados por Medeiros et al. (2008).

Para o K, o teor inicial no Cambissolo (248 mg kg^{-1}) era três vezes maior que no Argissolo (83 mg kg^{-1}), de modo que no tratamento adubação mineral apenas este último recebeu a adição de K (34 mg kg^{-1}), ainda assim insuficiente para promover a equiparação dos solos. Como pode ser verificado no contraste C2 da Tabela 6, ao final do ciclo de cultivo do sorgo, o teor de K em ambos os solos foi inferior ao teor inicial, mas ainda superior no Cambissolo.

Não foi observada diferença significativa para o C1, sendo que a média dos dois solos sob adubação mineral ($46,0 \text{ mg kg}^{-1}$) não diferiu da média geral dos tratamentos sob os diversos níveis de lodo de esgoto ($45,5 \text{ mg kg}^{-1}$). A despeito das doses de lodo utilizadas serem elevadas (média, entre os seis níveis, de 12 g kg^{-1}), como o lodo é pobre nesse nutriente ($1,22 \text{ g kg}^{-1}$), a adição de K ao solo foi de apenas $45 \mu\text{g kg}^{-1}$, na maior dose de lodo, e de $15 \mu\text{g kg}^{-1}$, na média dos seis níveis. Tsutiya (2001) esse comportamento é esperado, uma vez que o K encontra-se predominantemente sob forma iônica nas águas residuárias e durante o tratamento nas estações de tratamento de esgoto tende a ficar em solução, o que explica as baixas concentrações do elemento em lodos de esgoto.

Em relação aos tratamentos do fatorial solo x lodo, a interação foi significativa, sendo que o desdobramento da interação evidenciou que, para ambos os solos, os teores de K diminuíram com o aumento das doses de lodo (Figura 12). Os valores de K encontrados nos tratamentos controle e maior dose de lodo variaram, respectivamente, de $42,4$ a $20,4 \text{ mg kg}^{-1}$, para o Argissolo, e de $67,2$ a $53,4 \text{ mg kg}^{-1}$, para o Cambissolo. Segundo faixas de disponibilidade mencionadas em May et al. (2013), os teores de K no Argissolo passaram de médio ($41\text{-}70 \text{ mg kg}^{-1}$) para baixo ($< 40 \text{ mg kg}^{-1}$) e no Cambissolo de adequado ($61\text{-}120 \text{ mg kg}^{-1}$) para médio.

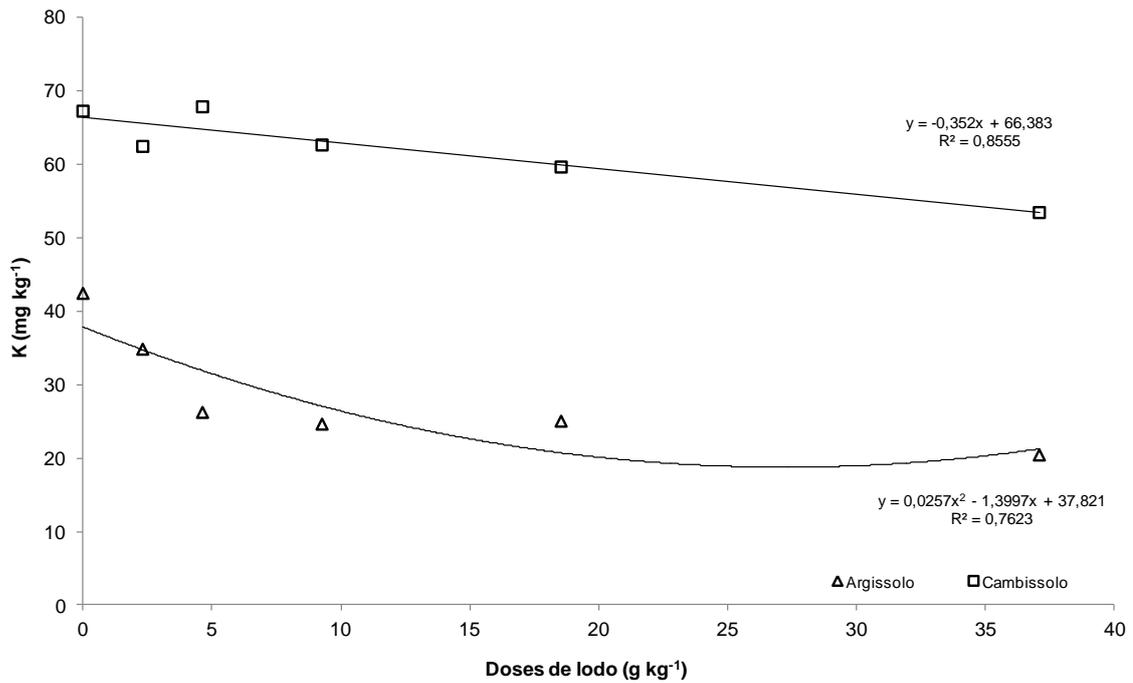


Figura 12: Teores de K no Argissolo e no Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Em decorrência da higienização do lodo com cal, dá-se o acréscimo de elevada quantidade de Ca, o que acentua a redução da sua relação K/Ca (Simonete et al., 2003). A disponibilidade de K no solo e a sua absorção pelas plantas parecem estar relacionadas à disponibilidade dos cátions divalentes, Ca e Mg, dominantes do complexo de troca. Como a afinidade do íon K pelo complexo sortivo do solo é menor que a do Ca e Mg, a aplicação de lodo caleado favoreceria uma maior concentração de K na solução do solo. Assim, em um primeiro momento, enquanto sua lixiviação não é expressiva, a absorção do K pelas plantas seria favorecida em comparação com outros macronutrientes catiônicos, sendo o que se apresenta, em geral, em menor concentração no solo e maior na planta (Oliveira et al., 2001).

Simonete et al. (2003) utilizaram seis doses de lodo (0,10, 20, 30, 40 e 50 Mg ha⁻¹) em um Argissolo Vermelho-Amarelo, com intuito de avaliar seus efeitos nas propriedades químicas do solo e na produção de matéria seca e no acúmulo de nutrientes por plantas de milho. Os autores observaram que em relação ao K, embora a variação do teor no solo com a aplicação das doses de lodo tenha sido linear e a regressão significativa, o aumento não foi suficiente para mudar a classe de disponibilidade do nutriente, permanecendo classificado como baixo. O

teor de K presente no lodo utilizado pelos autores ($1,3 \text{ g kg}^{-1}$) foi próximo ao encontrado no presente trabalho.

Para o Na foram verificadas diferenças altamente significativas para os contrastes C1, C2 e C3. No C1 a média da adubação mineral ($0,37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) foi superior à média geral dos tratamentos sob diversos níveis de lodo de esgoto ($0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Para o C2 verificou-se diferença significativa entre os dois solos sob adubação mineral, onde o Cambissolo ($0,44 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) manteve sua superioridade sobre o Argissolo ($0,29 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Para o C3, também observou-se que o Cambissolo ($0,41 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) apresentou maior média de Na em relação ao Argissolo ($0,26 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) sob os níveis de lodo de esgoto testados.

Em relação aos tratamentos do fatorial solo x lodo, a interação foi significativa, sendo que o desdobramento da interação evidenciou que, para o Cambissolo, os teores de Na se mantiveram pouco alteráveis com o aumento das doses de lodo, sendo observado na dose de $4,6 \text{ g kg}^{-1}$ o valor mais baixo ($0,39 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e na maior dose e no controle o valor mais alto ($0,43 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (Figura 13). No entanto, para o Argissolo observou-se aumento de 71% no teor de Na do controle ($0,23 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) em relação a maior dose de lodo ($0,32 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

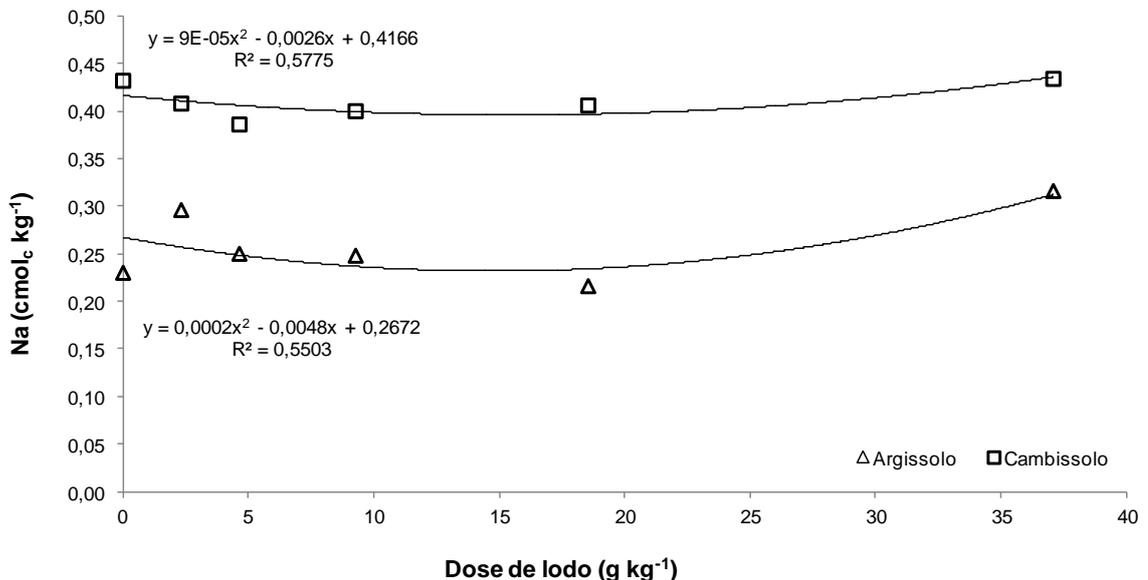


Figura 13: Teores de Na no Argissolo e no Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para a CTC foram verificadas diferenças altamente significativas para os contrastes C1, C2 e C3 (ou F1). No C1 a média da adubação mineral ($10,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) foi inferior à média geral dos tratamentos sob os diversos níveis de lodo de esgoto ($11,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, incluído a testemunha), uma vez que a adição de lodo ao solo implica no aumento do teor de matéria orgânica e, portanto, do tamanho do complexo de troca do solo. No C2 verificou-se a diferença entre os dois solos sob adubação mineral, com superioridade do Cambissolo ($13,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) em relação ao Argissolo ($7,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), valores estes semelhantes aos verificados no solo original (Tabela 2) e que reproduzem a superioridade do primeiro (Cambissolo: $12,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) em relação ao último (Argissolo: $6,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). A manutenção dos valores na mesma faixa justifica-se pela adubação mineral não adicionar material coloidal ao solo e, portanto, não interferir no tamanho do complexo de troca. Para o solo sob os diversos níveis de lodo, o contraste C3 (ou F1) permite verificar que a superioridade do Cambissolo sobre o Argissolo se mantém, porém com valores em um patamar mais elevado ($8,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o Argissolo e $15,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o Cambissolo). Os valores mais elevados se justificam, nesse caso, pelo fato da aplicação de lodo implicar na adição de material coloidal ao solo (ou seja, no aumento do tamanho de seu complexo de troca).

Para os tratamentos do fatorial, além do efeito simples de solo (F1), na Tabela 5 observa-se o efeito simples das doses de lodo (F2) sobre o teor da CTC, o que resultou no modelo geral de regressão linear $y = 0,01456x + 9,9869$, significativo a 1% de probabilidade. Na Figura 14, o referido modelo é apresentado como equações específicas para o Argissolo e para o Cambissolo, com mesmo coeficiente angular e diferindo quanto ao coeficiente linear.

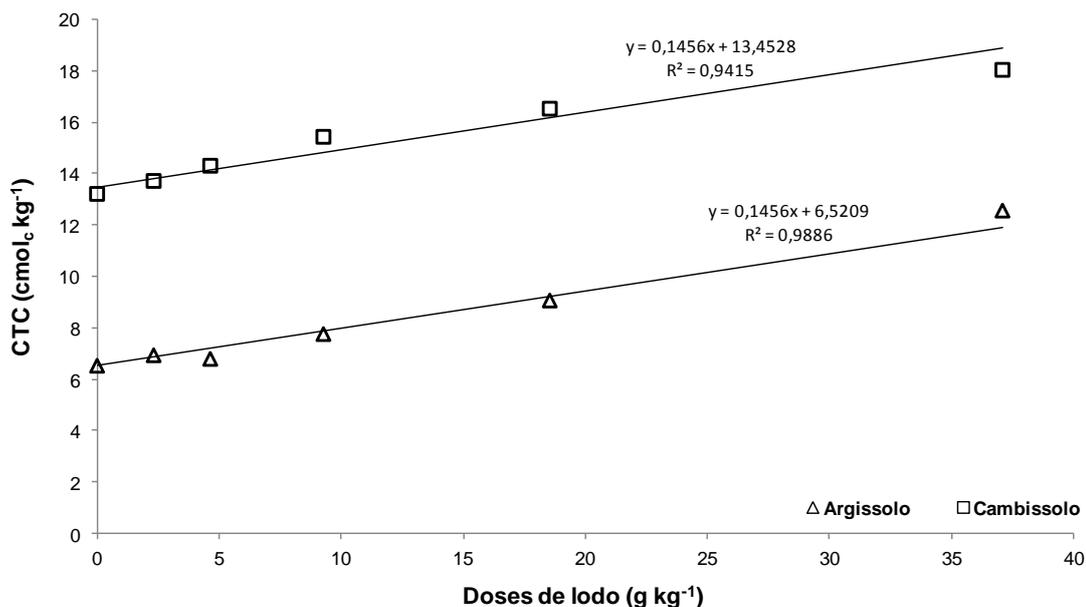


Figura 14: Valores da CTC (pH 7,0) no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Barbosa et al. (2002b), em um Latossolo Vermelho Eutroférrico, observaram que a acidez do solo, a CTC, a saturação por bases (V%), os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , P e de carbono aumentaram em função das doses de lodo caleado.

Os valores de CTC aumentaram linearmente com as doses de lodo, sendo os do controle e os da maior dose, respectivamente, de 6,52 e 11,92 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, no Argissolo, e de 13,45 e 18,85 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, no Cambissolo. Estes valores representaram incrementos na CTC de 82 e 40% no Argissolo e Cambissolo, respectivamente. Esses aumentos devem-se às cargas negativas presentes na superfície da matéria orgânica do lodo e que passam a compor o complexo de troca do solo, sendo quantificadas na análise laboratorial quando a amostra é colocada em contato com solução de acetato de cálcio tamponado a pH=7,0 para determinação da acidez potencial (H + Al).

Em relação aos valores de CTC efetiva foram observadas diferenças altamente significativas para todos os contrastes (C1, C2 e C3). Para o contraste C2, observa-se que a média do Argissolo (4,3 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) foi inferior a média do Cambissolo (10,1 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), assim como observado na CTC a pH 7,0. As argilas expõem cargas negativas em sua superfície à medida que o pH se eleva, sendo esses sítios de cargas expostos responsáveis pela elevação da CTC efetiva. Para

o contraste C1 observa-se que a média da adubação mineral ($7,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) foi inferior a média do fatorial ($10,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). As doses de lodo aplicadas, além de promoverem a elevação de pH e, portanto, a liberação de sítios de troca de cátions nas argilas, adicionam ao solo compostos orgânicos coloidais, os quais têm seus próprios sítios de troca e, a um dado pH de equilíbrio, vão incrementar ainda mais a CTC efetiva do solo. Nascimento et al. (2014) observaram que a adição de 50 t ha^{-1} de lodo caleado em um Cambissolo Háplico aumentou a CTC efetiva do solo em relação aos outros tratamentos utilizados. Os autores atribuíram tal resultado ao aumento do pH promovido pela calagem do solo e que promove a liberação das cargas negativas do solo.

Para os tratamentos do fatorial, além do efeito simples de solo (F1), na Tabela 5 observa-se o efeito da interação sobre o teor da CTC efetiva, o que resultou no modelo geral de regressão linear $y = 0,1722x + 8,5027$, significativo a 1% de probabilidade. Na Figura 15, o referido modelo é apresentado como equações específicas para o Argissolo e para o Cambissolo, com mesmo coeficiente angular e diferindo quanto ao coeficiente linear.

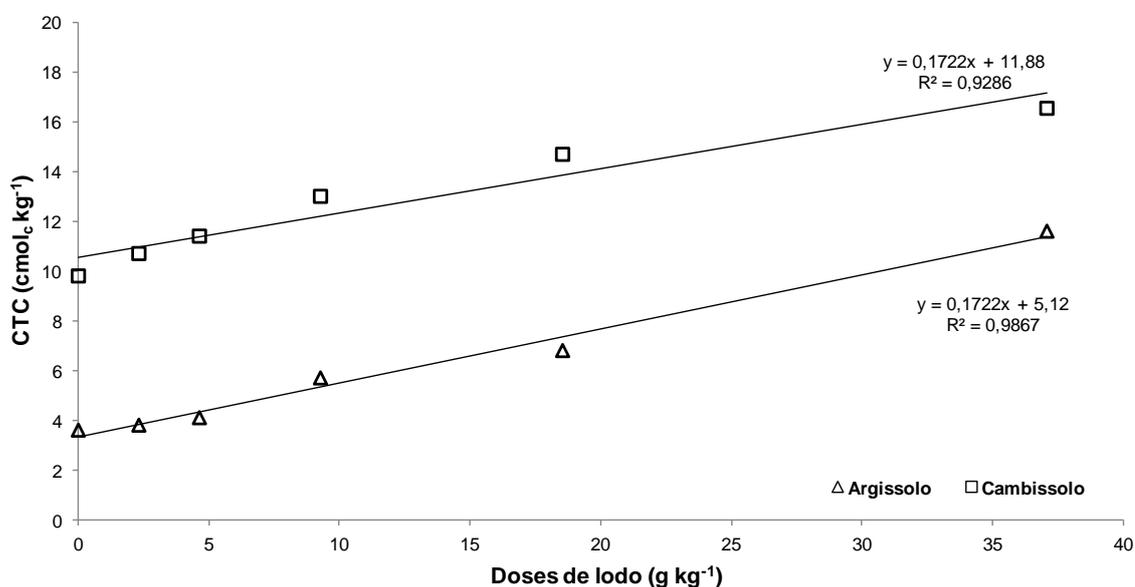


Figura 15: Valores da CTC efetiva no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Os valores de CTC efetiva, assim como da CTC a pH 7,0, aumentaram linearmente com as doses de lodo, sendo os do controle e os da maior dose, respectivamente, de 5,12 e 11,51 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no Argissolo, e de 11,88 e 18,26 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no Cambissolo. Segundo Oliveira et al. (2002), deve-se considerar que a estimativa da CTC pela soma de bases, como feita neste e em outros trabalhos, pode ocasionar superestimação dessa característica por causa dos teores de Ca e Mg presentes no lodo caleado. Estes autores concluíram que as alterações na CTC podem ser mais bem explicadas pela variação do pH do que pelos acréscimos de carbono orgânico decorrentes da incorporação do lodo ao solo. De qualquer modo, como salientam Nascimento et al. (2004), o aumento da retenção de cátions pela carga orgânica fornecida pelo lodo torna-se extremamente importante para solos de baixa CTC e pobres em matéria orgânica.

Para a saturação por bases (V%), observa-se pelo contraste C1 que a média da adubação mineral (66,5%) foi inferior as médias dos tratamentos com doses de lodo (76,0%). No C2 observou-se que a média da adubação mineral no Argissolo (58,2%) foi inferior a média da adubação mineral no Cambissolo (74,8%); assim como no C3 a média do Cambissolo (83,1%) adubado com doses de lodo foi superior a média do Argissolo (68,8%) sob os mesmos tratamentos, fato este que tem sido observado nas demais variáveis analisadas anteriormente, atribuído às características físicas e químicas iniciais dos solos estudados.

O efeito significativo da interação solo x lodo sobre a saturação por bases (V%) foi desdobrado na Figura 16, onde estão apresentadas as equações de regressão quadrática para os dois solos. Os valores do controle e da maior dose foram de 55,2% e 92,0%, para o Argissolo, e de 74,9% e 92,3%, para o Cambissolo. Estes valores representaram um incremento de 66 e 23% para o Argissolo e Cambissolo, respectivamente.

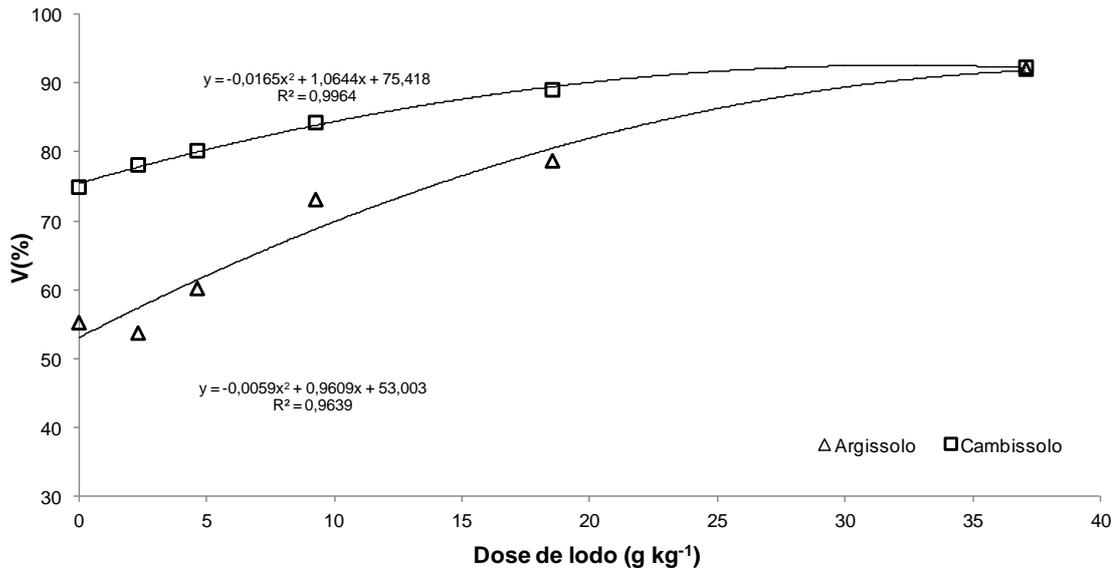


Figura 16: Valores da saturação por bases (V%) no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Bonini et al. (2015), estudando a recuperação dos atributos químicos de um Latossolo Vermelho degradado, utilizando lodo de esgoto e adubação mineral, verificaram que o aumento do pH observado no estudo corroborou os dados obtidos para a V%, que foram maiores nos tratamentos com lodo de esgoto e adubação mineral. Segundo os autores, tais resultados explicam-se pela substituição dos íons H^+ e Al^{+3} pelas bases trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{2+} , K^+) nos sítios de troca do solo.

4.2.1.2 - Efeito da aplicação do lodo nos atributos físicos

O resultado da análise de variância para os atributos físicos dos solos adubados com fertilizante mineral e sob níveis crescentes de lodo de esgoto está apresentado na Tabela 7, onde se observa que os contrastes testados - C1, C2 e C3 (ou fator F1) - mostraram-se significativos para diversas variáveis físicas, revelando que estas foram afetadas pelos tratamentos. Por outro lado, à exceção da microporosidade, as demais variáveis analisadas não sofreram efeitos significativos do fator dose de lodo, seja na média dos solos (F2), seja na interação solo x lodo (F1 X F2).

Tabela 7. Valores de quadrado médio para cada contraste ou fonte de variação (FV) considerada na análise de variância dos atributos físicos do solo do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Contraste ou FV	GL	AD	CC	PMP	MAP	MIP	PT	AR	DS
C1	1	0,0107**	0,0174**	0,0008 <i>ns</i>	0,0415**	0,0171**	0,0053**	0,0419**	0,0298**
C2	1	0,0009 <i>ns</i>	0,0002 <i>ns</i>	0,0003 <i>ns</i>	0,0086*	0,0014 <i>ns</i>	0,0172**	0,0137**	0,1274**
F1 (ou C3)	1	0,0580 **	0,0812**	0,0019**	0,0235**	0,0913**	0,0221**	0,0185**	0,2231**
F2	5	0,0003 <i>ns</i>	0,0009 <i>ns</i>	0,0008 <i>ns</i>	0,0048 <i>ns</i>	0,0007 <i>ns</i>	0,0021 <i>ns</i>	0,0056 <i>ns</i>	0,0118 <i>ns</i>
F1 x F2	5	0,0005 <i>ns</i>	0,0001 <i>ns</i>	0,0003 <i>ns</i>	0,0006 <i>ns</i>	0,0001*	0,0002 <i>ns</i>	0,0005 <i>ns</i>	0,0019 <i>ns</i>
CV(%)	-	24,90	7,87	7,75	18,54	7,25	3,14	16,51	4,34

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; C1- contraste ortogonal entre “adubação mineral” (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); F1 (ou contraste C3)- fator “solo” do fatorial solo x lodo (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- fator “adubação com lodo” do fatorial solo x lodo (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); e F1xF2- interação entre F1 e F2 no fatorial solo x lodo; CV- coeficiente de variação. Atributos físicos analisados: AD (água disponível), CC (solo na capacidade de campo), PMP (solo no ponto de murcha permanente), MAP (macroporosidade), MIP (microporosidade), PT (porosidade total), AR (aeração na capacidade de campo), Ds (densidade do solo). Teste F: ** - significativo ao nível de 1% de probabilidade; * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; e *ns* - não significativo.

Tabela 8. Médias dos atributos físicos do solo nos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3 do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Tratamento	AD	CC	PMP	MAP	MIP	PT	AR	DS
	-----m ³ m ⁻³ -----					%	m ³ m ⁻³	g cm ⁻³
Contraste C1								
Adubação mineral	0,16a	0,40a	0,24a	0,15b	0,42a	0,57b	0,17b	1,12a
Fatorial solo x lodo	0,12a	0,35b	0,23a	0,21a	0,38b	0,59a	0,24a	1,06b
Contraste C2								
AM-Arg	0,15a	0,39a	0,25a	0,12b	0,41a	0,53b	0,13b	1,23a
AM-Camb	0,16a	0,40a	0,24a	0,17a	0,44a	0,61a	0,21a	1,00b
Contraste C3 (ou fator F1)								
Lodo-Arg	0,09b	0,32a	0,23b	0,23a	0,34b	0,58b	0,26a	1,12a
Lodo-Camb	0,15a	0,39b	0,24a	0,19b	0,42a	0,61a	0,22b	1,00b

C1- contraste ortogonal entre “adubação mineral” (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); C3 (ou fator F1)- fator “solo” do fatorial solo x lodo (Lodo-Arg: Argissolo; Lodo-Camb: Cambissolo). Atributos físicos analisados: AD (água disponível), CC (solo na capacidade de campo), PMP (solo no ponto de murcha permanente), MAP (macroporosidade), MIP (microporosidade), PT (porosidade total), AR (aeração na capacidade de campo), Ds (densidade do solo). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5%; médias não seguidas de letras no contraste C3 foram comparadas posteriormente considerando-se o desdobramento da interação significativa solo x lodo.

Segundo Kiehl (1979), são considerados valores ideais para a macroporosidade, $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e para a microporosidade, $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, do volume total de poros do solo. Entretanto, Argenton et al. (2005) afirmam que valores de macroporosidade menores do que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem afetar o desenvolvimento das raízes, a ponto de comprometer a produtividade vegetal. Conforme consta na Tabela 8, nenhum dos valores de microporosidade e macroporosidade encontrados no presente trabalho foi menor que o valor crítico.

O contraste 2, que compara os solos sob adubação mineral (ou seja, sem adição da matéria orgânica do lodo), revela que a acomodação das partículas desses solos no vaso levou o Cambissolo a apresentar menor densidade e maior porosidade total, macroporosidade e porosidade de aeração que o Argissolo (Tabela 8). Por outro lado, atributos relacionados à quantidade de poros de menor diâmetro (microporosidade: $\leq 50 \text{ }\mu\text{m}$; capacidade de campo: $\leq 30 \text{ }\mu\text{m}$, ponto de murcha permanente: $\leq 0,2 \text{ }\mu\text{m}$; e água disponível: entre 30 e $0,2 \text{ }\mu\text{m}$) não diferiram entre os solos. Embora tais resultados possam ser encarados como uma simulação do que ocorreria no campo ao final de um ciclo de cultivo em que o solo tenha sido revolvido pelo preparo convencional, ressalta-se que os vasos diferem do campo por não haver tráfego e/ou operações mecanizadas, as quais poderiam alterar de forma expressiva e diferenciada o grau de compactação dos solos.

Pelo contraste 1 pode observar que a incorporação de lodo permitiu que os solos atingissem menor grau de compactação ao final do ciclo do sorgo, o que é revelado pelo menor valor da densidade e maiores valores de porosidade total, macroporosidade e porosidade de aeração, em relação aos solos sob adubação mineral (Tabela 8). A microporosidade, a umidade na capacidade de campo e a água disponível, por outro lado, foram maiores nos solos sob adubação mineral. Embora a compactação seja frequentemente associada à redução da qualidade agronômica do solo, pois reduz trocas gasosas e aumenta a resistência mecânica do solo (Letey, 1985; Mazurana, 2011), ela tem também seu lado positivo, pois, como observado na Tabela 8 para os solos sob adubação mineral, a conversão de poros de diâmetro maior em poros menores eleva a água disponível (já que poros menores que $30 \text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro retêm água sob 10 kPa de tensão). Para o ponto de murcha permanente a ausência de diferença estatística para o contraste 1 revela a baixa sensibilidade dessa variável às modificações estruturais no solo,

já que, segundo Libardi (1995), o PMP é determinado mais pela adsorção da água à superfície das partículas (ou seja, pela superfície específica do solo) do que pela capilaridade da água nos poros do solo (ou seja, pela estrutura).

Klein e Libardi (2002), estudando em um Latossolo Vermelho Ácrico as alterações decorrentes do cultivo agrícola em comparação à mata nativa, observaram, semelhantemente ao presente trabalho, que a compactação levou à redução da quantidade de poros de maior diâmetro, ao aumento de poros de tamanho intermediário (que retêm água na faixa disponível às plantas) e à não alteração expressiva da quantidade de crioporos (de diâmetro menor que 0,2 μm e que retêm água além do ponto de murcha permanente, sob tensões superiores a 1500 kPa).

Para o contraste C3 (ou fator F1), que compara as médias dos solos sob os níveis de lodo de esgoto (inclusive incluídas as testemunhas), foram constatadas diferenças significativas para todas as variáveis analisadas (Tabelas 7 e 8). Para o Cambissolo pode-se observar que a incorporação do lodo de esgoto praticamente não alterou os valores das variáveis físicas em relação aos observados no contraste 2, com o solo sob adubação mineral (ou seja, sem adição da matéria orgânica do lodo). Este resultado é corroborado por Marciano et al. (2001), que afirmam que quando o solo originalmente possui boa estrutura, podem não ocorrer melhorias nos atributos físicos, mesmo com a aplicação de grandes quantidades de lodo de esgoto, principalmente em propriedades com grande variabilidade espacial, como as de transmissão de água no solo.

Para o Argissolo verifica-se que o lodo promoveu a acomodação das partículas em uma condição de menor compactação em relação ao solo sob adubação mineral (ou seja, sem adição da matéria orgânica do lodo), com redução da densidade e aumento da porosidade. Esse menor adensamento, embora insuficiente para eliminar as diferenças de densidade e porosidade entre os solos observadas no contraste C2), incrementou o quantitativo de poros grandes o suficiente para que o Argissolo passasse a superar o Cambissolo em relação à macroporosidade e à porosidade de aeração, revertendo a superioridade do Cambissolo observada no contraste C2, demonstrando uma tendência da melhoria dessas variáveis neste solo após a incorporação do lodo de esgoto. Segundo Resende et al. (2012), a porosidade do solo está relacionada, dentre outros, com a estrutura e textura do solo. De maneira geral, solos mais

arenosos apresentam maior macroporosidade que solos argilosos. A macroporosidade do solo (poros > 0,05 mm) tem a função de drenagem do solo e, conseqüentemente, relação com a permeabilidade do solo e susceptibilidade à erosão. Todavia, no presente trabalho foi possível observar que a incorporação de matéria orgânica através do lodo possibilitou alterações benéficas e desejáveis na porosidade do Argissolo. Por outro lado, o menor adensamento levou o Argissolo a apresentar menores valores de microporosidade, umidade na capacidade de campo, umidade no ponto de murcha permanente e água disponível, comparativamente ao solo sob adubação mineral (sem adição de lodo), sendo as citadas reduções suficientes para que o Argissolo passasse a ser inferior ao Cambissolo em relação às referidas variáveis, modificando a igualdade entre os solos observada no contraste C2.

Camilotti et al. (2006) objetivaram avaliar se a aplicação anual de lodo de esgoto e/ou vinhaça causaria alteração em alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico argiloso após as colheitas do 3º (19,5 e 39 Mg ha⁻¹ de lodo e 435 e 870 m³ha⁻¹ de vinhaça) e 4º cortes (25,5 e 51 Mg ha⁻¹ de lodo e 587 e 1.174 m³ha⁻¹ de vinhaça) da cultura da cana-de-açúcar. Os autores verificaram que a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade, nas 5 camadas do solo avaliadas (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm), não foram alteradas por nenhum dos tratamentos, e concluíram que os atributos físicos do solo não foram alterados mesmo após a realização de quatro aplicações anuais sucessivas e a conclusão de quatro ciclos da cultura.

Em relação à microporosidade, o desdobramento da interação solo x lodo (Figura 17) revelou, para todos os níveis de lodo testados, que o Cambissolo apresentou valores significativamente superiores aos do Argissolo. Além disso, o incremento nas doses de lodo não afetou a microporosidade do Argissolo, mas para o Cambissolo promoveu pequena, porém significativa, redução dos valores obtidos (de 0,42 no controle para 0,41 m³ m⁻³ na maior dose testada).

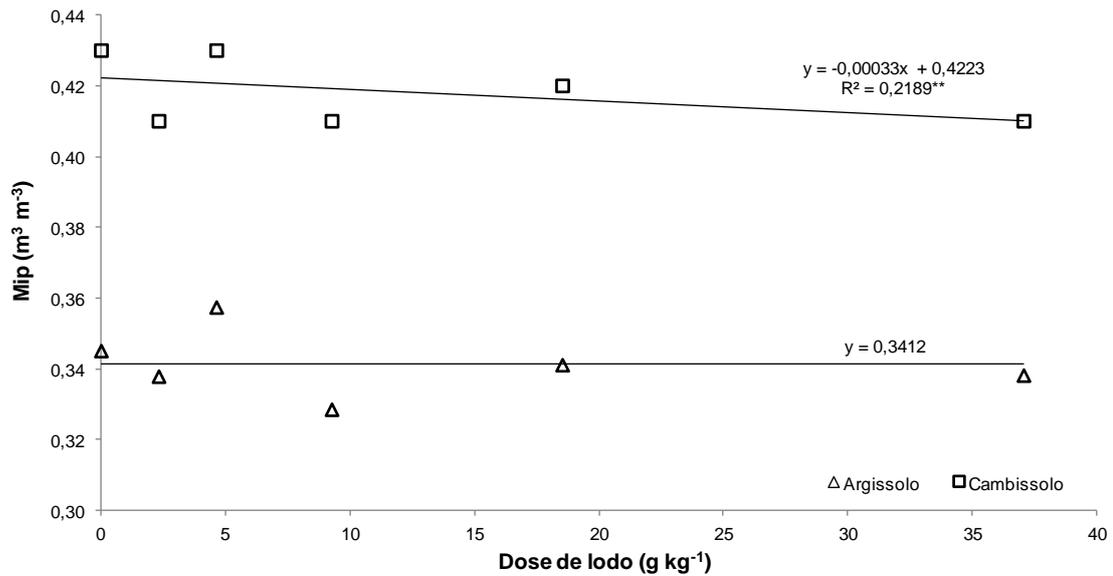


Figura 17: Microporosidade no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Melo et al. (2004), avaliando a aplicação de doses crescentes de biossólido em dois Latossolos, observaram que adições de até 50 Mg ha^{-1} do resíduo sólido durante cinco anos não causaram nenhum efeito na porosidade total e na microporosidade dos dois Latossolos, mas promoveram aumento da macroporosidade na camada de 0-10 cm. Ricci et al. (2010), também não observaram alterações na microporosidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, após incorporação de doses de composto de lodo de esgoto ($0, 20, 40$ e 80 Mg ha^{-1}). Os autores observaram que as diferentes dosagens do composto de lodo alteraram significativamente a macroporosidade do solo nas parcelas experimentais. O aumento da macroporosidade foi relacionado com o aumento da dose do composto de lodo e a dose de 40 Mg ha^{-1} proporcionou as maiores médias de macroporosidade. Os autores atribuíram tais resultados ao efeito da matéria orgânica como condicionadora do solo, o que causaria maior aeração pela descompactação das camadas. Sendo assim, observa-se que os atributos físicos do solo estão diretamente relacionados ao manejo do solo, que engloba desde a utilização de maquinários até a incorporação de matéria orgânica por diferentes fontes, pois o grau de compactação que as ações antrópicas o submetem pode alterar a porosidade total e conseqüentemente a relação entre macro e microporos.

4.2.2 – Alterações no crescimento e desenvolvimento do sorgo sacarino

4.2.2.1 - Efeito da aplicação do lodo nos teores de nutrientes do sorgo

O resultado da análise de variância para os teores foliares de nutrientes no sorgo sacarino adubado com fertilizante mineral e níveis crescentes de lodo está apresentado na Tabela 9, enquanto na Tabela 10 são comparadas as médias dos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3.

Quanto à magnitude dos teores foliares dos nutrientes, embora a análise nutricional não se refira à folha diagnóstica e sim a todas as folhas da planta, os valores observados na Tabela 10 são compatíveis com os de outros trabalhos (Rosolem e Malavolta, 1982; Coutinho et al., 1985).

Em relação ao contraste C2, que compara os dois solos sob adubação mineral, verifica-se equivalência entre ambos para K e S, superioridade do Argissolo para Ca, Mn e B, e superioridade do Cambissolo para P, Mg, Fe, Cu e Zn, refletindo, na nutrição do sorgo, a maior fertilidade natural do Cambissolo, mencionada em tópico anterior. Em particular, a superioridade do Ca (e também a inferioridade do Mg) no Argissolo deve-se, provavelmente, ao fato da calagem ter sido realizada apenas neste solo, e com uso de calcário calcítico, o que tornou a relação Ca:Mg mais elevada e, portanto, favorável à maior absorção do Ca e desfavorável à do Mg. Valichski et al. (2011) avaliaram o estado nutricional do coqueiro anão verde nas mesmas classes de solo avaliadas neste experimento. Os autores observaram que as plantas não se diferenciaram quanto aos teores foliares de P, porém para a maioria dos nutrientes os solos atuaram de forma diferenciada quanto ao seu suprimento para as plantas. As plantas cultivadas no Cambissolo apresentaram teores de Mg e Cu superiores aos das cultivadas no Argissolo, assim como observado no presente trabalho. Para o potássio e o cálcio as plantas cultivadas no Argissolo apresentaram teores mais elevados em suas folhas.

Tabela 9. Valores de quadrado médio para cada contraste ou fonte de variação (FV) considerada na análise de variância dos teores de nutrientes na folha do sorgo sacarino no experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

FV	GL	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
C1	1	0,198 <i>ns</i>	0,169 <i>ns</i>	0,009 <i>ns</i>	0,051 <i>ns</i>	0,136 <i>ns</i>	785,755 <i>ns</i>	21736,438**	0,020 <i>ns</i>	3,667 <i>ns</i>	346,345*
C2	1	5,376**	23,320 <i>ns</i>	1,041*	0,490*	0,095 <i>ns</i>	20346,415**	8952,153**	0,211**	215,095**	731,512**
F1 (ou C3)	5	16,551**	103,513**	10,963**	0,719**	0,076 <i>ns</i>	40539,036**	7362,308**	0,820**	375,601**	158,798 <i>ns</i>
F2	1	0,859 <i>ns</i>	52,200 <i>ns</i>	2,456 ^{ns}	0,235 <i>ns</i>	0,808 <i>ns</i>	9319,560 <i>ns</i>	39418,640 <i>ns</i>	0,054 <i>ns</i>	76,160 <i>ns</i>	247,077 <i>ns</i>
F1 x F2	5	1,730**	26,938**	1,000**	0,049 <i>ns</i>	0,472**	13560,992**	5620,001**	0,057**	77,446**	513,146**
CV(%)	-	9,85	16,08	6,43	6,53	12,56	5,35	7,93	12,27	5,50	8,70

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; C1- contraste ortogonal entre "adubação mineral" (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); F1 (ou contraste C3)- fator "solo" do fatorial solo x lodo (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- fator "adubação com lodo" do fatorial solo x lodo (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); e F1xF2- interação entre F1 e F2 no fatorial solo x lodo; CV- coeficiente de variação. Nutrientes analisados: P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), S (enxofre), Na (sódio), Mn (manganês) e Zn (zinco). Teste F: ** - significativo ao nível de 1% de probabilidade; * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; e *ns* - não significativo.

Tabela 8. Médias dos teores de nutrientes na folha do sorgo sacarino nos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3 do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Tratamento	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	
	g.kg ⁻¹					mg.kg ⁻¹					
Contraste C1											
Adubação mineral	4,6a	17,5 ^a	6,0a	4,5a	1,8a	494,8a	162,8a	0,6a	38,7a	86,3b	
Fatorial solo x lodo	4,7a	17,4 ^a	6,0a	4,4a	2,0a	485,2a	112,4b	0,6a	38,0a	92,7a	
Contraste C2											
AM-Arg	3,8b	16,0a	6,3a	4,2b	1,8a	449,7b	192,7a	0,5b	34,0b	94,9a	
AM-Camb	5,3a	19,0a	5,7b	4,7a	1,9a	539,9a	132,9b	0,8a	43,3a	77,8b	
Contraste C3 (ou fator F1)											
Lodo-Arg	4,2	16,1	6,4	4,3b	1,9	459,2	123,5	0,5	35,5	91,0	
Lodo-Camb	5,2	18,7	5,5	4,5a	2,0	511,2	101,4	0,7	40,5	94,3	

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; F1- fator "solo" (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- seis doses de lodo.fator "adubação com lodo" (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); F1xF2- interação entre F1 e F2; AM x demais- contraste ortogonal entre o "fatorial" solo x lodo e os dois tratamentos adicionais com adubação mineral (AM); e AM-Arg x AM-Camb- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb). Nutrientes analisados: P (fósforo), K (potássio), Ca (Cálcio), Mg (magnésio), S (enxofre), Fe (ferro), Mn (manganês), Cu (cobre), Zn (zinco) B (boro). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5%; médias não seguidas de letras no contraste C3 foram comparadas posteriormente considerando-se o desdobramento da interação significativa solo x lodo.

Quanto ao contraste C1, que compara os solos sob adubação mineral com estes sob os níveis de lodo de esgoto, verifica-se equivalência entre os tratamentos para a maior parte dos nutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu e Zn), com superioridade da adubação mineral apenas para o Mn e do lodo apenas para o B. Isso revela que a adubação com lodo foi, na média das doses utilizadas, suficiente para suprir a demanda nutricional do sorgo de forma similar à adubação mineral (como reflexo da similaridade entre a fertilidade do solo sob os referidos tratamentos - ou mesmo da superioridade dos tratamentos com lodo - também tratada em tópico anterior).

Para os tratamentos do fatorial solo x lodo de esgoto, a interação entre os fatores só não foi significativa para o Mg, sendo que não ocorreu nenhum efeito das doses de lodo, mas verificou-se a superioridade do Cambissolo em relação ao Argissolo (ainda assim com teores muito próximos, $4,5 \text{ g kg}^{-1}$ para o primeiro e $4,3 \text{ g kg}^{-1}$ para o segundo). Para os demais nutrientes, o desdobramento da interação relativa aos teores foliares foi feito e será apresentado mais adiante, em conjunto com os teores nos compartimentos colmo e pendão, tentando-se elucidar a natureza dessas interações.

Os resultados das análises de variância para os teores de nutrientes nos colmos e pendões no sorgo sacarino adubado com fertilizante mineral e níveis crescentes de lodo estão apresentados nas Tabelas 11 e 13, enquanto nas Tabelas 12 e 14 são comparadas as médias dos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3.

No contraste C2, diferentemente do observado para os teores foliares, verifica-se nos colmos equivalência entre os solos para o P, Mg, Cu e B, superioridade do Argissolo para Ca e Mn, como observado nas folhas, e superioridade do Cambissolo para K, S, Fe e Zn. Segundo May et al. (2013) a maior parte de nutrientes está contida no colmo, sendo o K um dos nutrientes demandados em maiores quantidades, onde sua extração pode ultrapassar $3,22 \text{ kg}$ por tonelada de colmos. No presente trabalho o Cambissolo demonstrou ser um solo com boa capacidade de suprir as principais exigências nutricionais do sorgo. Em relação aos pendões no C2 não foi verificada diferença entre os solos sob adubação mineral para o Ca, S, Mn e Cu, sendo verificada para os demais nutrientes (P, K, Mg, Fe, Zn e B) superioridade do Cambissolo.

Tabela 11. Valores de quadrado médio para cada contraste ou fonte de variação (FV) considerada na análise de variância dos teores de nutrientes no colmo do sorgo sacarino no experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

FV	GL	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
C1	1	0,013 <i>ns</i>	0,059 <i>ns</i>	0,00001 <i>ns</i>	0,00001 <i>ns</i>	0,463**	484,206*	15739,843**	0,092 <i>ns</i>	21,637 <i>ns</i>	0,289 <i>ns</i>
C2	1	0,005 <i>ns</i>	13,316**	0,907**	0,078 <i>ns</i>	0,126**	4346,408**	2308,354**	0,120 <i>ns</i>	155,155**	0,739 <i>ns</i>
F1 (ou C3)	5	0,806**	123,935**	1,130**	0,286**	0,251**	4595,659**	12510,155**	3,009**	385,323**	26,647*
F2	1	1,122 <i>ns</i>	21,399 <i>ns</i>	1,203 <i>ns</i>	0,295 <i>ns</i>	0,791 <i>ns</i>	471,018 <i>ns</i>	16362,947 <i>ns</i>	0,332 <i>ns</i>	177,885 <i>ns</i>	13,035 <i>ns</i>
F1 x F2	5	0,134**	8,845**	0,062**	0,365*	0,099**	1230,657**	5542,080**	0,266**	98,615**	12,321*
CV(%)	-	5,85	6,24	5,00	8,82	6,42	5,86	10,32	11,49	8,46	6,02

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; C1- contraste ortogonal entre “adubação mineral” (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); F1 (ou contraste C3)- fator “solo” do fatorial solo x lodo (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- fator “adubação com lodo” do fatorial solo x lodo (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); e F1xF2- interação entre F1 e F2 no fatorial solo x lodo; CV- coeficiente de variação. Nutrientes analisados: P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), S (enxofre), Na (sódio), Mn (manganês) e Zn (zinco). Teste F: ** - significativo ao nível de 1% de probabilidade; * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; e *ns* - não significativo.

Tabela 12. Médias dos teores de nutrientes no colmo do sorgo sacarino nos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3 do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Tratamento	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	g.kg ⁻¹					mg.kg ⁻¹				
Contraste C1										
Adubação mineral	2,4a	14,3 ^a	1,8a	1,7a	1,5b	168,0a	107,4a	2,2a	42,9a	36,6a
Fatorial solo x lodo	2,4a	14,3 ^a	1,8a	1,7a	1,8a	160,4b	64,6b	2,3a	41,3a	36,4a
Contraste C2										
AM-Arg	2,4a	13,2b	2,1a	1,8a	1,4b	147,1b	122,6a	2,1a	39,0b	36,9a
AM-Camb	2,4a	15,5 ^a	1,5b	1,6a	1,7a	188,8a	92,2b	2,3a	46,8a	36,3a
Contraste C3 (ou fator F1)										
Lodo-Arg	2,2	13,0	1,90	1,6	1,8	151,7	79,0	2,1	38,8	37,1
Lodo-Camb	2,5	15,7	1,6	1,7	1,7	169,2	50,0	2,5	43,8	35,8

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; F1- fator “solo” (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- seis doses de lodo.fator “adubação com lodo” (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); F1xF2- interação entre F1 e F2; AM x demais- contraste ortogonal entre o “fatorial” solo x lodo e os dois tratamentos adicionais com adubação mineral (AM); e AM-Arg x AM-Camb- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb). Nutrientes analisados: P (fósforo), K (potássio), Ca (Cálcio), Mg (magnésio), S (enxofre), Fe (ferro), Mn (manganês), Cu (cobre), Zn (zinco) B (boro). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5%; médias não seguidas de letras no contraste C3 foram comparadas posteriormente considerando-se o desdobramento da interação significativa solo x lodo.

Tabela 13. Valores de quadrado médio para cada contraste ou fonte de variação (FV) considerada na análise de variância dos teores de nutrientes no pendão do sorgo sacarino no experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

FV	GL	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
C1	1	1,283*	2,088**	0,0008 ^{ns}	0,00004 ^{ns}	0,00001 ^{ns}	31,681 ^{ns}	3763,408**	0,213 ^{ns}	124,065 ^{ns}	465,178**
C2	1	0,807*	5,842**	0,004 ^{ns}	3,091**	0,014 ^{ns}	2,004*	2865,419 ^{ns}	0,146 ^{ns}	1260,074*	216,039**
F1 (ou C3)	5	9,515**	0,625 ^{ns}	0,117**	6,005**	0,905**	27626,038 ^{ns}	1671,710**	0,085 ^{ns}	1435,652 ^{ns}	366,189**
F2	1	5,961 ^{ns}	1,201 ^{ns}	0,024 ^{ns}	1,076 ^{ns}	0,242 ^{ns}	6222,435 ^{ns}	1754,573 ^{ns}	0,096 ^{ns}	1466,393 ^{ns}	61,874 ^{ns}
F1 x F2	5	4,593**	1,522**	0,057**	1,874**	0,056**	13906,903 ^{ns}	558,521**	0,064 ^{ns}	518,249 ^{ns}	54,731**
CV(%)	-	5,70	6,67	12,13	6,84	6,26	41,86	9,21	9,72	15,86	15,67

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; C1- contraste ortogonal entre "adubação mineral" (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); F1 (ou contraste C3)- fator "solo" do fatorial solo x lodo (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- fator "adubação com lodo" do fatorial solo x lodo (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); e F1xF2- interação entre F1 e F2 no fatorial solo x lodo; CV- coeficiente de variação. Nutrientes analisados: P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), S (enxofre), Na (sódio), Mn (manganês) e Zn (zinco). Teste F: ** - significativo ao nível de 1% de probabilidade; * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; e ns - não significativo.

Tabela 14. Médias dos teores de nutrientes no pendão do sorgo sacarino nos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3 do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Tratamento	g.kg ⁻¹			mg.kg ⁻¹						
	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Contraste C1										
Adubação mineral	8,1a	6,6 ^a	0,8a	4,3a	1,3a	205,9a	100,9a	2,6a	101,0a	27,6a
Fatorial solo x lodo	7,7b	6,1b	0,8a	4,3a	1,3a	207,8a	79,9b	2,5a	97,2a	20,2b
Contraste C2										
AM-Arg	7,8b	5,8b	0,8a	3,8b	1,3a	205,4b	83,9a	2,5a	112,2b	22,9b
AM-Camb	8,4a	7,3 ^a	0,8a	4,9a	1,4a	206,3a	117,8a	2,7a	89,8a	32,2a
Contraste C3 (ou fator F1)										
Lodo-Arg	7,3	6,0	0,8	4,0	1,2	186,4a	74,7	2,4a	92,3a	17,7
Lodo-Camb	8,1	6,2	0,8	4,6	1,5	229,3a	85,2	2,5a	102,1a	22,7

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; F1- fator "solo" (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- seis doses de lodo.fator "adubação com lodo" (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); F1xF2- interação entre F1 e F2; AM x demais- contraste ortogonal entre o "fatorial" solo x lodo e os dois tratamentos adicionais com adubação mineral (AM); e AM-Arg x AM-Camb- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb). Nutrientes analisados: P (fósforo), K (potássio), Ca (Cálcio), Mg (magnésio), S (enxofre), Fe (ferro), Mn (manganês), Cu (cobre), Zn (zinco) B (boro). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5%; médias não seguidas de letras no contraste C3 foram comparadas posteriormente considerando-se o desdobramento da interação significativa solo x lodo.

Quanto ao contraste C1 para os teores nos colmos, que compara os solos sob adubação mineral com estes sob os níveis de lodo de esgoto, verifica-se, com exceção do S, o mesmo resultado encontrado para os teores foliares, observando-se equivalência entre os tratamentos para a maior parte dos nutrientes (P, K, Ca, Mg, Cu, Zn e B). Observou-se superioridade da adubação mineral apenas para o Mn e Fe e do lodo apenas para o S. Para os teores no pendão, tal contraste (C1) revelou que a adubação mineral foi mais eficiente que a adubação com lodo, sendo superior para o P, K, Mn e B. Para os demais nutrientes (Ca, Mg, S, Fe, Cu e Zn) os tratamentos foram considerados de igual efeito.

Para os teores de P, o desdobramento da interação (Figura 18) revelou que ocorreu incremento nos teores de P nos colmos do sorgo (Figura 18-B) mais expressivos no Cambissolo (58%) em relação ao Argissolo (29%). Para os teores de P nas folhas (Figura 18-A) observa-se no Argissolo aumento até a dose de $18,5 \text{ g kg}^{-1}$ de lodo, sendo que na maior dose utilizada ($37,1 \text{ g kg}^{-1}$) verifica-se declínio no teor deste nutriente. Para o Cambissolo observou-se que os teores de P na folha só começaram a aumentar a partir da dose de $9,3 \text{ g kg}^{-1}$ tendo seu ápice na maior dose ($37,1 \text{ g kg}^{-1}$). Para o pendão (Figura 18-C), onde se verificam as maiores concentrações de P, foram observados incrementos de 28% e 15% para o Argissolo e Cambissolo, respectivamente, entre a testemunha e a maior dose de lodo.

Oliveira et al. (1995) utilizando lodo de esgoto na adubação de sorgo granífero em um Latossolo Vermelho Escuro, observaram que as doses aplicadas proporcionaram aumento linear nos níveis de P absorvidos pelas plantas, sendo sua maior dose utilizada de 20 t ha^{-1} . Segundo Costa et al. (2012), a absorção de P pela planta depende do pH, assim como todos os outros nutrientes também dependem, mas a este em especial, pois é grande a influência exercida. O pH vai determinar a sua solubilidade e capacidade de adsorção pelas plantas quando e utilizado em composição com outros nutrientes, como nos compostos sulfatados. Sendo assim, a higienização do lodo a partir da caleação apresenta a maior disponibilidade de P no sistema como mais uma vantagem da técnica.

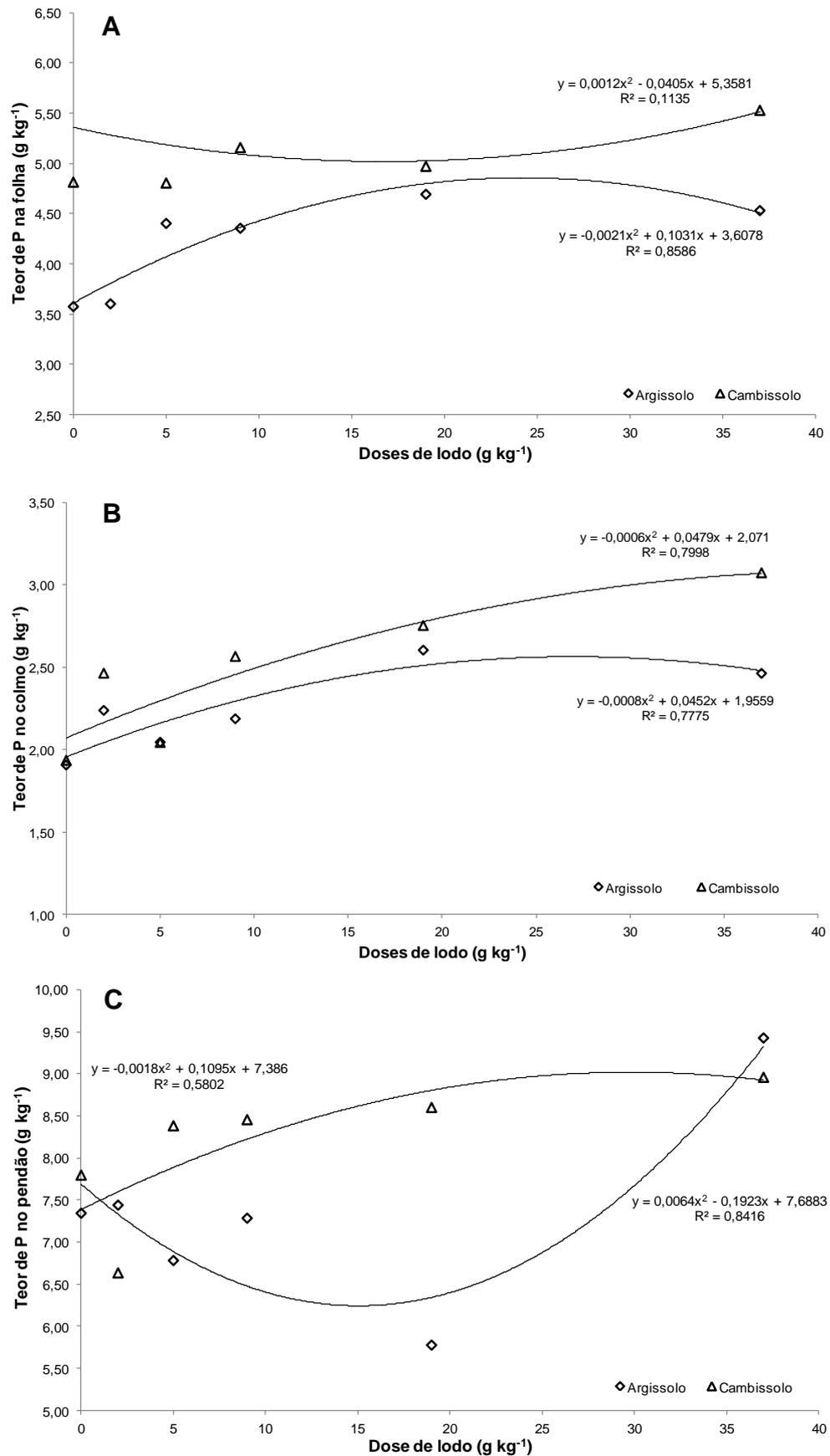
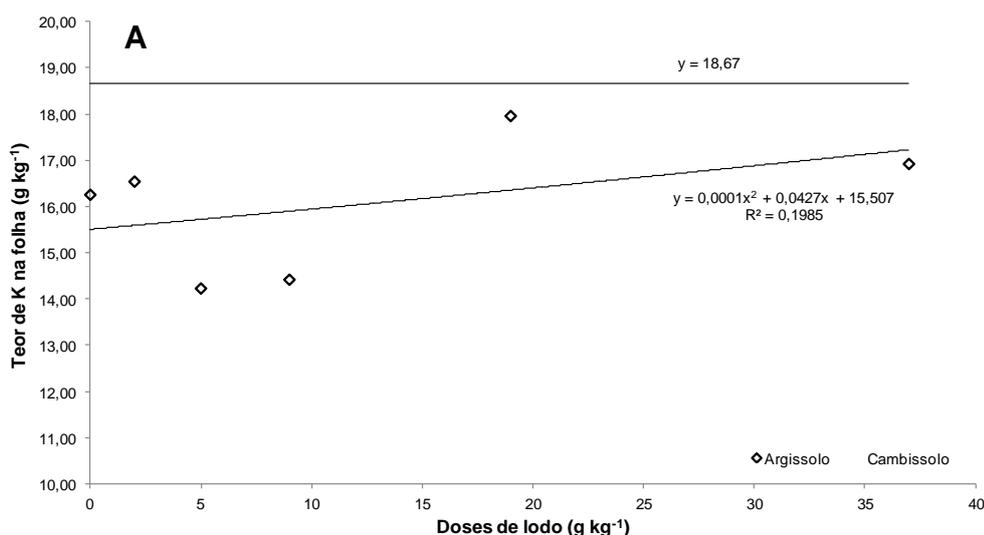


Figura 18: Teores de P nas folhas (A), colmos (B) e pendões (C) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para os teores de K o desdobramento da interação (Figura 19) mostrou que ocorreu sua redução nos colmos do sorgo (Figura 19-B) no Argissolo (22%), sendo também observada a mesma tendência para o Cambissolo. Em relação ao teor de K nas folhas (Figura 19-A), não foi observado efeito simples de dose (F2), assim como para o colmo e pendão, refletindo na inexpressiva diferença entre os mesmos nas doses aplicadas em ambos os solos, sendo que os valores variaram entre 14,23 g kg⁻¹ (dose de 4,6 g kg⁻¹) e 16,92 g kg⁻¹ (dose de 37,1 g kg⁻¹) para o Argissolo e 12,45 g kg⁻¹ (dose de 4,6 g kg⁻¹) e 23,59 g kg⁻¹ (dose de 2,3 g kg⁻¹) para o Cambissolo (que apresentou modelo não significativo, $y=18,67$). Para os teores no pendão (Figura 19-C) observa-se no Argissolo e Cambissolo uma redução de 9% e 7%, respectivamente, do controle em relação a maior dose de lodo. Assim, como observado no tópico de efeito das doses de lodo nos atributos químicos do solo, onde ocorreu decréscimo nos teores de K com aumento das doses de lodo aplicadas nos dois solos, foi observado que a absorção pelo sorgo também foi reduzida. Segundo May et al. (2013), o K é um dos nutrientes demandados em maiores quantidades e acumulado principalmente nos colmos, se relacionando diretamente com maiores produtividades. Assim como discutido anteriormente, a caleação ocasionou desbalanço entre a relação Ca:K, fazendo com que a disponibilidade do K fosse reduzida.



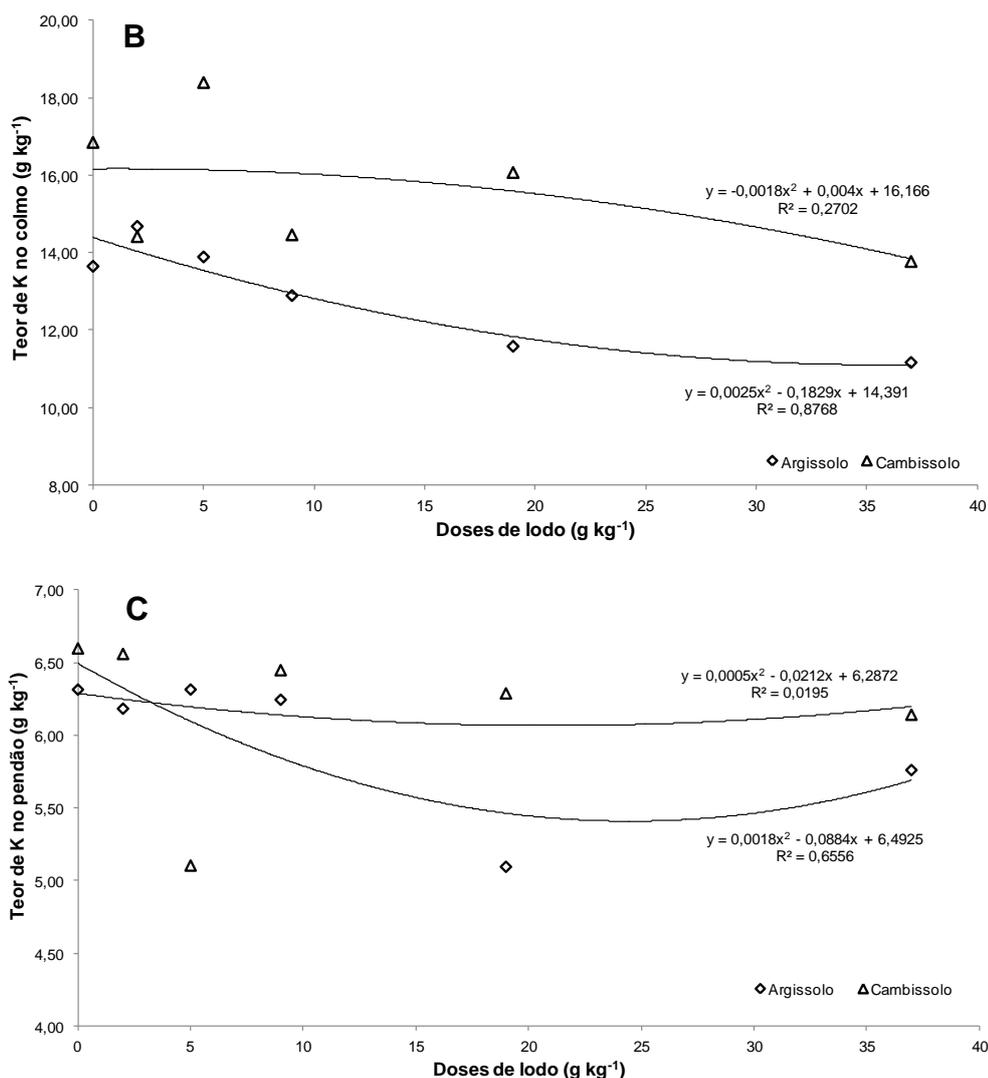
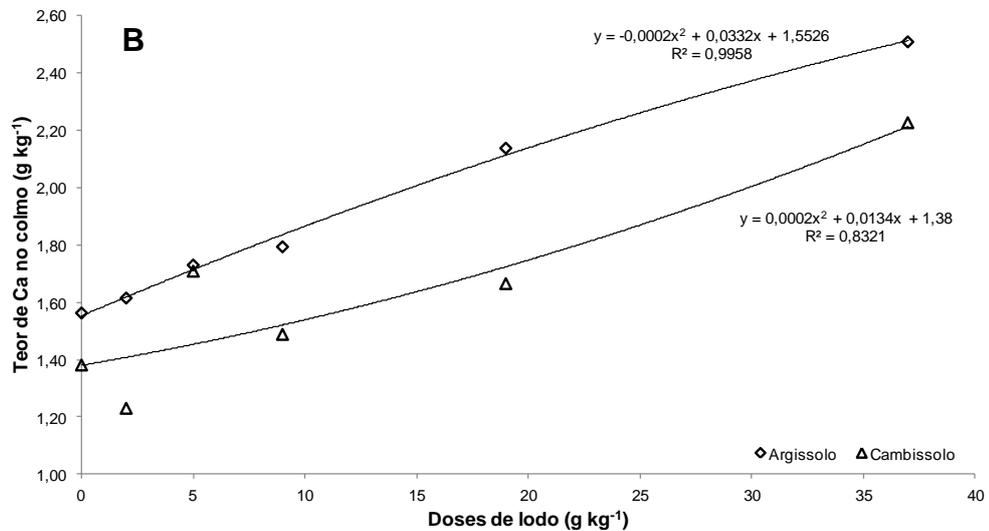
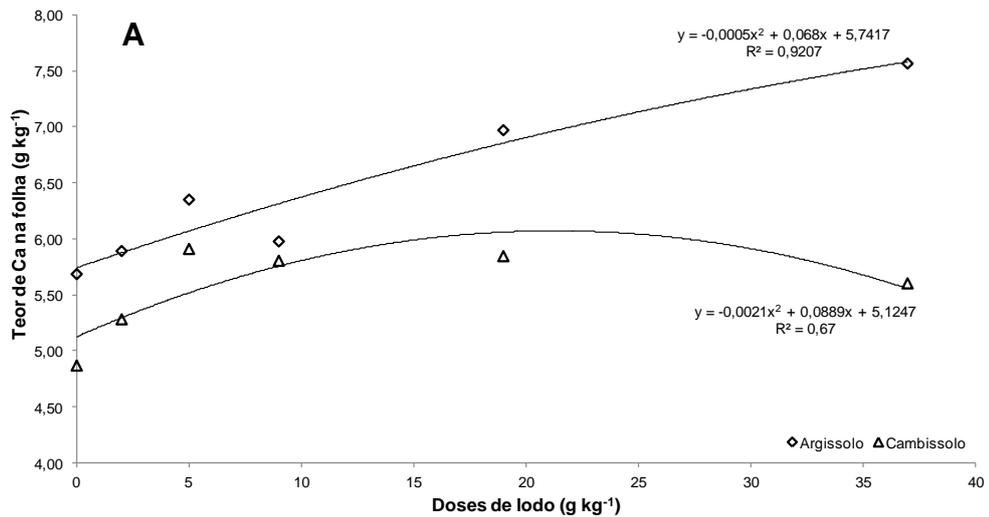


Figura 19: Teores de K nas folhas (A), colmos (B) e pendões (C) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para o Ca o desdobramento da interação (Figura 20) mostrou que no Argissolo os teores foliares tiveram, entre a testemunha e a maior dose de lodo, um incremento linear de 33%, enquanto que para as plantas cultivadas no Cambissolo verificou-se aumento do teor foliar até a dose de 4,6 g kg⁻¹ e depois redução até a maior dose (Figura 20-A). Em relação ao teores de Ca no colmo verificou-se semelhante incremento para ambos os solos, sendo de 60% para o Argissolo e de 61% para o Cambissolo (Figura 20-B). Para os teores no pendão (Figura 20-C) observam-se respostas inversas entre os solos, sendo que para o Argissolo a maior dose de lodo se relaciona ao maior teor de Ca (0,91 g kg⁻¹) e para o Cambissolo a mesma dose proporcionou redução do teor em relação à

dose imediatamente anterior ($0,81 \text{ g kg}^{-1}$ contra $0,95 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente), sendo apenas maior que o teor do controle ($0,74 \text{ g kg}^{-1}$). Segundo Malavolta e Rosolem (1981), em termos de exportação de nutrientes pela cultura do sorgo, o Ca vem atrás apenas do K e N, sendo muito importante para produção de matéria seca da cultura.



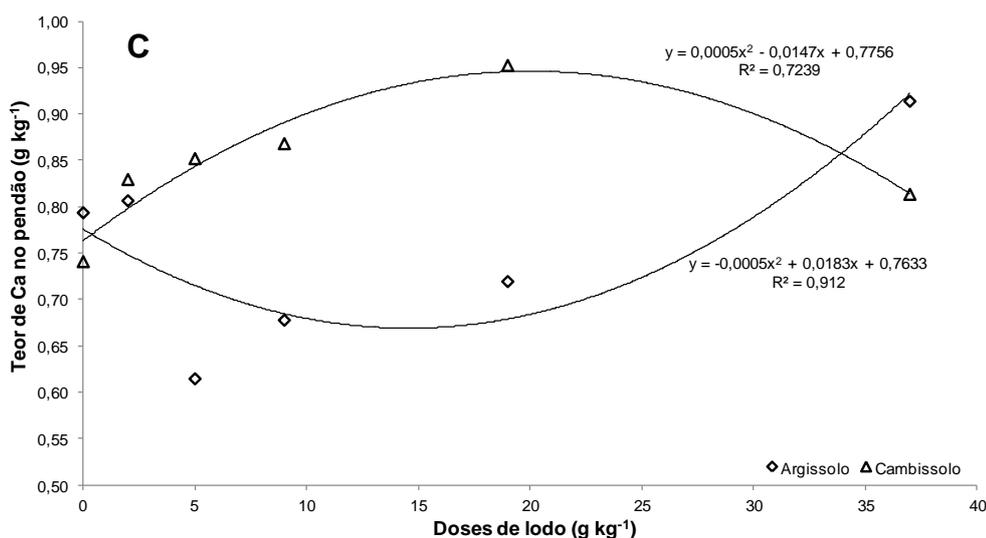


Figura 20: Teores de Ca nas folhas (A), colmos (B) e pendões (C) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para o Mg (em que não se verificou efeito da interação para os teores foliares, conforme anteriormente mencionado), o desdobramento da interação para colmo e pendão (Figura 21) mostrou que para os teores no colmo o Argissolo levou a um valor máximo ($2,17 \text{ g kg}^{-1}$) na dose de $9,3 \text{ g kg}^{-1}$ em relação ao menor valor ($1,27 \text{ g kg}^{-1}$) encontrado no controle, enquanto no Cambissolo o menor valor ($1,60 \text{ g kg}^{-1}$) foi observado na dose de $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ e o maior valor ($1,97 \text{ g kg}^{-1}$) na dose de $9,3 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 21-A). Em relação ao teores de Mg nos pendões, verificou-se no Argissolo o menor valor ($3,17$) na dose de $18,5 \text{ g kg}^{-1}$ e o maior valor ($5,12 \text{ g kg}^{-1}$) na maior dose de lodo ($37,1 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto para o Cambissolo o menor valor ($4,16 \text{ g kg}^{-1}$) foi encontrado no controle e o maior valor ($5,04 \text{ g kg}^{-1}$) na dose de $2,3 \text{ g kg}^{-1}$, contudo, para este solo o modelo ($y=4,64$) se mostrou não significativo (Figura 21-B). Os resultados estão de acordo com o observado nos teores do solo, onde a incorporação de cálcio ao solo promoveu redução nos teores de Mg. Segundo May et al. (2013) deve-se dar preferência a corretivos com menor relação Ca:Mg, pois o sorgo possui grande exportação de Mg. O uso de corretivos com maior relação entre esses nutrientes pode levar à deficiência de Mg ao longo de cultivos. Segundo Coelho (2009), estando a acidez do solo adequadamente corrigida, os teores de Ca e Mg no solo devem ser suficientes para cultura do sorgo obter altas produtividades.

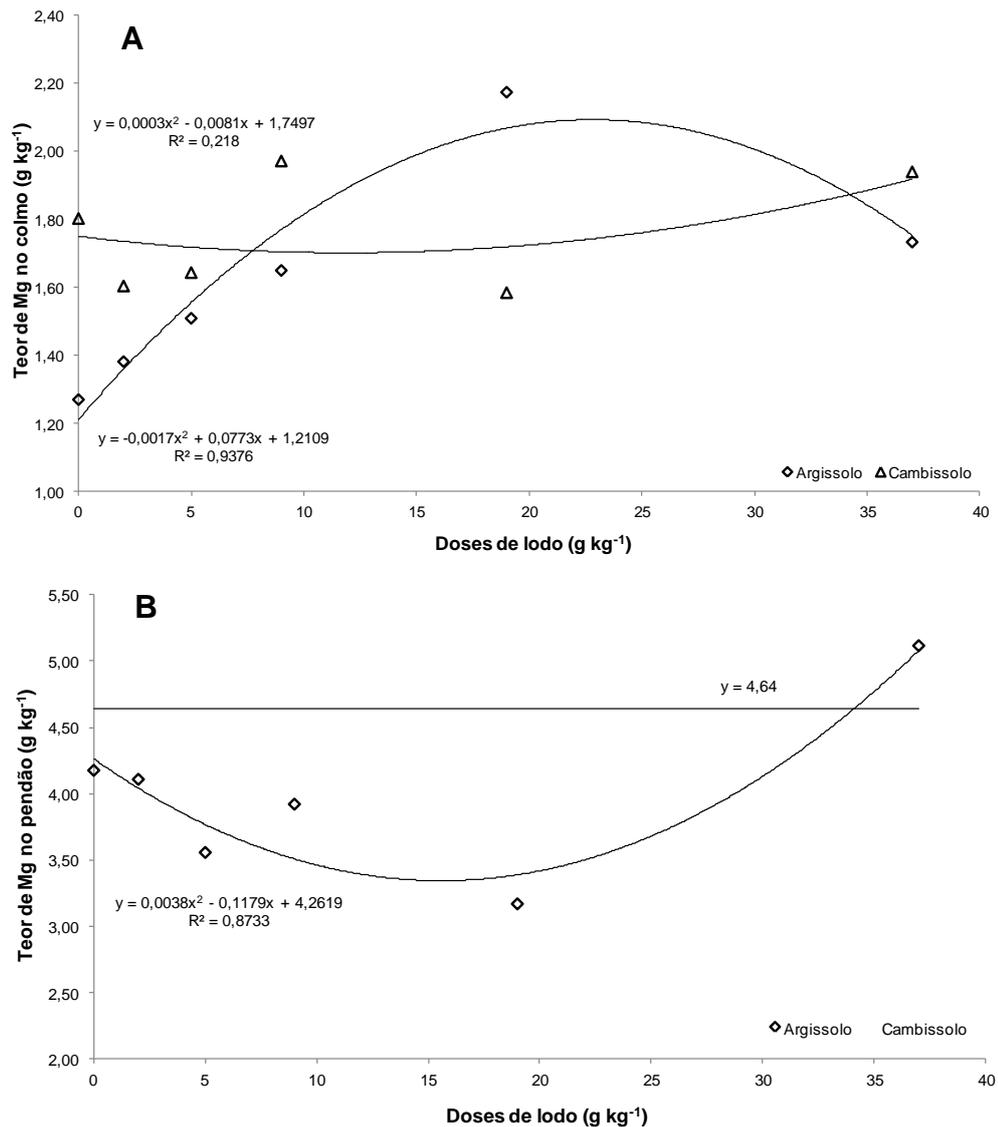
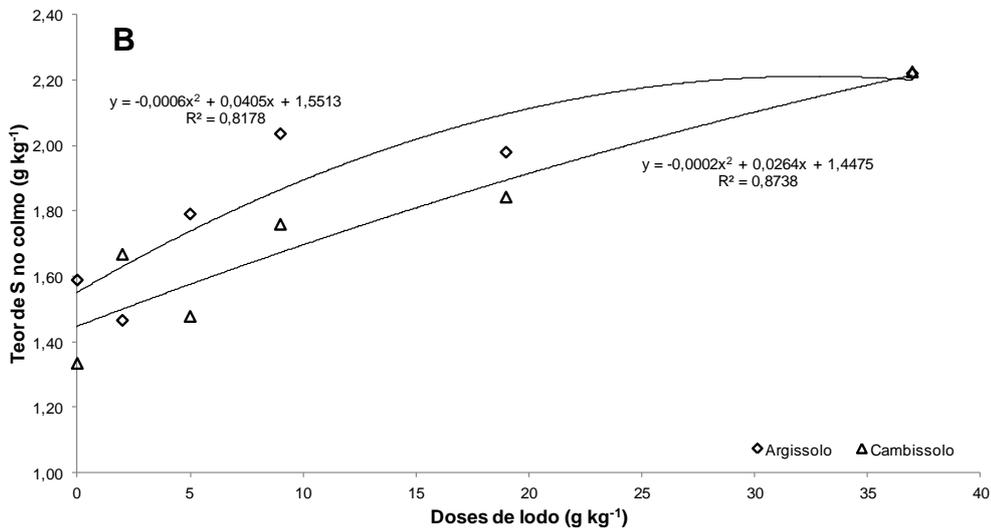
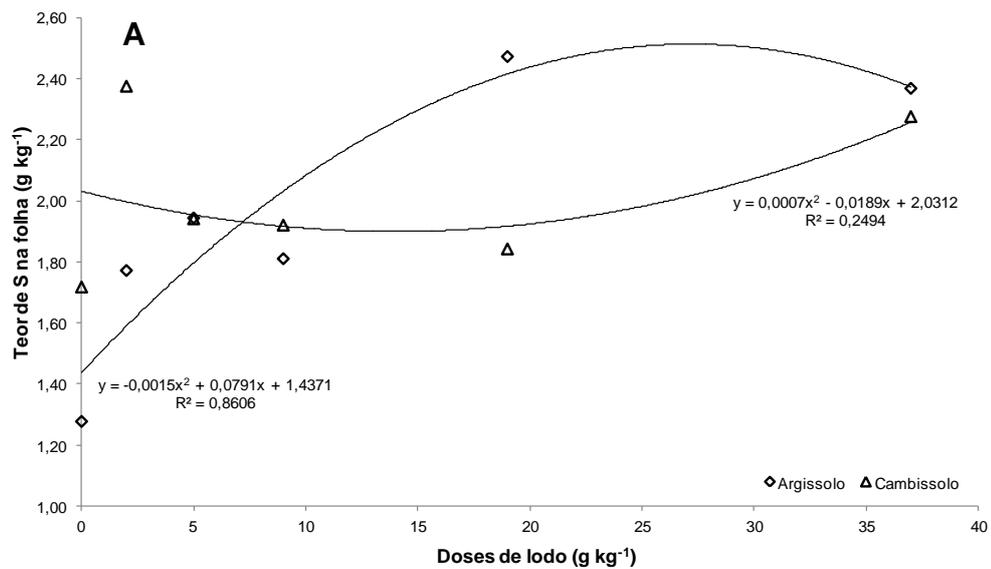


Figura 21: Teores de Mg nos colmos (A) e pendões (B) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Assim como para os teores no solo, a caleação realizada no lodo afeta as relações entre os cátions Ca, K e Mg, causando um desbalanço entre os mesmos e que refletiu além dos teores no solo na absorção dos mesmos pelo sorgo. Segundo Rosolem et al. (1984), em situações onde a relação entre Ca:K:Mg não é obedecida, existem condições para a ocorrência de deficiência induzida de um dos nutrientes.

Para os teores de S o desdobramento da interação (Figura 22) mostrou que ocorreu incremento nos teores foliares com o aumento da dose de lodo para ambos os solos, sendo para o Argissolo de 52% e para o Cambissolo de 32% (Figura 22-A). Nos colmos as doses de lodo também proporcionaram aumentos

em ambos os solos, sendo de 71% e 60% para Argissolo e Cambissolo, respectivamente (Figura 22-B). Em relação aos teores de S nos pendões verificou-se no Cambissolo incremento de 44% da maior dose em relação ao controle, já para o Argissolo o incremento foi de 33%, mas o menor valor encontrado foi na dose de 18,5 g kg⁻¹ (Figura 22-C). Segundo Rosolem e Malavolta (1981), a absorção de S pelo sorgo sacarino está relacionada diretamente com a maior produção de matéria seca.



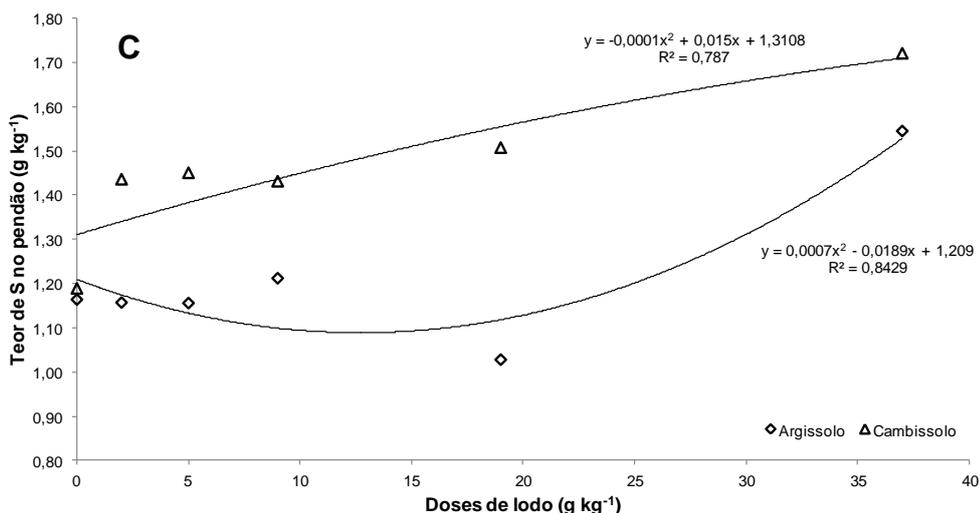


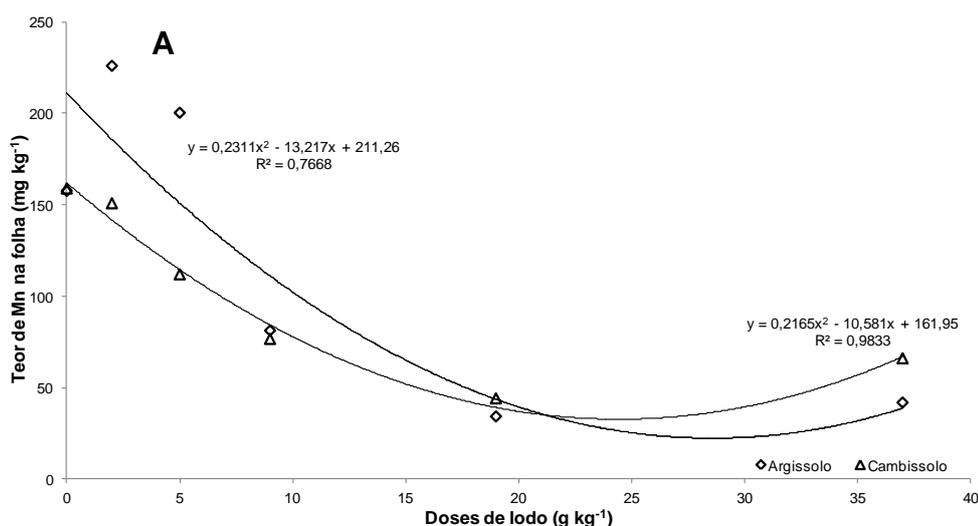
Figura 22: Teores de S nas folhas (A), colmos (B) e pendões (C) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Em relação ao Cu, Fe e Zn nos pendões, os tratamentos do fatorial solo x lodo não levaram à ocorrência de efeitos dos fatores testados, sejam simples ou em interação, tendo sido verificadas médias gerais de 2,5 mg kg⁻¹ para o Cu, 207,9 mg kg⁻¹ para o Fe e 97,2 mg kg⁻¹ para o Zn. Esse fato ocorreu a despeito dos teores desses nutrientes nas folhas e colmos terem sido afetados pelos citados tratamentos, conforme será apresentado na sequência. Isso revela que a partição desses micronutrientes entre os diversos compartimentos (folha, colmo, pendão e raiz) é algo complexo e não diretamente associado à disponibilidade dos elementos no solo, mas ao comportamento fisiológico e bioquímico das plantas.

Para os teores de Mn o desdobramento da interação (Figura 23) mostrou uma redução de 377% e 240%, relacionando controle e maior dose, nos teores foliares de Mn no Argissolo e Cambissolo, respectivamente (Figura 23-A). Para os teores no colmo os resultados seguiram a mesma tendência, onde a maior redução foi observada no Argissolo (839%), em que o controle apresentava um valor de 134,42 mg kg⁻¹ e na maior dose foi encontrado o valor de 16,02 mg kg⁻¹ (Figura 23-B). Para o Cambissolo observou-se uma redução nos teores de 98% entre a maior dose (38,65 mg kg⁻¹) e o controle (74,77 mg kg⁻¹). Nos pendões, para o Argissolo os teores diminuíram entre a testemunha e a dose de lodo de 18,5 g kg⁻¹ (de 100,46 até 56,03 mg kg⁻¹) e voltaram a subir (72,69 mg kg⁻¹) na

maior dose, 37,1 g kg⁻¹). Já para o Cambissolo o menor teor (69,15 mg kg⁻¹) foi encontrado na dose de lodo de 4,6 g kg⁻¹ e o maior (107,64 mg kg⁻¹) na dose de 2,3 g kg⁻¹ (Figura 23-C). Como a disponibilidade de Mn às plantas é altamente dependente e decresce linearmente com o aumento do pH no solo, os menores teores foliares e nos colmos observadas para as maiores doses são consequência direta da elevação do pH decorrente da adubação com o lodo caleado. As reduções observadas nos teores de micronutrientes de acordo com aumentos das doses está relacionada ao aumento do pH ocasionado pela caleação do lodo, que possui influência na disponibilidade e absorção principalmente de micronutrientes.

Souza et al. (2010), ao estudar as variações na absorção de B, Cu, Fe, Mn e Zn ao longo do ciclo inicial de crescimento de plantas de soja, como consequência de mudanças ocorridas no pH da rizosfera, observaram que a absorção de Mn pela soja foi significativamente modificada pelo pH inicial dos solos. As plantas cultivadas no solo arenoso mostraram tendência de aumento na absorção de Mn, com maiores acúmulos na parte aérea e no sistema radicular, coincidindo com queda constante do pH. No solo argiloso, nos valores de pH de 6,2 e 6,6, o conteúdo total de Mn na matéria seca da parte aérea estabilizou-se quando a planta iniciou a floração. Os autores concluíram que em condições mais ácidas, pH 5,2 e 5,6, a absorção de Mn foi contínua e crescente.



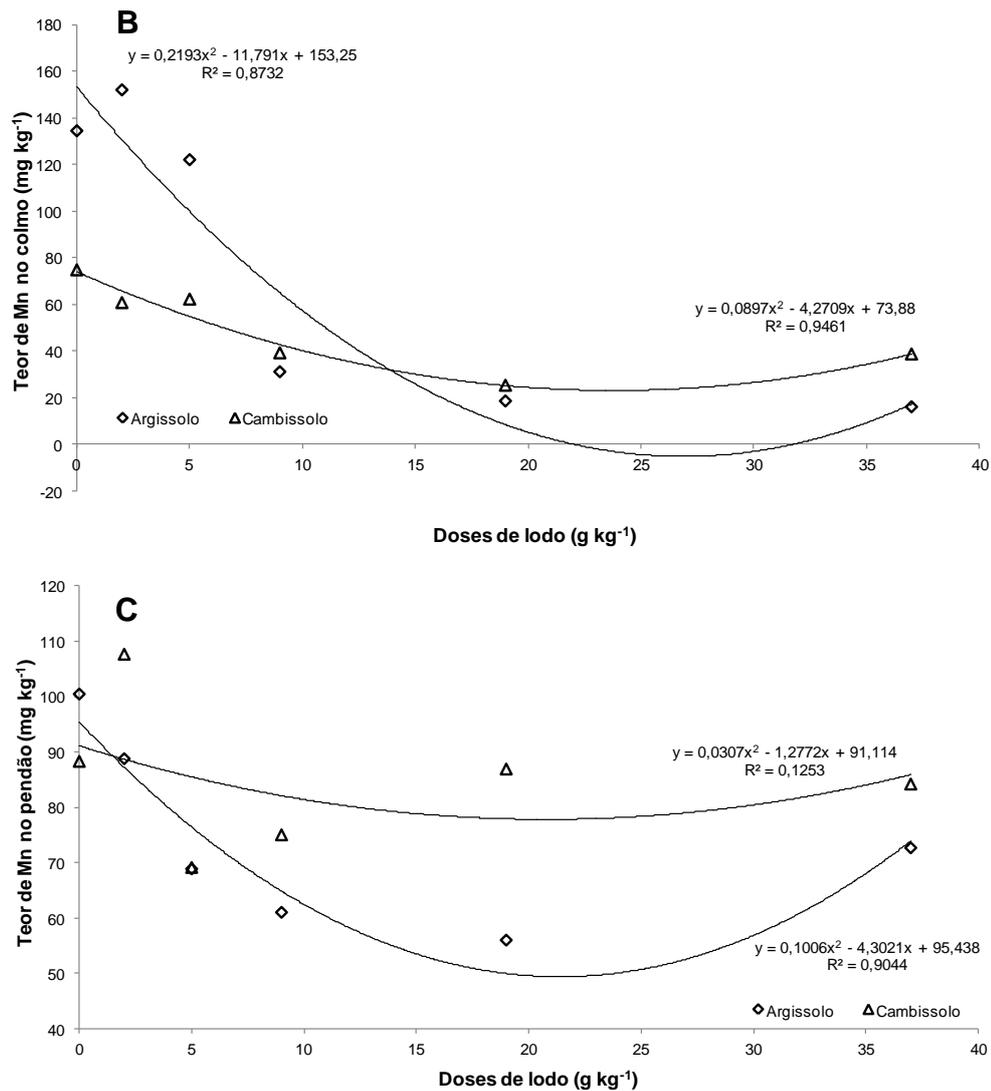


Figura 23: Teores de Mn nas folhas (A), colmos (B) e pendões (C) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para os teores de Fe verificou-se efeito da interação solo x lodo para os teores na folha e colmo, estando o desdobramento apresentado na Figura 24. Nas folhas, enquanto para o Argissolo não houve efeito das doses, sendo o modelo não significativo (média geral de 459,2 mg kg⁻¹), para o Cambissolo ocorreu tendência de redução dos teores foliares, sendo o valor do controle de 526,56 mg kg⁻¹ e na maior dose de 491,41 mg kg⁻¹ (Figura 24-A). Nos colmos foi verificada redução nos teores de Fe em 22% para o Argissolo, enquanto para o Cambissolo o modelo quadrático revela que os maiores teores foram observados nas doses intermediárias 9,3 g kg⁻¹ (177,66 mg kg⁻¹) e 18,5 g kg⁻¹ (177,07 mg kg⁻¹) (Figura 24-B).

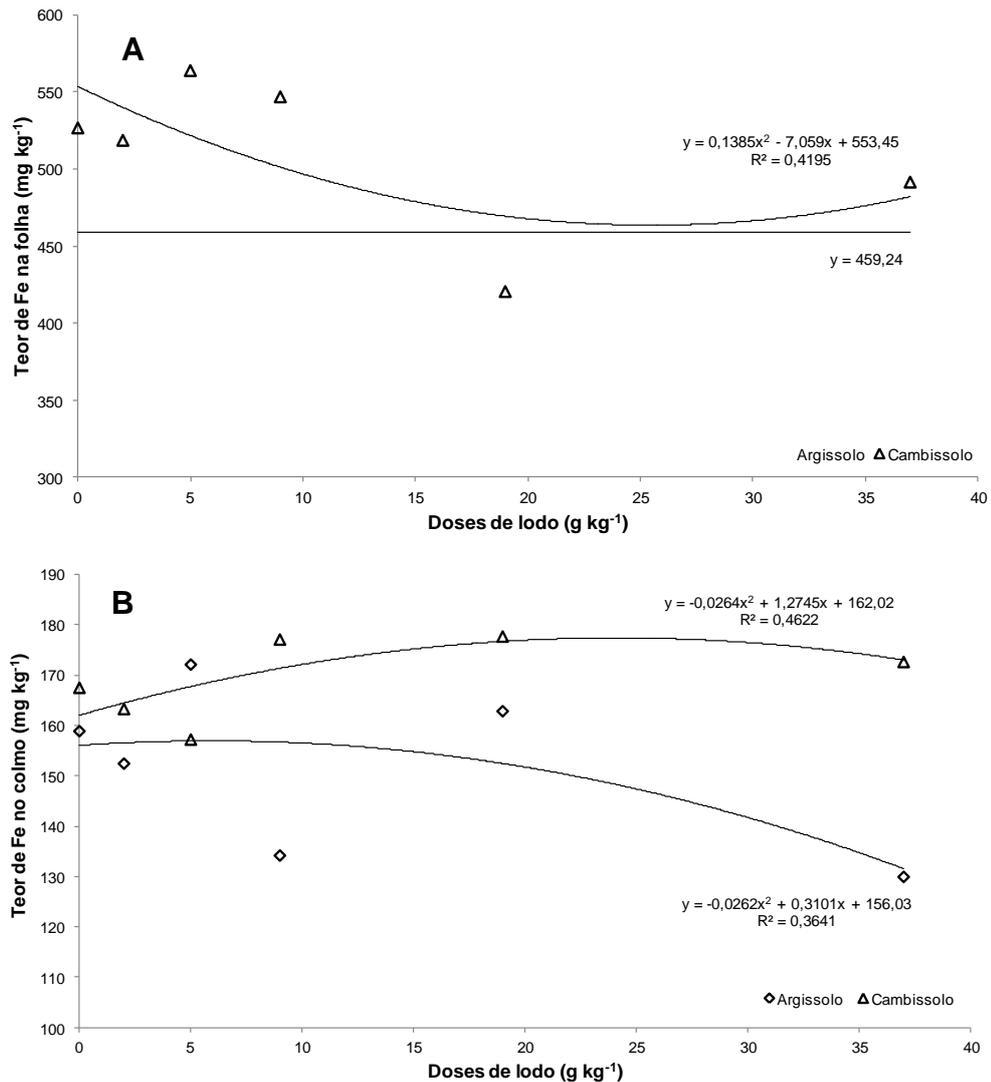


Figura 24: Teores de Fe nas folhas (A) e colmos (B) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para o Cu o desdobramento da interação (Figura 25) mostrou que os teores foliares nas plantas do Cambissolo foram superiores aos do Argissolo, mas não foram afetadas pelas doses de lodo (média geral de 0,70 mg kg⁻¹). Para as plantas cultivadas no Argissolo pôde-se ajustar um modelo quadrático inicialmente crescente, sendo que o menor valor foi encontrado no controle (0,43 mg kg⁻¹) e o maior valor (0,52 mg kg⁻¹) na dose de 18,5 g kg⁻¹ (Figura 25-A). Para os teores de Cu no colmo pôde-se, para ambos os solos, ajustar modelos quadráticos que registram, em sua porção inicial, os mínimos teores (1,97 mg kg⁻¹ no Argissolo e 2,28 mg kg⁻¹ no Cambissolo, respectivamente sob as doses de lodo de 2,3 g kg⁻¹ e 4,6 g kg⁻¹) e na maior dose de lodo os maiores teores (2,22 mg kg⁻¹ no Argissolo e 3,14 mg kg⁻¹ no Cambissolo) (Figura 25 B).

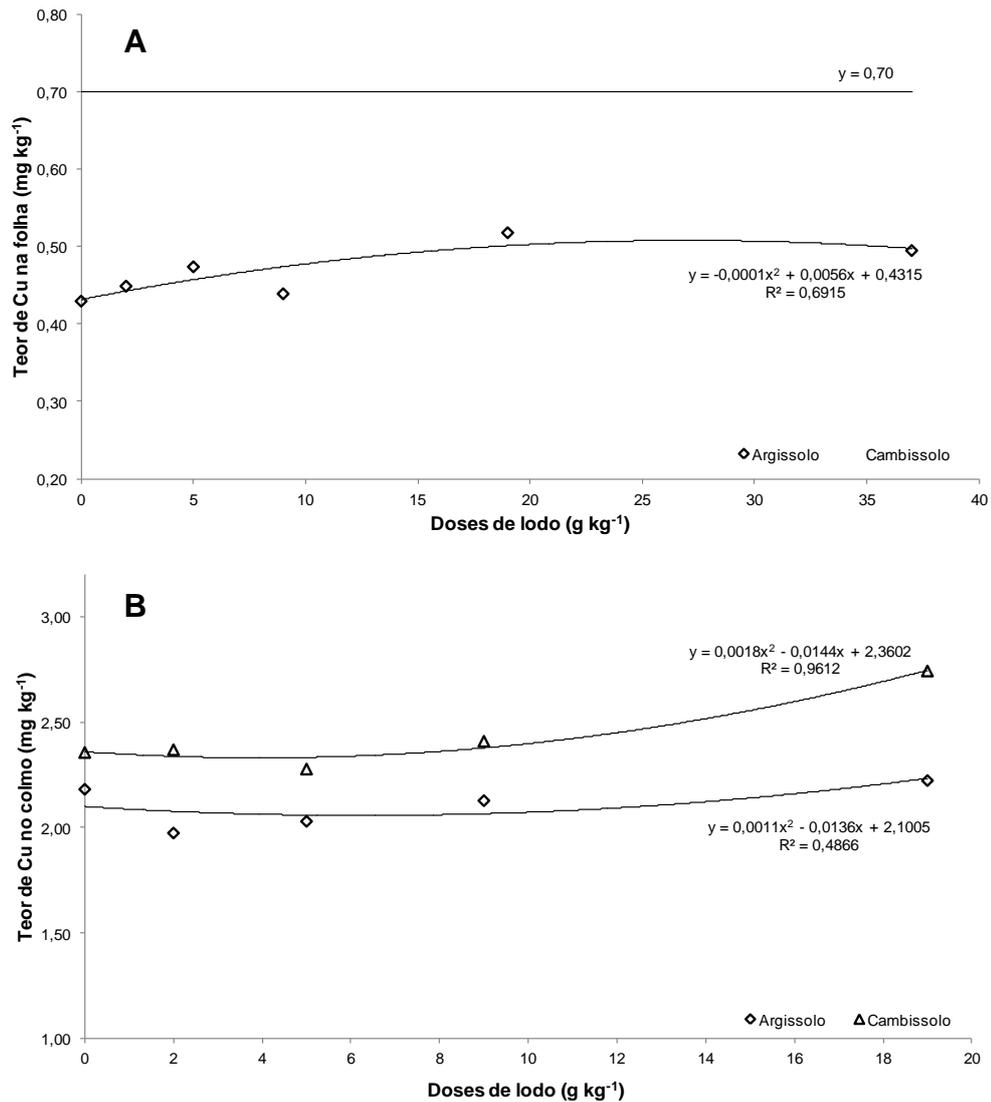


Figura 25: Teores de Cu nas folhas (A) e colmos (B) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para os teores de Zn o desdobramento da interação (Figura 26) mostrou que não ocorreram mudanças expressivas nos teores foliares das plantas cultivadas no Argissolo, ajustando-se um modelo quadrático em que o maior valor (38,76 mg kg⁻¹) corresponde à dose de 18,5 g kg⁻¹, enquanto para o Cambissolo a variação foi maior, com o menor valor observado no controle (34,17 mg kg⁻¹) e o maior valor (45,60 mg kg⁻¹) na dose de 18,5 g kg⁻¹ (Figura 26-A). Para os teores no colmo observou-se um incremento de 63% para o Cambissolo entre a testemunha e a maior dose de lodo, enquanto para o Argissolo pôde-se ajustar um modelo quadrático, porém sem serem observadas mudanças expressivas, com o menor teor encontrado (34,58 mg kg⁻¹) na dose de lodo de 9,3 g kg⁻¹ e o maior teor (41,04 mg kg⁻¹) na maior dose de lodo (Figura 26-B). O Cu, o Zn e o

Fe, da mesma forma que o Mn, são altamente dependentes do pH, de forma que poder-se-ia esperar que ocorresse redução dos teores desses nutrientes na planta, pois aplicação do lodo caledo ao solo eleva do pH e diminui a disponibilidade dos mesmos. No entanto, há que se considerar que o lodo aplicado é também fonte desses micronutrientes, o que precisa ser considerado para a interpretação final dos resultados.

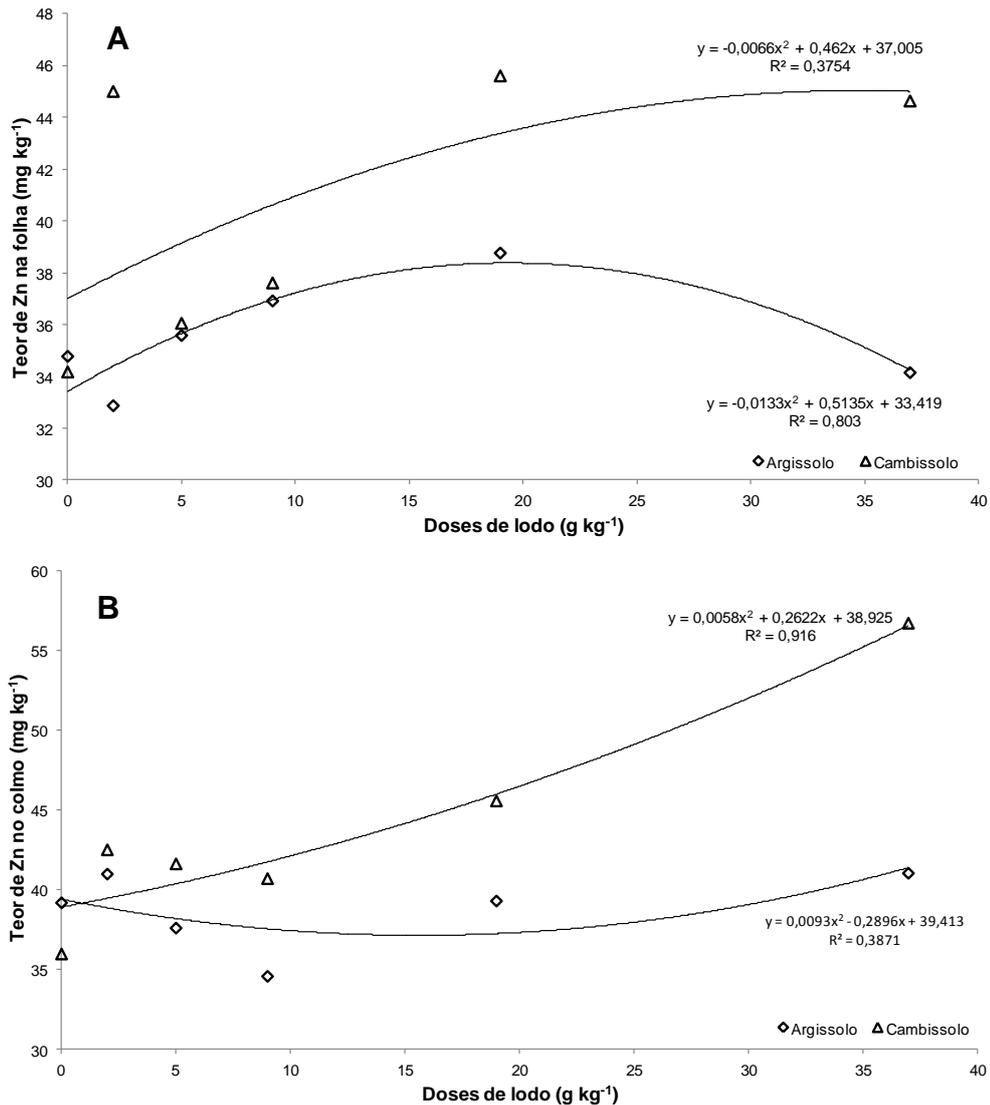
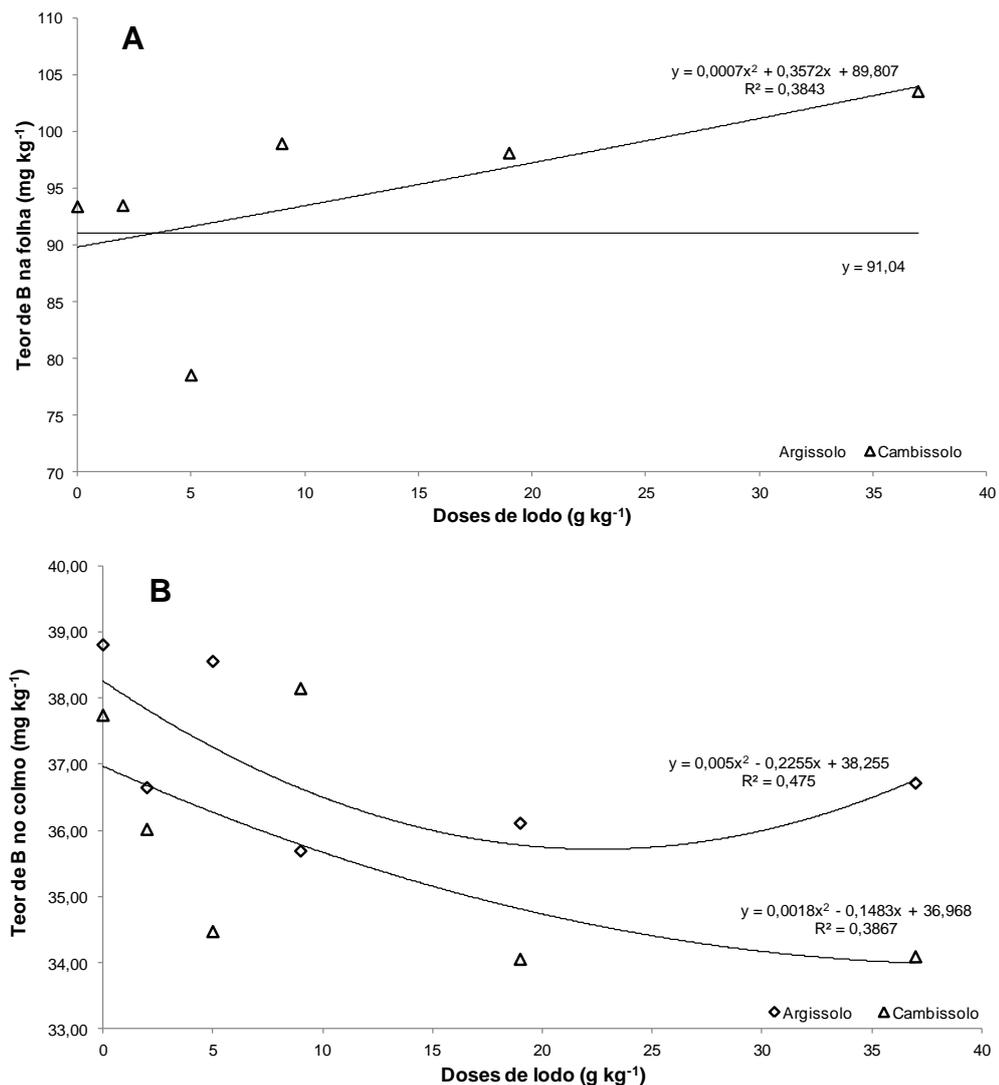


Figura 26: Teores de Cu nas folhas (A) e colmos (B) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

Para os teores de B o desdobramento da interação (Figura 27) mostrou que não ocorreram mudanças expressivas nos teores foliares das plantas cultivadas no Argissolo (média geral de $91,04 \text{ mg kg}^{-1}$). Para o Cambissolo foi

observado incremento linear do teor foliar de boro em função das doses de lodo, sendo de 10% entre o controle e a maior dose (Figura 27-A). Para os teores de B no colmo verificou-se redução nos valores para ambos os solos, sendo de 5 e 11% para o Argissolo e Cambissolo, respectivamente (Figura 27-B). Em relação aos pendões, enquanto para o Argissolo não houve efeito das doses de lodo sobre os teores de B (média de 17,72 mg kg⁻¹), para o Cambissolo verificou-se redução de 15% nos valores (Figura 27-C). Embora a disponibilidade de B no solo em geral esteja ligada à matéria orgânica (similarmente ao N e ao S), o lodo apresenta baixo teor desse nutriente, o que justifica a ausência de efeito das doses nos teores foliares e do pendão das plantas do Argissolo. Além disso, a diferença entre os compartimentos folha, colmo e pendão quanto ao teor de B, verificada no Cambissolo, revela que esse nutriente tem um comportamento complexo na planta.



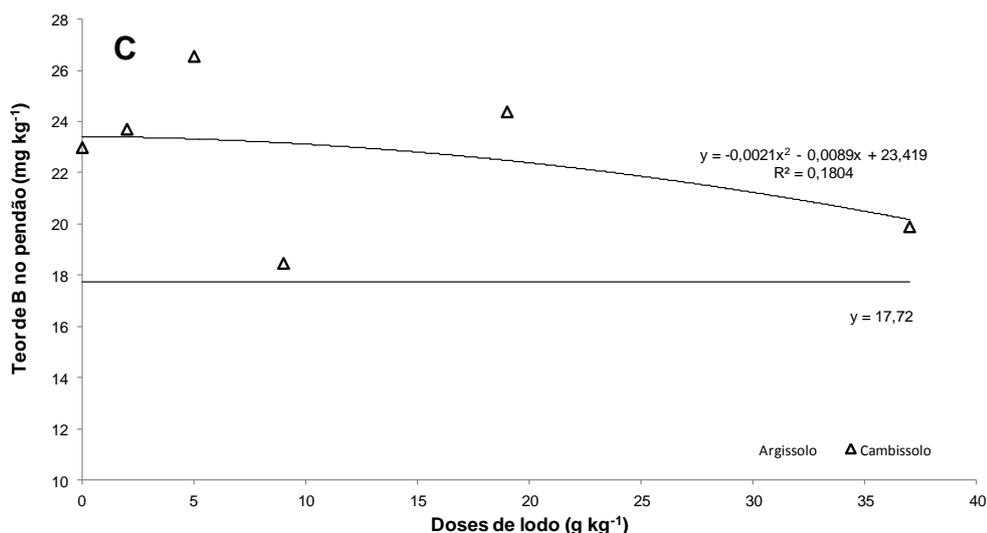


Figura 27: Teores de B nas folhas (A), colmos (B) e pendões (C) do sorgo sacarino cultivado no Argissolo e Cambissolo sob níveis crescentes de lodo de esgoto.

4.2.2.2 - Efeito das doses de lodo na biometria do sorgo sacarino

Na Tabela 15 estão os resultados da análise de variância para as variáveis biométricas do sorgo sacarino adubado com fertilizante mineral e sob níveis crescentes de lodo de esgoto, e na Tabela 16, se encontram as médias de todos os contrastes testados. Na Tabela 16 observa-se que, dentre as variáveis analisadas, as doses de lodo afetaram apenas a matéria seca do pendão e o diâmetro médio do colmo, ainda assim de forma diferenciada entre os dois solos (interação F1 x F2 significativa).

Em relação ao acúmulo de matéria vegetal, os contrastes testados revelam comportamento similar entre os compartimentos colmo, folhas e pendão. Pelo contraste C1, a adubação com lodo de esgoto foi, na média dos níveis testados, suficiente para proporcionar crescimento estatisticamente equivalente ao verificado para a adubação mineral. Oliveira (2000), trabalhando em um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar e aplicando lodo de esgoto e composto de lixo urbano antes do plantio e após o primeiro corte, observou que ambos os resíduos permitiram alcançar produtividade de colmos equivalente à obtida com adubação mineral convencional.

Pelo contraste C2, com ambos os solos sob adubação mineral, houve superioridade do Cambissolo em relação ao Argissolo, o que é um reflexo da

superioridade química do primeiro em relação ao segundo. Enquanto para o Argissolo as médias obtidas para a massa seca de folha (MSF), massa seca de colmo (MSC) e massa seca do pendão (MSP) foram, respectivamente, 14,40, 56,41 e 10,56 g, para o Cambissolo essas médias foram, respectivamente, 22,84, 80,10 e 15,76 g, representando um acréscimo total na massa seca da parte aérea de 46% do último em relação ao primeiro (118,70 g no Cambissolo e 81,37 g no Argissolo). Valicheski e Marciano (2008) avaliando as características químicas e a composição granulométrica do solo das áreas de extração de argila na Baixada de Campos dos Goytacazes, sendo esta a mesma classe de solos utilizado no presente experimento, concluíram que o solo avaliado possui características promissoras ao desenvolvimento das plantas, sendo considerado como de boa capacidade produtiva em consequência da elevada fertilidade da camada superficial e também das características favoráveis da própria camada intermediária.

Tabela 15. Valores de quadrado médio para cada contraste ou fonte de variação (FV) considerada na análise de variância dos atributos biométricos do sorgo sacarino no experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Contraste ou FV	GL	MSF	MSC	MSP	Alt	Dmédio
C1	1	13,611 ^{ns}	107,478 ^{ns}	7,982 ^{ns}	0,008 ^{ns}	34,969**
C2	1	177,991**	1403,300**	67,641**	0,016 ^{ns}	16,564 ^{ns}
F1 (ou C3)	1	499,145**	11857,248**	379,840**	0,536**	18,051 ^{ns}
F2	5	128,475 ^{ns}	1170,069 ^{ns}	28,546 ^{ns}	0,006 ^{ns}	18,903 ^{ns}
F1 x F2	5	3,851 ^{ns}	28,324 ^{ns}	45,357**	0,024 ^{ns}	0,535*
CV(%)	-	13,21	9,26	12,88	6,13	17,29

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; C1- contraste ortogonal entre "adubação mineral" (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); F1 (ou contraste C3)- fator "solo" do fatorial solo x lodo (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- fator "adubação com lodo" do fatorial solo x lodo (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); e F1xF2- interação entre F1 e F2 no fatorial solo x lodo; CV- coeficiente de variação. Atributos biométricos analisados: MSF (matéria seca da folha), MSC (matéria seca do colmo), MSP (matéria seca do pendão), Alt (altura da planta), Dmédio (diâmetro médio do colmo). Teste F: ** - significativo ao nível de 1% de probabilidade; * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; e *ns* - não significativo.

Tabela 16. Médias dos atributos biométricos do sorgo sacarino nos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3 do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Tratamento	MSF	MSC	MSP	Alt	Dmédio
	-----g-----			m	mm
Contraste C1					
Adubação mineral	18,62a	68,25a	13,16a	2,10 ^a	10,99 b
Fatorial solo x lodo	17,36a	64,71a	14,12a	2,13 ^a	13,01 a
Contraste C2					
AM-Arg	14,40b	56,41b	10,56 b	2,06a	12,28a
AM-Camb	22,84a	80,10a	15,76 a	2,14a	9,70a
Contraste C3 (ou fator F1)					
Lodo-Arg	14,48b	50,65b	11,61	2,04b	12,46
Lodo-Camb	20,25a	78,77a	16,64	2,22a	13,56

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; F1- fator "solo" (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- seis doses de lodo.fator "adubação com lodo" (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); F1xF2- interação entre F1 e F2; AM x demais- contraste ortogonal entre o "fatorial" solo x lodo e os dois tratamentos adicionais com adubação mineral (AM); e AM-Arg x AM-Camb- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb). MSF (matéria seca da folha), MSC (matéria seca do colmo), MSP (matéria seca do pendão), Alt (altura da planta), Dmédio (diâmetro médio do colmo). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5%; médias não seguidas de letras no contraste C3 foram comparadas posteriormente considerando-se o desdobramento da interação significativa solo x lodo.

Para ambos os solos sob os níveis de lodo, o contraste C3 (ou F1) revela que a superioridade do Cambissolo sobre o Argissolo se mantém, ocorrendo acréscimo total na matéria seca da parte aérea de 51% do primeiro em relação ao último (115,66 g no Cambissolo e 76,74 g no Argissolo). Para os compartimentos colmo e folhas as médias observadas no Argissolo e no Cambissolo foram, respectivamente, de 50,65 e 78,77 g, para MSC, e de 14,48 e 20,25 g, para MSF. Para o compartimento pendão, a superioridade do Cambissolo sobre o Argissolo ocorreu em interação com os níveis de lodo (Figura 28). Enquanto para o Cambissolo as doses de lodo não afetaram a matéria seca do pendão (média geral de 16,51 g), sendo os valores elevados mesmo da testemunha sem adubação, para o Argissolo, cuja média geral foi de 11,61 g por pendão, os valores foram crescentes com as doses de lodo aplicadas segundo uma equação quadrática, sendo a média no controle de 5,34 g e na maior dose de lodo de 14,97 g, observando-se um incremento de 280% para esta variável.

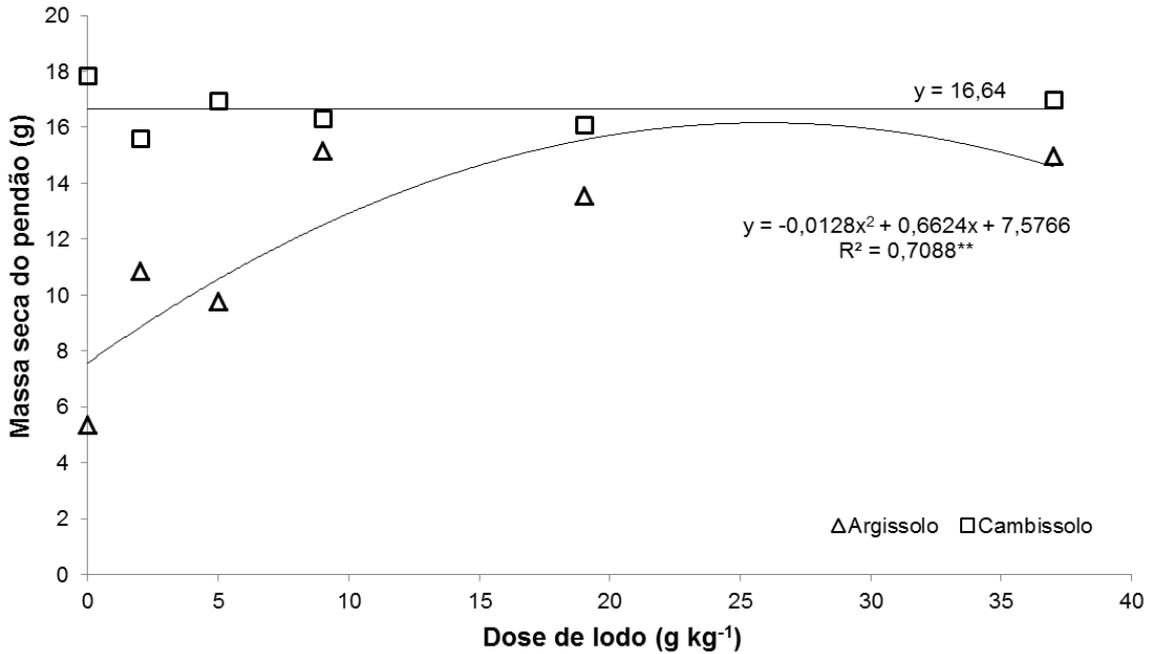


Figura 28: Matéria seca do pendão de sorgo sacarino, após adubação com doses crescentes de lodo de esgoto.

Para a variável altura das plantas não houve diferença significativa entre a média do Argissolo (2,06 m) e a do Cambissolo (2,14 m) quando sob adubação mineral (contraste C2), nem entre a média da adubação mineral (2,10 m) e a dos tratamentos do fatorial solo x lodo (2,13 m), incluindo o controle (contraste C1). Também não foi significativo o efeito das doses crescentes de lodo de esgoto, mas ocorreu diferença significativa entre os dois solos quando sob os diversos níveis de lodo, sendo a média do Argissolo (2,04 m) inferior à observada no Cambissolo (2,22 m).

Para a variável diâmetro médio do colmo não foi observada diferença significativa entre as médias do Argissolo (12,28 cm) e Cambissolo (9,70 cm), ambos sob adubação mineral (contraste C2), mas pelo contraste C1 a média da adubação mineral (10,99 cm) foi inferior à dos tratamentos sob níveis de lodo (13,01 cm). Os efeitos dos fatores solo (F3) e de dose (F2) ocorreram em interação, a qual foi desdobrada na Figura 29, em que se revela, para ambos os solos, crescimento linear do diâmetro com o aumento das doses de lodo, sendo mais intenso para o Argissolo.

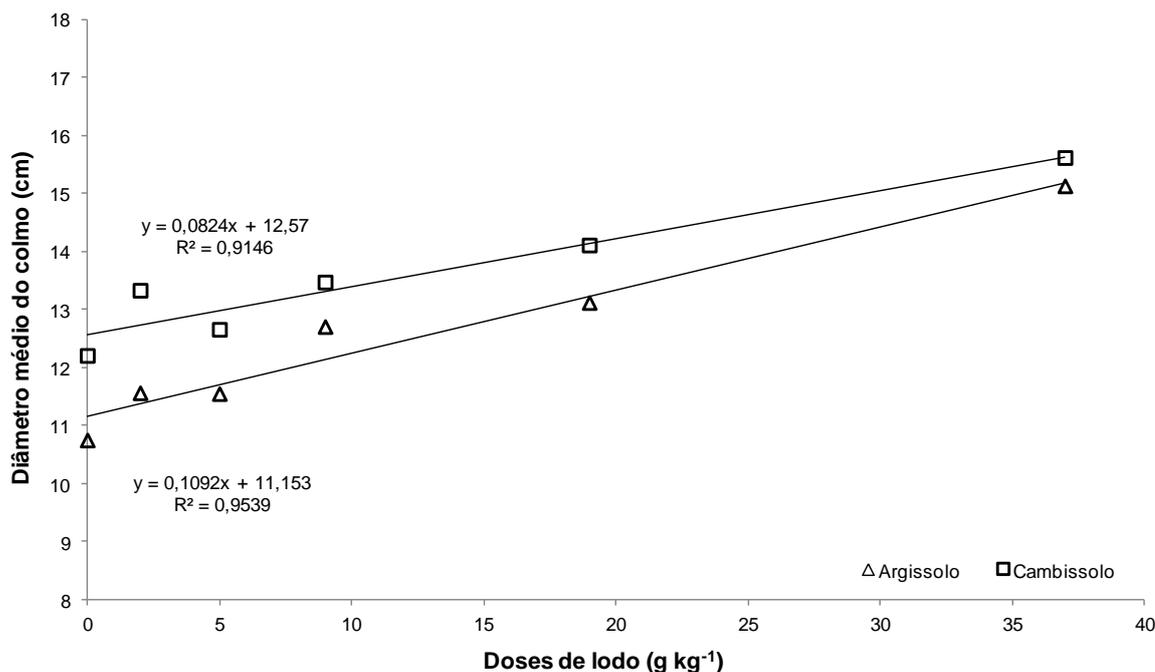


Figura 29: Diâmetro médio dos colmos de sorgo sacarino, após adubação com doses crescentes de lodo de esgoto.

As médias encontradas no controle e na maior dose foram de 10,74 e 15,12 cm, para o Argissolo, e de 12,20 e 15,61 cm, para o Cambissolo, e as doses de lodo proporcionaram incrementos de 41 e 30% no diâmetro médio dos colmos das plantas cultivadas no primeiro e no segundo solo, respectivamente. O diâmetro do colmo apresenta relação direta com a produção de massa fresca da planta, sendo que seu aumento resulta em maiores rendimentos de caldo.

Segundo May et al. (2013), a alta produtividade do sorgo sacarino está associada a uma alta produtividade de colmos, pois o caldo a ser fermentado para obtenção de etanol é extraído dos colmos, assim, quanto mais colmos mais caldo será obtido. Inversamente a este fato se encontra o peso de panículas (pendão), que se correlaciona com a produtividade de grãos. Este deve ser o menor possível devido à competição por fotoassimilados para produção de açúcares solúveis nos colmos com produção de amido nos grãos, uma vez que o acúmulo de açúcares nos colmos ocorre após o florescimento coincidindo com a fase de enchimento de grãos.

Em todos os tratamentos, para os dois solos, a matéria seca acumulada nos colmos do sorgo representou cerca de 60 a 70% da matéria seca total. Esses resultados são corroborados por Soares et al. (2014), que avaliando o acúmulo de

matéria seca por cultivares de sorgo sacarino encontraram valores semelhantes. Segundo May et al. (2013), os colmos de sorgo sacarino podem representar até 70 a 80% de sua massa verde, sendo que para formação dos colmos são exportados do solo principalmente grandes quantidades de K (78%) e N (52%). Esses autores corroboram os resultados encontrados no presente trabalho, onde o nutriente mais exigido para a produção de colmos, tanto no Argissolo quanto no Cambissolo, foi o K. Observa-se assim a importância desse nutriente na produção de etanol pela espécie.

Barbosa et al. (2007) avaliando o efeito residual da aplicação de lodo de esgoto caledo na produtividade do milho safrinha em um Latossolo Vermelho eutroférico, observaram que todos os tratamentos que utilizaram o lodo de esgoto mostraram maior produtividade que a da testemunha. Os autores concluíram que tais resultados foram indicativos de que o lodo de esgoto pode manter a produtividade do milho safrinha em níveis satisfatórios após uma safra normal sem a contribuição de outro insumo, evidenciando seu efeito residual.

4.2.2.3 – Efeitos das doses de lodo na fisiologia do sorgo sacarino

Na Tabela 17 se encontram os resultados da análise de variância para os parâmetros fisiológicos do sorgo sacarino, avaliados no último estágio fenológico (E3), aos 75 dias após a semeadura. Para o contraste C1, que confronta o efeito da adubação mineral com os tratamentos sob doses de lodo (Tabela 18), não foi observado diferença significativa para nenhuma das variáveis analisadas, indicando que o lodo permitiu às plantas condições adequadas de desenvolvimento (ou, ao menos, compatíveis às da adubação mineral), tendo sido o reflexo no crescimento discutido na análise do contraste C1 no tópico anterior.

Tabela 17. Valores de quadrado médio para cada contraste ou fonte de variação (FV) considerada na análise de variância das variáveis fisiológicas do sorgo sacarino no experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Contraste ou FV	GL	Fotossíntese	Condutância Estomática	Transpiração	SPAD
C1	1	7,971 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,0257 ^{ns}	4,063 ^{ns}
C2	1	5,322 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,4418 ^{ns}	253,009**
F1 (ou C3)	1	71,801**	0,0037 ^{ns}	0,4999 ^{ns}	1063,530**
F2	5	32,490 ^{ns}	0,0014 ^{ns}	0,5388 ^{ns}	118,181 ^{ns}
F1 x F2	5	43,077**	0,0016 ^{ns}	0,9393*	31,472**
CV (%)	-	16,14	35,21	16,29	6,27

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; C1- contraste ortogonal entre "adubação mineral" (média dos dois solos) e os demais tratamentos (média geral dos 12 tratamentos do fatorial solo x lodo); C2- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb); F1 (ou contraste C3)- fator "solo" do fatorial solo x lodo (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- fator "adubação com lodo" do fatorial solo x lodo (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); e F1xF2- interação entre F1 e F2 no fatorial solo x lodo; CV- coeficiente de variação. Teste F: ** - significativo ao nível de 1% de probabilidade; * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; e ns - não significativo.

Tabela 18. Médias das variáveis fisiológicas do sorgo sacarino nos tratamentos considerados nos contrastes C1, C2 e C3 do experimento com adubação mineral e níveis crescentes de lodo de esgoto.

Tratamento	Fotossíntese $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Transpiração $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Condutância Estomática	SPAD
Contraste C1				
Adubação mineral	16,35a	3,36a	0,14a	42,37a
Fatorial solo x lodo	15,27a	3,42a	0,13a	41,68a
Contraste C2				
AM-Arg	17,17a	3,59a	0,15a	37,34b
AM-Camb	15,54a	3,12a	0,13a	47,40a
Contraste C3 (ou fator F1)				
Lodo-Arg	16,50	3,52	0,13a	37,47
Lodo-Camb	14,05	3,32	0,12a	45,89

FV- fontes de variação; GL- graus de liberdade; F1- fator "solo" (dois níveis: Argissolo e Cambissolo); F2- seis doses de lodo.fator "adubação com lodo" (seis níveis: 0; 2,31; 4,63; 9,27; 18,54 e 37,09 Mg ha⁻¹); F1xF2- interação entre F1 e F2; AM x demais- contraste ortogonal entre o "fatorial" solo x lodo e os dois tratamentos adicionais com adubação mineral (AM); e AM-Arg x AM-Camb- contraste ortogonal entre adubação mineral no Argissolo (AM-Arg) e no Cambissolo (AM-Camb). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5%; médias não seguidas de letras no contraste C3 foram comparadas posteriormente considerando-se o desdobramento da interação significativa solo x lodo.

Para a variável condutância estomática não foi observada diferença significativa para nenhum dos contrastes testados, nem qualquer efeito das doses crescentes de lodo, demonstrando que a mesma não foi afetada pelos

tratamentos. As respostas estomáticas são mais estreitamente relacionadas ao conteúdo de água no solo do que ao *status* hídrico da planta, sugerindo que os estômatos respondem a sinais químicos, como o ácido abscísico (ABA), produzido pela desidratação da raiz (Chaves et al., 2002). Sendo assim, como no presente experimento a irrigação foi a mesma para todos os tratamentos, era esperado que não existisse diferenças para esta variável entre eles.

Para a transpiração, além da ausência de diferença entre a adubação mineral e os tratamentos sob doses de lodo (contraste C1), também não foi observada diferença entre os tratamentos testados no contraste C2 (os dois solos sob adubação mineral), sendo a média no Argissolo $3,59 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e no Cambissolo $3,12 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Quanto aos tratamentos do fatorial solo x doses de lodo, observou-se efeito significativo da interação, sendo o desdobramento para esta variável apresentado na Figura 30, onde se encontram as equações de regressão linear para os dois solos.

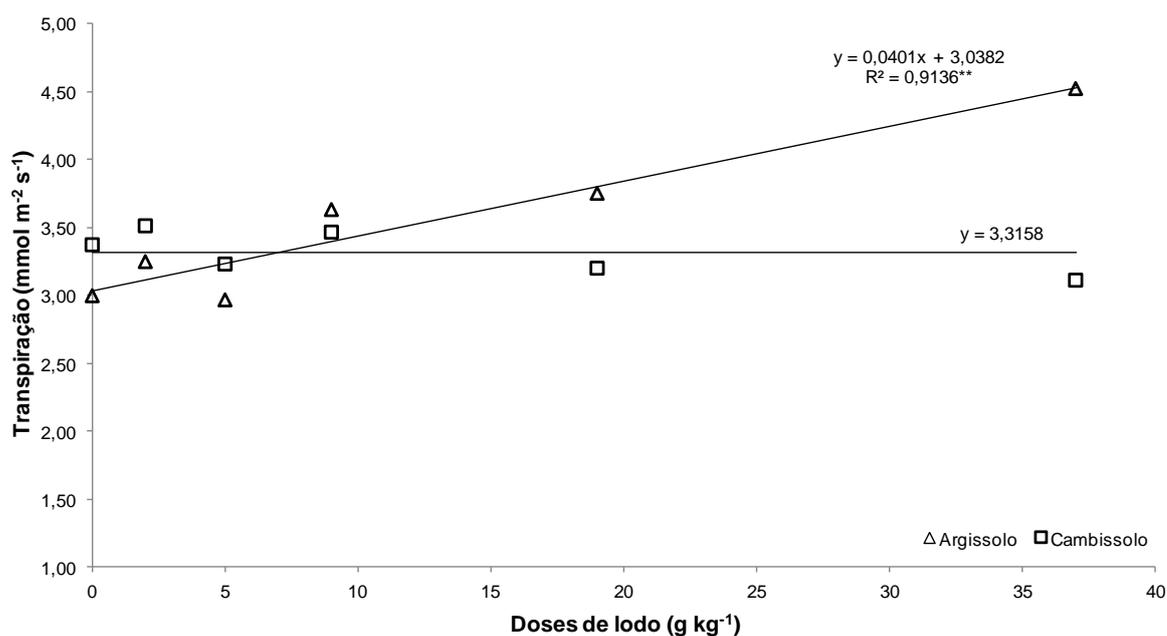


Figura 30: Valores de transpiração de sorgo sacarino, após adubação com doses crescentes de lodo de esgoto.

Para as plantas cultivadas no Cambissolo ocorreu pequena redução na transpiração observada na maior dose de lodo ($3,11 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em relação à do controle ($3,37 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), no entanto, o modelo não foi significativo ($y=3,3158$). Para as plantas cultivadas no Argissolo observa-se aumento na transpiração em

relação ao controle ($3,00 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), com o valor máximo ($4,52 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ocorrendo na maior dose de lodo utilizada. Já para as plantas no Cambissolo ocorreu pequena redução na transpiração observada na maior dose de lodo ($3,11 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em relação à do controle ($3,37 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Assim como a condutância estomática, a transpiração também é afetada pelo estado hídrico do solo e, conseqüentemente, da planta, sendo que se esta se encontra sob restrição hídrica haverá maior fechamento estomático e, por conseqüência, a transpiração será menor. Segundo Paiva et al. (2005), com a redução na disponibilidade de CO_2 , devido ao fechamento dos estômatos, ocorre a diminuição na taxa de assimilação de CO_2 que determina menor perda de água por transpiração, além de poder afetar a fotossíntese.

Para a variável fotossíntese não foi observada diferença significativa no contraste C2, similarmente ao verificado no C1, sendo as médias para o sorgo cultivado no Argissolo de $17,17 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e no Cambissolo de $15,54 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ambos sob adubação mineral. Para os tratamentos do fatorial solo x doses de lodo (F1XF2), a interação foi significativa, sendo o desdobramento dos dados apresentado na Figura 31.

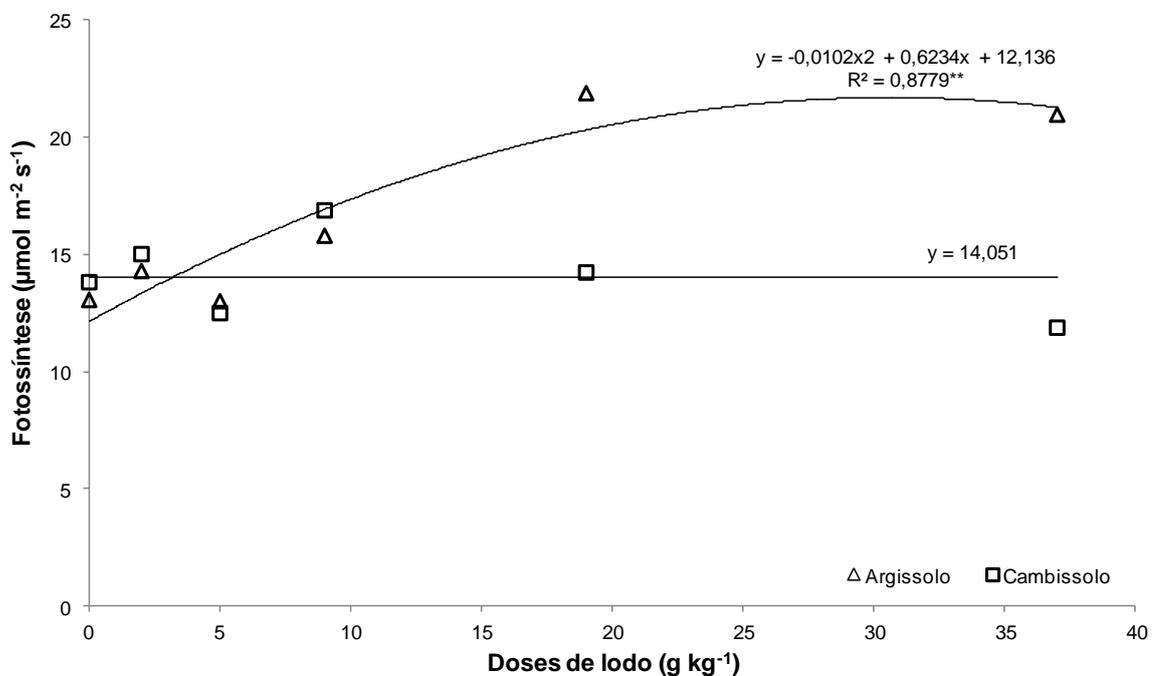


Figura 31: Valores de fotossíntese de sorgo sacarino, após adubação com doses crescentes de lodo de esgoto.

Para as plantas cultivadas no Cambissolo ocorreu pequena redução na transpiração observada na maior dose de lodo ($3,11 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em relação à do controle ($3,37 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), no entanto, o modelo não foi significativo ($y=3,3158$). Para as plantas cultivadas no Argissolo observa-se aumento na transpiração em relação ao controle ($3,00 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), com o valor máximo ($4,52 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ocorrendo na maior dose de lodo utilizada. Já para as plantas no Cambissolo ocorreu pequena redução na transpiração observada na maior dose de lodo ($3,11 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em relação à do controle ($3,37 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Assim como a condutância estomática, a transpiração também é afetada pelo estado hídrico do solo e, conseqüentemente, da planta, sendo que se esta se encontra sob restrição hídrica haverá maior fechamento estomático e, por conseqüência, a transpiração será menor. Segundo Paiva et al. (2005), com a redução na disponibilidade de CO_2 , devido ao fechamento do estômatos, ocorre a diminuição na taxa de assimilação de CO_2 que determina menor perda de água por transpiração, além de poder afetar a fotossíntese.

Para a variável fotossíntese não foi observada diferença significativa no contraste C2, similarmente ao verificado no C1, sendo as médias para o sorgo cultivado no Argissolo de $17,17 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e no Cambissolo de $15,54 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ambos sob adubação mineral. Para os tratamentos do fatorial solo x doses de lodo (F1XF2), a interação foi significativa, sendo o desdobramento dos dados apresentado na Figura 32.

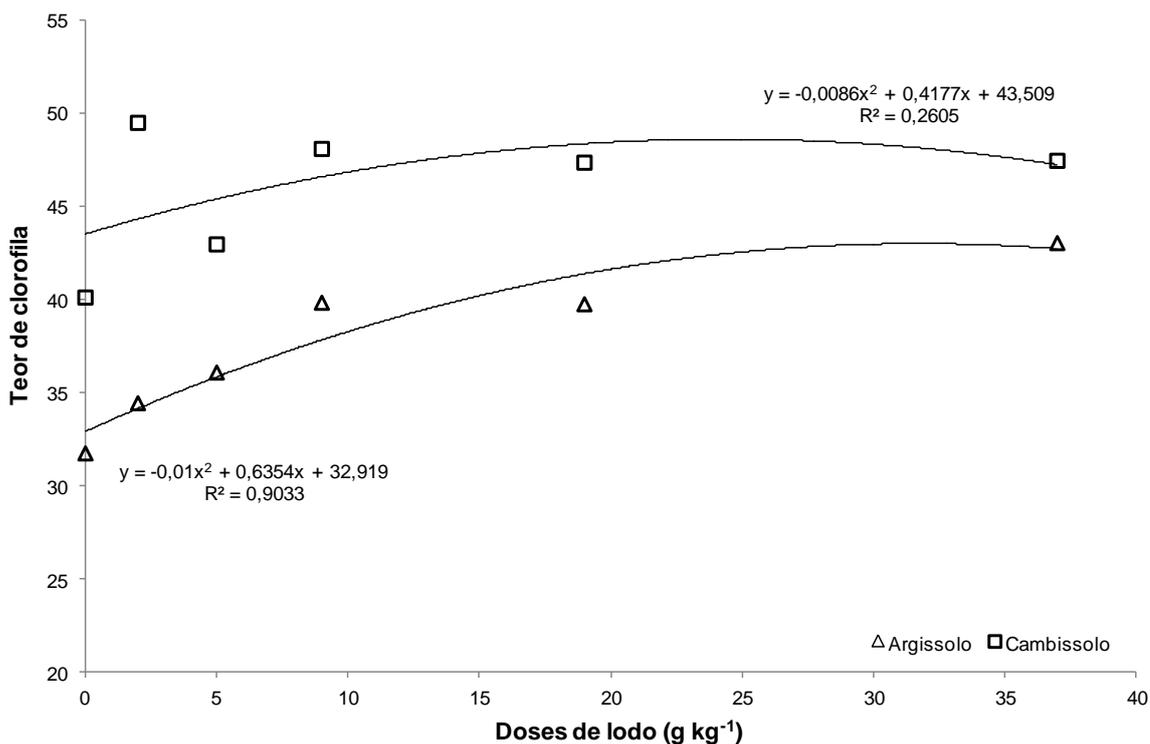


Figura 32: Teor de clorofila (SPAD) de sorgo sacarino, após adubação com doses crescentes de lodo de esgoto.

Na regressão observa-se que o teor de clorofila foi incrementado em 35 e 18% no Argissolo e Cambissolo, respectivamente, de acordo com o aumento das doses de lodo. Para o Argissolo as médias no controle e maior dose variaram entre 31,74 e 43,02, enquanto que no Cambissolo estiveram entre 40,10 e 47,43.

Considerando-se que o crescimento das plantas depende das concentrações de nitrogênio nas plantas, o estudo dos processos de trocas gasosas e a fotossíntese são de grande relevância para o conhecimento dos efeitos positivos da aplicação de diferentes dosagens de lodo de esgoto nas espécies (Dantas, 2010). Porém, segundo Mata-Gonzalez et al. (2002), nem sempre a taxa fotossintética se relaciona positivamente com os teores de N. Estes autores mencionam que os principais efeitos benéficos das doses de lodo de esgoto seriam a obtenção de maiores áreas foliares das plantas. No presente estudo pode-se observar que no solo com fertilidade menor (Argissolo), as plantas obtiveram uma melhor e maior resposta fotossintética, com aumento das doses aplicadas. Yan et al. (2000) avaliaram a influência do bio sólido nas relações fotossintéticas de um arbusto no deserto e verificaram que em baixas doses ocorreu aumento da fotossíntese.

A relação das variáveis fotossíntese e teor de clorofila é um bom indicativo para a utilização racional do N, que é o nutriente exigido em grandes quantidades pelo sorgo, principalmente para produção de colmos. Segundo Argenta et al. (2001), o uso de parâmetros, como o teor de clorofila na folha, pode tornar-se importante ferramenta para a recomendação de adubação nitrogenada em cereais, pois a aplicação excessiva de N pode ocasionar um “consumo de luxo” deste nutriente pela planta, podendo resultar em sua concentração sob a forma de nitrato bem acima do nível adequado. No entanto, segundo Lino (2011), é importante ressaltar que o desempenho fotossintético do sorgo não depende apenas da quantidade de clorofila, mas da captura e transferência de energia luminosa e de sua conversão em energia química.

5. CONCLUSÕES

O lodo de esgoto, gerado pela ETE-Chatuba, deve ser higienizado antes de sua utilização agrícola, pois o mesmo apresenta características microbiológicas indesejáveis e que não atendem à legislação vigente. A dose de 15% de cal hidratada foi suficiente para adequar o lodo às normas da Resolução 375/2006 do Conama, que regulamenta a utilização agrícola de lodo de esgoto no Brasil.

A aplicação do lodo de esgoto influenciou as características físicas e químicas do solo em relação à adubação mineral. O lodo caleado proporcionou aumento do pH, saturação por bases, capacidade de troca catiônica, teor de fósforo e cálcio nos dois solos. Os teores de magnésio, com o aumento das doses de lodo, foram reduzidos no solo. Devido à adição de cal no lodo para sua higienização, as relações entre cálcio e magnésio foram alteradas, mas, se mantiveram em níveis não prejudiciais à cultura.

A incorporação de lodo ao solo promoveu expressivas alterações nos atributos físicos relacionados à estrutura dos dois solos, proporcionando aumento na macroporosidade, porosidade total e aeração e redução na umidade na Capacidade de Campo, em relação à adubação mineral. A microporosidade do solo foi maior na adubação mineral em relação à adição de lodo, em ambos os solos.

Assim como para os teores no solo, a caleação realizada no lodo afetou as relações entre os cátions Ca, K e Mg, causando um desbalanço entre os mesmos e que refletiu além dos teores no solo na absorção dos mesmos pelo sorgo. Ocorreram reduções nos teores de manganês com o aumento das doses de lodo

devido ao aumento do pH ocasionado pela caleação do lodo, que possui influência na disponibilidade e absorção principalmente de micronutrientes. No entanto, para o zinco e cobre as doses de lodo proporcionaram aumento nos níveis de absorção, demonstrando que o lodo atuou como fonte dos mesmos.

As massas secas da folha, do colmo e do pendão aumentaram com as doses de lodo para os dois solos. O diâmetro médio seguiu o mesmo padrão, porém para a altura das plantas não foram observadas diferenças expressivas entre as doses.

Para os dois solos foi observado aumento nos valores de fotossíntese, transpiração e teor de clorofila, sendo que para a condutância estomática os tratamentos não foram significativos. A relação observada nos tratamentos entre a variável fotossíntese e teor de clorofila demonstrou ser um bom indicativo para a utilização racional do N que é o nutriente mais exigido pelo sorgo principalmente para formação e enchimento de grãos.

A utilização de doses de lodo de esgoto nos dois solos da Região se mostrou promissora, indicando que melhorias podem ser advindas dessa aplicação. As alterações observadas nas características físicas e químicas do solo, assim como na absorção de nutrientes, biomassa e fisiologia do sorgo sacarino foram mais expressivas no Argissolo, devido à natureza depauperada desse solo.

Mais estudos se fazem necessários a fim de averiguar a aplicação desse resíduo no campo. Devido à sua composição ele proporcionou ganhos para os solos e para o sorgo sacarino. No entanto, seu potencial de contaminação deve ser levado em consideração, sendo que a utilização do lodo só pode ser feita após higienização desse resíduo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCARDE, J.C. (2005) Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas por J.C. Alcarde. São Paulo, ANDA, 24p. (ANDA, Boletim Técnico, 6).
- ALMÉRI, N. (2010) Lodo de esgoto como adubo na agricultura. Negócios S.A.
- ALVES, A. C.; BRAUNER, J.L.; CORDEIRO, D.S.; ZONTA, E.P.; CORREA, L.A.V. (1988) Exigências nutricionais em potássio, cálcio e magnésio do sorgo sacarino. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 23, n.5, p. 529-536.
- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S. E SUZUKI, L.E.A.S. (2007) Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico em recuperação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 617-625.
- ALVES, M. C. e SOUZA, Z. M. (2008) Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.2505-2516.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. (1992) American Water Works Association - AWWA; Water Pollution Control Federation - WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18.ed. Washington.
- ANDRÉ, R.G.B.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; FERRAUDO, A.S. (2008) Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no Estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. Revista Brasileira de Meteorologia, v.23, n.4, p.501 – 509.
- ANDREOLI, C.V. (Coord.) (2001) Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: Rima, ABES, 282p.
- ARAÚJO, F.F.; GIL, F.C.; TIRITAN, C.S. (2009) Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de *Brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 39, n. 1, p. 1-6.

- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G. (2001) Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.31, n.4, p.715-722.
- ARGENTON J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. (2005) Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p.425-435.
- BARBOSA, G.M.C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I.C.B. (2007) Efeito do lodo de esgoto em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Eutroférico. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 28, n. 1, p. 65-70.
- BARBOSA, G.M.C. e TAVARES FILHO, J. (2006) Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 27, n. 4, p. 565-580.
- BARBOSA, G.M.C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I.C.B. (2002) Avaliações de propriedades físicas de um Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos. *Sanare*, Curitiba, v.17, n.17, p. 94-101.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312p.
- BONINI, C.S.B.; ALVES, M.C.; MONTANARI, R. (2015) Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.19, n.4, p.388–393.
- CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M.O.; SILVA, A.R.D.; TASSO JÚNIOR, L.C.; NOBILE, F.O.D. (2006) Atributos físicos de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.3, p.738-747.
- CAMPBELL, C.R. E C.O. PLANK. (1992) Sample preparation. In: C.O. Plank (ed). *Plant Analysis Reference Procedures for the Southern Region of the United States*. Southern Cooperative Series Bulletin, p. 368.
- CAMPOS, F.S.; ALVESI, M.C.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. (2011) Atributos físico-hídricos de um Latossolo após a aplicação de lodo de esgoto em área degradada do Cerrado. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.41, n.5, p.796-803.
- CAPIZZI-BANAS S., DELOGE M., REMY M. AND SCHWARTZBROD, J. (2004). Liming as an advanced treatment for sludge sanitisation: helminth egg elimination—*Ascaris* eggs as model. *Water Research*, 28(14-15), 3251-3258.

- CEOLATO, L.C. (2007) Lodo de esgoto líquido na disponibilidade de nutrientes e alterações dos atributos químicos de um Argissolo. Dissertação (Mestrado) – Campinas-SP, Instituto Agrônomo - IAC, p. 45.
- CHAGAS, W.F. (2000) Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no Estado do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) – Rio de Janeiro-RJ, Escola Nacional de Saúde Pública – Fundação Oswaldo Cruz, p.89.
- COELHO, H.A.; GRASSI FILHO, H.; ROMEIRO, J.C.T.; POMPERMAYER, G.V.; BARBOSA, R.D.; LOBO, T.F. (2011) Desempenho agrônomo do lodo de esgoto como fonte de nitrogênio em bananeiras Revista Agrarian, Dourados, v.4, n.13, p.172-181.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. (1999) Aplicação de biossólido de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projetos e operação. São Paulo, SP. 29p.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. (2006) Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. 41p.
- COSTA, M.S.; COSTA,Z.V.B.; ALVES,S.M.C.; NETO, M.F.; MARINHO, M.J.C. (2012) Avaliação nutricional do milho cultivado com diferentes doses de efluente doméstico tratado. Irriga, Botucatu, Edição Especial, p. 12 – 26.
- COUTINHO, E.L.M.; NEPTUNE, A.M.L.; SOUZA, E.C.A.; GIMENES, J.D.; NATALE, W. e BANZATT, D.A. (1987) Diagnose da nutrição fosfatada na cultura do sorgo sacarino. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.22,n.5, p.451-457.
- DANTAS, J.D.M. (2010) Uso de lodo de esgoto como fonte alternativa de nitrogênio para o cultivo do tomateiro cereja (*Lycopersicon esculentum* SP.). Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, p. 51.
- DE MARIA, I.C.; KOCSSI, M.A.; DECHEN, S.C.F. (2007) Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. Bragantia, Campinas, v.66, n.2, p.291-298.
- DINIZ, G.M.M. (2010) Produção de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) aspectos gerais. Dissertação (Mestrado) – Recife-PE, Universidade Federal Rural de Pernambuco, p. 23.
- EIRAS, P.P. (2014) Efeito do biossólido no desenvolvimento e produção do caupi. Tese (Doutorado) – Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense, p. 72.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. (1997) de Janeiro, 212p.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. (1999) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, 370p.
- FERNANDES, S.A.P. e SILVA, S.M.C.P. (1999) Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos. Londrina: Prosab, Finep, 84p.
- FERNANDES, P.G. (2013) Avaliação agrônômica de dois cultivares de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, p. 89.
- FERNANDES, P.G.; MAY, A.; COELHO, F.C.; ABREU, M.C.; BERTOLINO, K.M. (2014) Influência do espaçamento e da população de plantas de sorgo sacarino em diferentes épocas semeadura. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.44, n.6, p.975-981.
- FIA, R., MATOS, A.T.; AGUIRRE, C. I. (2005) Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caledo. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.13, n.4, 287-299.
- FRAC, M.; OSZUST, K.; LIPIEC, J. (2012) Community level physiological profiles (CLPP), characterization and microbial activity of soil amended with dairy sewage sludge. *Sensors*, v.12, p.3253-3268.
- FREIRE, L.R.; BALIEIRO, F. de C.; ZONTA, E.; ANJOS, L.H.C. dos; PEREIRA, M.G.; LIMA, E.; GUERRA, J.G.M.; FERREIRA, M.B.C.; LEAL, M.A. de A.; CAMPOS, D.V.B. de; POLIDORO, J.C. (2013) **Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica: EDUR-UFRRJ. 430p.
- GUEDES, M.C.; ANDRADE, C.A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M.E. (2006) Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p. 267-280.
- JAMALI, M.K.; KAZI, T. G.; ARAIN, M.B.; AFRIDI, H.I.; MEMON, A.R.; JALBANI, N.; SHAH, A. (2008) Use of Sewage Sludge After Liming as Fertilizer for Maize Growth. *Pedosphere*, v.18, n.2, p. 203-213.
- KIEHL, E.J. (1979) Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo, Ceres, 262p.
- KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. (2002) Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.26; p.857-867.
- LANDAU, E.C. e SCHAFFERT, R.E. (2011) Sorgo sacarino: Tecnologia agrônômica e industrial para alimentos e energia – Zoneamento de áreas aptas para o plantio de sorgo sacarino na época de entressafra de cana-de-açúcar no Brasil. *Agroenergia em Revista*, Ed. 3, Ano II, p. 20-21.

- LEAL, M.A. de A.; BALIEIRO, F. de C.; INACIO, C.T.; CAMPOS, D.V.B. de; GUERRA, J.G.M.; ZONTA, E.; FREIRE, L.R. (2013) Uso e manejo da matéria orgânica para fins de fertilidade do solo. In: FREIRE, L.R.; BALIEIRO, F. de C.; ZONTA, E.; ANJOS, L.H.C. dos; PEREIRA, M.G.; LIMA, E.; GUERRA, J.G.M.; FERREIRA, M.B.C.; LEAL, M.A. de A.; CAMPOS, D.V.B. de; POLIDORO, J.C. **Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica: EDUR-UFRRJ, p.143-165.
- LEÃO, D.A.S.; FREIRE, A.L.O.; MIRANDA, J.R.P. (2011) Estado nutricional de sorgo cultivado sob estresse hídrico e adubação fosfatada. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 74-79.
- LEMAINSKI, J. e SILVA, J.E. (2006) Utilização do bio sólido da CAESB na produção de milho no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, p. 741-750.
- LETEY, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop reduction. *Adv. Soil Sci.*, New York, 1:277-294.
- LIBARDI, P.L. (1995) Dinâmica da água no solo. 1.ed. Piracicaba: O autor, 509p.
- LIMA, E. e MALAVOLTA, E. (1982) Resposta do sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) ao emprego de fontes e doses de fósforo em condições de casa-de-vegetação. II Latossolo Vermelho Escuro-Textura Média. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, v.39, n.2, p. 755-801.
- LINO, L.O. (2011) Características anatômicas e fisiológicas de genótipos de sorgo contrastantes para tolerância à seca. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, MG, p. 87.
- MALAVOLTA, E.; COUTINHO, E.L.M.; VITTI, G.C.; ALEJO, N.U.; NOVAES, N.J.; FURLANI NETO, V.L. (1979) Estudos sobre a nutrição mineral do sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). i. Deficiências de macro e micronutrientes e toxidez de alumínio, cloro e manganês. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, v.36, p. 173-202.
- MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O.; OLIVEIRA, F.C. & MATTIAZZO, M.E. (2001) Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um Latossolo Amarelo saturado e não saturado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 1-9.
- MARCHEZAN, E. e SILVA, M.I. (1984) Avaliação de cultivares de sorgo sacarino em Santa Maria, RS. *Revista Centro de Ciências Rurais*, Santa Maria, v. 14, p. 161-172.
- MATA-GONZÁLEZ, R.; SOSEBEE, R.E.; WAN, C. (2002) Physiological impacts of biosolids application in desert grasses. *Environmental and Experimental Botany*, n. 48, p.139–14.

- MATTA, M.E.M. (2011) Índice de perigo para subsidiar a aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola. Tese (Doutorado) – São Paulo-SP, Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, p. 113.
- MATOS, M.P. E MATOS, A.T. (2012) Dose de cal hidratada e características químicas de um lodo de esgoto doméstico submetido à caleação. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v.20 n.4, p. 357-363.
- MAZURANA, M. (2011) Atributos físicos, mineralógicos e matéria orgânica de solos relacionados à capacidade de suporte de carga. Dissertação (Mestrado) – São Paulo-SP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 169.
- MAY, A.; et al.(2013) Cultivo de Sorgo Sacarino em Áreas de Reforma de Canaviais. Circular Técnica, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG, n.186, p. 36.
- MEDEIROS, J.C.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; ROSA, J.D.; GATIBONI, L.C. (2008) Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 29, n. 4, p. 799-806.
- MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M.T. et al. (Eds.). *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: Sabesp, 2001.
- MELO, V.P.; BEUTLER, A.N.; SOUZA, Z.M.; CENTURION, J.F.; MELO, W.J. (2004) Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.1, p.67-72.
- METCALF e EDDY (1991) Desind of Facilities for the Treatment and Disposal of Sludge. In: Wastewater Engineering. New York, Mc Graw - Hill.
- MININNI, G. E SANTORI, M. (1987) Problems and perspectives of sludge utilization in agriculture. Agriculture, Ecosystems & Enviroment, v. 18, n.4, p.291-311.
- NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B. (2004) Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após a aplicação de lodo de esgoto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.28, n.1, p.385-392.
- NASCIMENTO, A.L.; SAMPAIO, R.A.; JUNIO, G.R.Z.; FERNANDES, L.A., S. F.; CRUZ; CARNEIRO, J.P.; BARBOSA, C.F.; LIMA, N.N. (2014) Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. Biosci. Journal, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 146-153.
- OLIVEIRA, F.C.; MARQUES, M.O.; BELLINGIERI, P.A.; PERECIN, D. (1995) Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. Scientia Agricola, Piracicaba, n. 52, v.2, p. 360-367.

- ORLANDO FILHO, J. O. et al. (1996) Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos, v. 14, n. 5, p. 13-17.
- OLIVEIRA, F.C. e MATTIAZZO, M.E. Mobilidade de metais pesados em um latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. Scientia Agrícola, v. 58, n. 4, p. 807-812, 2001.
- OLIVEIRA, F.A.; CARMELLO, Q.A.C.; MASCARENHAS, H.A.A. (2001) Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. Scientia Agrícola, v.58, n.2, p.329-335,
- OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R. ; ROSSETTO, R. (2002) Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um latossolo amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 505-519.
- OLIVEIRA, I.P.; COSTA, K.A.P.; SANTOS, K.J.G.; MOREIRA, F.P. (2005) Considerações sobre a acidez dos solos de cerrado. Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos, v.1, n.1, p. 01-12.
- PAIVA, A.S.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D.; TURCO, J.E.P. (2005) Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.161-169.
- PARAÍBA, L.C. e SAITO, M.L. (2005) Distribuição ambiental de poluentes orgânicos encontrados em lodos de esgoto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.40, n.9, p.853 860.
- PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. (2010) Produção e tratamento de lodo de esgoto - Uma revisão. Revista Liberato, v.11, p.89-188
- PEREIRA FILHO, I.A.; PARRELLA, R.A.C.; MOREIRA, J.A.A.; MAY, A.; SOUZA, V.F.; CRUZ, J.C. (2013) Avaliação de cultivares de sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] em diferentes densidades de semeadura visando a características importantes na produção de etanol. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.12, n.2, p. 118-127.
- PIRES, A. M. M. (2006) Uso agrícola do lodo de esgoto: aspectos legais. EMBRAPA MEIO AMBIENTE, Jaguariúna, SP.
- QUINTANA, N.R.G.; CARMO, M.S.; MELO, W.J. (2011) Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. Nucleus, v.8, n.1, p.183-192.
- RAIJ, B. van; SILVA, N.M.; BATAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELINAZZI JÚNIOR, R.; DECHEN, A.R.; TRANI, P.E. (1992) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo.** 108p. (Boletim Técnico, 100)

- RIBEIRO FILHO, N. M.; FLORÊNCIO, I. M.; ROCHA, A. S.; DANTAS, J. P.; FLORENTINO, E. R.; SILVA, F. L. H. (2008) Aproveitamento do caldo do sorgo sacarino para produção de aguardente. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 9-16.
- REI, E.F; MAIA, L.R; ARAUJO, O.L; GARCIA, G.O.; PASSO, R.R. (2009) Alterações no pH, matéria orgânica e CTC efetiva do solo, mediante a aplicação de elevadas doses de lodo de esgoto em diferentes intervalos de irrigação. *Revista Verde*, Mossoró-RN, v.4, n.2, p. 31-38.
- RESENDE, T.M.; MORAES, E.R.; FRANCO, F.O.; ARRUDA, E.M.; ARAÚJO, J.R.; SANTOS, D.S.; BORGES, E.N.; RIBEIRO, B.T. (2012) Avaliação física do solo em áreas sob diferentes usos com adição de dejetos animais no bioma Cerrado. *Bioscience Journal*, Uberlândia-MG, v. 28, Supplement 1, p. 179-184.
- RICCI, A.B.; PADOVANI, V.C.R.; PAULA JÚNIOR D.R. (2010a) Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado. I - Atributos Físicos e Revegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 535-542.
- RICCI, A.B.; PADOVANI, V.C.R.; PAULA JÚNIOR D.R. (2010b) Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado. I - Atributos Químicos e Revegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 543-551.
- RIGO, M.M.; RAMOS, R.R.; CERQUEIRA, A.A.; SOUZA, P.S.A.; MARQUES, M.R.C. (2014) Destinação e reuso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil. *Gaia Scientia*, v.8, n.1, p. 174-186.
- ROIG, N.; SIERRA, J.; MARTÍ, E.; NADAL, M.; SCHUHMACHER, M.; DOMINGO, J.L. (2012) Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 158, p. 41– 48.
- ROSOLEM, C.A. e MALAVOLTA, E. (1981) Capacidade de absorção de nutrientes e eficiência nutricional do sorgo sacarino. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, v.38,p. 203-221.
- ROSOLEM, C.A.; MALAVOLTA, E.; BRINHOLI, O.; SERRA, G.E. (1982) Respostas do sorgo sacarino a N, P e K, II. Características tecnológicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.17, n.3, p.385-391.
- ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. K.; BRINHOLI, O. (1984) Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 19, n. 12, p. 1443-1448.
- SANEPAR. (1997) Companhia de Saneamento do Paraná: Manual Técnico para Utilização Agrícola do lodo de esgoto no Paraná, 96 p.

- SILVA, F.G.; BRITO, C.F.; OLIVEIRA, J.C.; RODRIGUES, J.P.; TABOSA, J.N.; SILVA NETO, J.P. Aspectos gerais do cultivo do sorgo para o semiárido alagoano. Governo de Alagoas, Secretaria de Estado da Agricultura e do desenvolvimento agrário –SEAGRI - Superintendência de Pesquisa, Assistência técnica e Extensão rural. <<http://www.agricultura.al.gov.br/informativo/SORGO%20DIPAP-2010.pdf>> Acessado em 13/03/2012.
- SIMONETE, M. A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A.; TEIXEIRA, C.F.A. (2003) Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1187-1195.
- SINGH, R.P. e AGRAWAL M. (2008) Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. Waste Management, v. 28, p. 347–358.
- SOARES, E.R.; COUTINHO, E.L.M.; RAMOS, S.B.; SILVA, M.S.; BARBOSA, J.C. (2014) Acúmulo de matéria seca e macronutrientes por cultivares de sorgo sacarino. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 35, n. 6, p. 3015-3030.
- SOUTO, L.S.; SILVA, L.M.; LOBO, T.F.; FERNANDES, D.M.; LACERDA, N.B. (2005) Níveis e formas de aplicação de lodo de esgoto na nutrição e crescimento inicial da mamoneira. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande, v.9, (Suplemento), p.274-277.
- SOUZA, L.H.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; VILLANI, E.M.A. (2010) Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, p. 1641-1652.
- TEIXEIRA, C.G.; JARDINE, J.G.; NICOLELLA, G. e ZARONI, M.H. (1999) Influência da época de corte sobre o teor de açúcares de colmos de sorgo sacarino Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.9, p.1601-1606.
- TSUTIYA, M.T. (2000) Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A., ed. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, p.69-105.
- TSUTIYA, J.B.C.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELO, A.J.; MARQUES, M.O. (2001) – 1ª edição São Paulo: SABESP, 468p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) (1986) Test methods for evaluating solid wastes. Washington, DC.
- VALICHESKI, R.R.; MARCIANO, C.R.; PEÇANHA, A.L.; BERNARDES, R.S. E MONNERAT, P.H. (2011) Estado nutricional do coqueiro cultivado em solos submetidos a diferentes níveis de compactação e umidade. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.11, p.1152–1160.

- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p. 892-897.
- VON SPERLING, M. (2001) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná. 484p.
- WONG, J.W.C.; FANG, M. (2000) Effects of lime addition on sewage sludge composting process. *Water Research*, n.34, p.3691-3698.