

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

DIOGO HENRIQUE DE SÁ VELOSO XIMENES

**CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM SOLO
CONTAMINADO POR Cd, Pb e Zn E TRATADO COM
LODO DE ESGOTO E BIOCHAR**

RECIFE-PE

2022

DIOGO HENRIQUE DE SÁ VELOSO XIMENES

**CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM SOLO CONTAMINADO POR
Cd, Pb e Zn E TRATADO COM LODO DE ESGOTO E BIOCHAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Caroline Miranda Biondi

Coorientador: Dr. William Ramos da Silva

RECIFE-PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- X6c Ximenes, Diogo Henrique de Sá Veloso
CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM SOLO CONTAMINADO POR Cd, Pb E Zn E TRATADO COM LODO DE ESGOTO E BIOCHAR / Diogo Henrique de Sá Veloso Ximenes. - 2022.
37 f. : il.
- Orientadora: Caroline Miranda Biondi.
Coorientador: William Ramos da Silva.
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Florestal, Recife, 2022.
1. Remediação. 2. Metais Pesados. 3. Santo Amaro. 4. Contaminação. I. Biondi, Caroline Miranda, orient. II. Silva, William Ramos da, coorient. III. Título

CDD 634.9

DIOGO HENRIQUE DE SÁ VELOSO XIMENES

**CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM SOLO CONTAMINADO POR
Cd, Pb e Zn E TRATADO COM LODO DE ESGOTO E BIOCHAR**

Aprovado em 26 de maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Maria da Penha Moreira Gonçalves
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

Dra. Simone Aparecida da Silva Lins
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

Prof^ª. Dra. Caroline Miranda Biondi
Orientadora
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

Dr. William Ramos da Silva
Coorientador
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

RECIFE-PE

2022

Aos meus pais, Alexandre José e Ana Cristina, por todo
apoio, incentivo, dedicação e amor

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao corpo docente do curso de Engenharia Florestal por todos os ensinamentos, dedicação, vivência, oportunidade e suporte na capacitação profissional.

Aos meus pais, Alexandre José e Ana Cristina, por tudo o que fizeram e fazem por mim, com dedicação, amor, carinho e respeito. Sem vocês eu não conseguiria chegar aonde eu cheguei, vocês são minha maior força e exemplo e que, apesar de todas as dificuldades, me criaram e educaram com o que tiveram de melhor. Agradeço por sempre terem confiado em mim e acreditado que sou capaz.

Aos meus irmãos, Thiago Augusto e Camila Emanuelle, por todo companheirismo e amizade, sendo sempre apoio nas horas difíceis e deixando a vida mais leve com nossas brincadeiras. Vocês são peças fundamentais em minha vida e formação.

A minha esposa, Jéssica Melo, por todo companheirismo, amizade, apoio, confiança, incentivo e amor. Por dividir as aflições e multiplicar as felicidades. Por sempre acreditar em meu potencial e me impulsionar para novas conquistas.

Ao meu cunhado Jomar Lira, por toda amizade e parceria, me ajudando sempre a conquistar meus objetivos.

A minha sobrinha Lívia, que chegou para dar um gás na reta final, deixando a vida ainda melhor, trazendo mais amor, leveza, risos, cuidado, dedicação e fazendo me tornar uma pessoa cada dia melhor.

Agradeço a todos os familiares pelo carinho, bons momentos e sorrisos juntos.

Agradeço a todos os amigos que fiz dentro da universidade pelo companheirismo e momentos de distração ao longo dos anos e a cada um que agregou na minha vida pessoal e acadêmica.

Aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Química Ambiental de Solos, do qual fiz parte por quatro anos, pelo aprendizado diário e pelos diversos momentos de descontração. Vocês fizeram esta caminhada ser mais leve.

A minha orientadora Prof^a Dra. Caroline Miranda Biondi, por toda paciência, apoio e incentivo em todos os anos e acima de tudo, por todos os ensinamentos.

Ao meu coorientador e amigo William Ramos da Silva, que me ajudou no momento crucial da minha vida, trazendo para si a responsabilidade de conduzir todo meu projeto. Sua experiência foi crucial no nascer, desenvolver e finalização deste trabalho. Agradeço também pelo companheirismo nos momentos de felicidades, brincadeiras, tristezas e seriedade. Sua amizade tornou os dias no laboratório mais divertidos. Obrigado por todos os ensinamentos passados durante esses anos de vivência.

Por fim, aos não citados aqui, mas que contribuíram, direta ou indiretamente, com a minha formação. O meu eterno muito obrigado!

RESUMO

A disposição inadequada de escórias de siderurgia com elevados teores de metais pesados, como chumbo (Pb) e cádmio (Cd), na cidade de Santo Amaro, Bahia, ocasionou a poluição do ambiente e das pessoas que nela reside. Hoje a cidade é conhecida por conter a maior contaminação de Pb no mundo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do lodo de esgoto e seu biochar em remediar os teores de Cd, Pb e Zn e o desenvolvimento inicial de mudas de eucalipto no solo contaminado do município de Santo Amaro. Estes estudos visam contribuir para a determinação de métodos de remediação e sugestão de atividades econômicas alternativas para estas áreas impactadas. Para isto, foi realizado experimento em casa de vegetação com a utilização de um híbrido de eucalipto e aplicação de três tratamentos ao solo: lodo de esgoto (40 t ha^{-1}) e biochar (40 t ha^{-1}) e mistura de 20 t ha^{-1} de lodo de esgoto + 20 t ha^{-1} de biochar, além do controle negativo (solo sem adição de lodo/biochar). Após o período de cultivo, foram avaliados os teores disponíveis e ambientalmente disponíveis de Cd, Pb e Zn no solo e teores totais nas plantas. A aplicação do biochar promoveu melhor desenvolvimento das mudas de eucalipto, apresentando melhores resultados na produção de matéria seca da parte aérea, altura e diâmetro. O biochar + lodo de esgoto reduziu consideravelmente (60%) a disponibilidade de Zn no solo, em comparação ao controle. O uso de biochar no solo foi eficiente na redução dos teores ambientalmente disponíveis dos metais pesados, imobilizando-os e deixando-os menos disponíveis para planta. As mudas de eucalipto foram mais eficientes em translocar Zn para parte aérea no tratamento lodo de esgoto, apresentando melhor índice, enquanto para o Cd e Pb as mudas foram mais eficientes em imobilizar os metais nas raízes, com destaque para o Pb, que apresentou maior valor. Os resultados mostraram que o biochar pode ser indicado como agente remediador no solo contaminado de Santo Amaro, uma vez que promoveu diminuição na mobilidade e disponibilidade de metais no solo. O lodo de esgoto pode ser indicado como aporte nutricional no cultivo das mudas e as mudas de eucalipto se apresentaram como potenciais plantas fitorremediadoras do solo contaminado.

Palavras-chave: remediação, metais pesados, Santo Amaro, contaminação

ABSTRACT

The inadequate disposal of steel slag with high levels of heavy metals, such as lead (Pb) and cadmium (Cd), in the city of Santo Amaro, Bahia, caused the pollution of the environment and the people who live there. Today the city is known to contain the largest Pb contamination in the world. The objective of this work was to evaluate the effects of sewage sludge and its biochar in remediating the levels of Cd, Pb and Zn and the initial development of eucalyptus seedlings in the contaminated soil of the municipality of Santo Amaro. These studies aim to contribute to the determination of remediation methods and suggestion of alternative economic activities for these impacted areas. For this, an experiment was carried out in a greenhouse using a eucalyptus hybrid and application of three treatments to the soil: sewage sludge (40 t ha⁻¹) and biochar (40 t ha⁻¹) and a mixture of 20 t ha⁻¹ of sewage sludge + 20 t ha⁻¹ of biochar, in addition to the negative control (soil without addition of sludge/biochar). After the cultivation period, the available and environmentally available levels of Cd, Pb and Zn in the soil and total levels in the plants were evaluated. The application of biochar promoted better development of eucalyptus seedlings, presenting better results in the production of dry matter of the aerial part, height and diameter. Biochar + sewage sludge considerably reduced (60%) the availability of Zn in the soil, compared to the control. The use of biochar in the soil was efficient in reducing the environmentally available levels of heavy metals, immobilizing them and making them less available to the plant. Eucalyptus seedlings were more efficient in translocating Zn to the shoot in the sewage sludge treatment, showing a better index, while for Cd and Pb the seedlings were more efficient in immobilizing metals in the roots, especially Pb, which showed higher value. The results showed that biochar can be indicated as a remediation agent in the contaminated soil of Santo Amaro, since it promoted a decrease in the mobility and availability of metals in the soil. The sewage sludge can be indicated as a nutritional contribution in the cultivation of seedlings and the eucalyptus seedlings were presented as potential phytoremediation plants of the contaminated soil.

Keywords: remediation, heavy metals, Santo Amaro, contamination

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo adaptado de forno para produção de biochar (A); Forno produzido utilizado para montagem do experimento (B).	17
Figura 2. Montagem do experimento em casa de vegetação.	19
Figura 3. Matéria seca de raiz (A) e parte aérea (B) de eucalipto em solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar.	21
Figura 4. Mudanças de eucalipto no primeiro mês do experimento.	22
Figura 5. Mudanças de eucalipto no fim do experimento.	22
Figura 6. Altura (A) e Diâmetro do coleto (B) do híbrido de eucalipto em solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar. ..	22
Figura 7. Teores disponíveis de Cádmio (A), Chumbo (B) e Zinco (C) disponível em solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar.	23
Figura 8. Teores ambientalmente disponíveis de Cádmio (A), Chumbo (B) e Zinco (C) disponível no solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar.	255
Figura 9. Teores de Cádmio, Chumbo e Zinco na parte aérea (A, B e C) e raízes (D, E e F) da muda de eucalipto em solo contaminado com metais pesados do município de Santo Amaro e tratado com, lodo de esgoto e biochar.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características química e física do solo utilizado no experimento e valores orientadores de qualidade para metais pesados no solo.	16
Tabela 2. Características química do lodo de esgoto utilizado no experimento e valores orientadores de qualidade para metais pesados no solo.	17

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Coleta e caracterização do solo	15
3.2. Obtenção e caracterização química do lodo de esgoto e do biochar de lodo de esgoto.....	16
3.3. Execução do experimento em casa de vegetação	18
3.4. Análise de plantas	19
3.5. Cd, Pb e Zn disponível	19
3.6. Teores ambientalmente disponíveis de Cd, Pb e Zn.....	20
3.7. Determinação de Cd, Pb e Zn	20
4. ANÁLISE DE DADOS	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
5.1. Matéria seca da planta (raiz e parte aérea)	20
5.2. Altura e Diâmetro	21
5.3. Cd, Pb e Zn disponível	23
5.4. Teores ambientalmente disponíveis de Cd, Pb e Zn.....	24
5.5. Fitorremediação de metais pesados por Eucalipto	25
6. CONCLUSÕES	27
7. REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

O problema da contaminação do solo e das águas subterrâneas é atual, evidente e incontestável e tem sido objeto de investigação nas três últimas décadas em diversos países industrializados (Ferreira, Lofrano, & Morita, 2020).

Dentre os diversos contaminantes do solo, os metais pesados têm se tornado motivo de grande preocupação em todo o mundo por serem cofatores de inúmeros efeitos adversos à saúde humana e por apresentar associação à perda de biodiversidade e sustentabilidade dos diversos ecossistemas naturais (Silva, 2015). Embora os metais sejam encontrados naturalmente, as atividades antropogênicas, especialmente as de natureza industrial, podem alterar sua forma e acelerar a disponibilidade dos metais no ambiente (Campos et al., 2021).

Existem diferentes fontes de origem antrópica que contribuem para a liberação desses elementos nos solos, dentre elas, as atividades industriais, em especial o setor metalúrgico que produz altas quantidades de resíduos sólidos ricos em metais pesados, principalmente, chumbo (Pb), cádmio (Cd) e zinco (Zn), que intensificam a degradação do solo, desencadeando um progressivo grau de contaminação aos demais componentes do meio ambiente. A contaminação torna-se mais ampla quando, no decorrer da exploração mineral, pilhas de rejeito são expostas à ação do vento e da água da chuva (Andrade et al. 2009; Nascimento et al. 2020).

Estudos mostram que em áreas sob influência da deposição de resíduos de mineração tem elevado teores de metais pesados no solo e como consequência tem aumentado o índice de problemas da saúde humana (Carvalho et al., 2003; Lu et al., 2015; Hadzi et al., 2018; Covre et al., 2021). Park et al., 2020 relatam que metais como Pb, Cd e Zn são considerados potenciais agentes cancerígenos e de diversas doenças para os seres humanos.

No Brasil, a Resolução nº 420/2009 estabelecida pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto a presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias tóxicas, em decorrência de atividades antrópicas (agrícola, residencial e industrial) de acordo com o uso do solo e exposição relacionada (BRASIL, 2009).

Dentro desse contexto de contaminação por metais pesados, destaca-se o município de Santo Amaro, no estado da Bahia. Considerada uma das cidades mais tradicionais da região, tanto por sua beleza, como por seu destaque no cultivo de cana-de-açúcar e sua forte economia do século XX. Possui uma área de aproximadamente 495 km² e uma população estimada em 60.000 habitantes (IBGE, 2020) e localiza-se à 73 km de Salvador.

Por muito tempo o município de Santo Amaro teve sua economia voltada para o cultivo de cana-de-açúcar, mas em meados de 1960 a cultura deixa de impulsionar a economia da região, dando lugar a uma nova atividade, a mineração, desempenhada pela Companhia Brasileira de Chumbo (COBRAC), a qual gerou na época centenas de empregos (Cetem, 2012).

A COBRAC, ex subsidiária da empresa Penarroya Oxide S.A, iniciou suas atividades em 1956, explorando e processando o minério de Pb para produção de lingotes de chumbo, e durante 30 anos foi uma das maiores produtoras do metal no mundo. A metalúrgica utilizava o minério de chumbo lavrado e beneficiado no município de Boquira, na Chapada Diamantina – BA e transportado para Santo Amaro (Cetem, 2012). O processamento industrial resultou na produção de uma escória que continha 4% de PbO, 9% de ZnO, além de Sb, As, Cd e outros metais em menores quantidades (SILVA et al., 2017). Estima-se que existam aproximadamente 180.000 m³ de escória depositada na área da fábrica e 55.000 m³ espalhadas na área urbana (Rabelo, 2010; Silva et al., 2017). As atividades da mineradora foram encerradas em 1993 e as instalações abandonadas, deixando como passivo ambiental 490 mil toneladas de escórias contaminadas, causando danos a população, solo e estuários (Brasil, 2003).

Parte da escória foi utilizada em obras públicas e privadas para pavimentação de ruas e quintais de casas, além disso, efluentes líquidos do processo metalúrgico foram lançados diretamente no rio Subaé, causando danos a animais e a população (Cetem, 2012). Isso levou o município a se tornar o mais contaminado por Pb no mundo (Ecodebate, 2013). Estudos recentes têm demonstrado que, mesmo após três décadas de inatividade industrial, os solos adjacentes à indústria encontram-se poluídos por Pb e possuem teores de Cd e Zn que representam risco a saúde humana (SANTOS et al., 2015).

A exposição da população foi constatada em 1980, em especial crianças morando num raio de 900m da empresa COBRAC, por meio de exame clínico, na qual foram

encontrados valores de Pb e Cd que situavam entre os mais altos do mundo (Sesab, 2021). Mesmo após a fábrica ter encerrado suas atividades, o passivo ambiental permanece como uma fonte de exposição relevante para intoxicação pelo Pb, o que acarreta ainda sérios problemas de saúde na população (Cetem, 2012)

Devido ao grande potencial de contaminação gerado pelos resíduos liberados pela COBRAC, diversos estudos visando avaliar a contaminação da população, de solos e de recursos hídricos nas imediações da fábrica vêm sendo desenvolvidos, além de estudos visando alternativas para remediação das áreas contaminadas, com uso de planta e compostos como lodo de esgoto e seu biochar (Antunes et al., 2014; Silva, 2015; Souza, 2021).

Para a remediação de solos contaminados por metais pesados, diversas técnicas têm sido propostas, alguns desses procedimentos são: remoção da camada contaminada, com posterior adição de uma cobertura de solo isento de contaminantes; lixiviação dos metais com ácidos ou quelatos; estabilização dos metais com aplicação de corretivos capazes de elevar o pH e adição de materiais orgânicos. No entanto, essas tecnologias são muito variáveis, conforme a matriz contaminada, a natureza do contaminante, o nível de contaminação e a disponibilidade de recursos (Maciel et al., 2021).

Deste modo, a fitorremediação, que utiliza plantas para remover, imobilizar ou tornar inofensivos ao ecossistema os contaminantes do solo, visando o tratamento *in situ*, está entre as principais metodologias atualmente disponíveis para a remediação de solos contaminados. Essa técnica tem se destacado como um método promissor, de custo razoável, ambientalmente seguro e de maior aceitação pela população, além de promover a manutenção e melhoria da estrutura física, da fertilidade e da biodiversidade do solo, além da fácil monitorização das plantas (Silva, 2015; Silva et al., 2019; Maciel et al., 2021).

Existem vários tipos de fitorremediação, dentre eles os principais são a fitoextração, que consiste no uso de plantas capazes de remover os metais do solo e acumular nos tecidos vegetais da parte aérea; fitotransformação, onde o contaminante sofre bioconversão no interior das plantas ou em sua superfície, passando a formas menos inócuas; fitoestimulação, que é a estimulação da atividade dos microorganismos que promovem a degradação das substâncias contaminantes localizadas na rizosfera da planta

e a fitoestabilização, caracterizada pela imobilização dos contaminantes presentes no solo, ou seja, a planta é usada para limitar a mobilidade e a biodisponibilidade dos metais no solo (Coêlho et al., 2016; Souza, 2021).

Devido às características de crescimento rápido, alta produção de biomassa, sistema radicular bastante desenvolvido e facilidade de adaptação a condições estressantes, o eucalipto apresenta-se com grande potencial para emprego em programas de recuperação de áreas degradadas pela deposição de metais pesados no solo, além de representar um baixo risco de entrar nas cadeias alimentares (Magalhães, 2008; Rasafi et al., 2021).

Alguns estudos já haviam evidenciado alta bioacumulação de metais como Cd, Cu, Pb, Ni, Zn e Cr em tecidos das espécies de eucaliptos (Rasafi et al., 2021). Salmany et al. (2021) verificaram que mudas de eucalipto apresentaram boa capacidade de acumular e concentrar Cd na parte aérea e boa capacidade de acumular Pb em suas raízes. Nenman *et al.* (2012) verificaram que o Pb, Zn e Cr se acumularam predominantemente nas folhas de espécie de eucalipto (*E. camaldulensis*), enquanto o Cu, Ni e Sn ocorrem preferencialmente nos caules, comprovando a eficiência desta espécie na fitorremediação em áreas contaminadas por metais.

Outra técnica utilizada para remediação de solos contaminados é a utilização de compostos ou sua transformação em biocarvão ou biochar, caso que acontece com o lodo de esgoto.

O lodo de esgoto é um resíduo sólido ou semi-sólido obtido como sub-produto do tratamento de esgoto e águas residuais, cuja composição é rica em matéria orgânica e nutrientes, o que desperta interesse acerca do seu uso devido ao aporte de nutrientes e como condicionador do solo (Mandu, 2020).

No Brasil, grande parte da população ainda não é atendida por serviços de saneamento básico, o que intensifica a contaminação de corpos d'água e solos. Do total de esgoto gerado no Brasil, apenas 49,1 % recebem algum tipo de tratamento (SNIS, 2019). Por este motivo, investimentos cada vez mais frequentes vem sendo utilizados pelos governos para implementação e manutenção de estações de tratamento de esgoto (ETE) no país (Junio et al., 2013).

O tratamento do esgoto tem como objetivo reduzir as concentrações de materiais orgânicos facilmente decomponíveis, minimizando os impactos ambientais causados pela sua liberação no ambiente. Contudo, um entrave encontrado tem sido a destinação adequada do lodo, um resíduo insolúvel remanescente do processo de tratamento do esgoto (Bai et al., 2017).

Algumas alternativas de uso que tem sido dado ao lodo de esgoto é o seu aproveitamento na agricultura que, além da contribuição para a nutrição das culturas, o lodo de esgoto funciona como condicionante de propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Outra alternativa é a utilização do lodo de esgoto em forma de biocarvão ou biochar que também apresenta grande potencial para ser usado na remediação de contaminantes no solo (Bai et al., 2017; Liu et al., 2017; Almeida, 2018; Nogueira et al., 2013).

O biochar ou biocarvão é um material sólido obtido através da conversão termoquímica ou pirólise, em temperaturas que variam de 300°C a 800°C, de diversas biomassas em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio (International Biochar Initiative, 2012; Souza, 2015; Almeida, 2018). É caracterizado por grande área de superfície específica, alta capacidade de troca catiônica, grupos funcionais ricos e estabilidade biológica, que pode reduzir efetivamente a migração e a biodisponibilidade de metais pesados em solo. Também pode fornecer condições benéficas para o crescimento das plantas e atividade microbiana do solo, que podem acelerar a restauração dos ecossistemas (Gao et al., 2022).

Em razão de sua elevada aromaticidade e elevada área superficial, o biochar é considerado como um sorvente eficaz, para poluentes orgânicos e inorgânicos, podendo permanecer no solo e imobilizar contaminantes, durante um longo período de tempo, prolongando a proteção de plantas e microrganismos contra a toxicidade (Almeida, 2018).

Alguns estudos evidenciaram a eficiência do biochar na remediação de solos contaminados. Álvarez-Rogel et al. (2018) ao avaliarem biochar de lodo de esgoto e biochar de poda de árvore, encontraram eficiência na imobilização de metal, reduzindo a absorção pela planta. Xu et al. (2014) encontraram uma diminuição na biodisponibilidade de Cd, Pb e Zn em escórias de minas tratadas com biochar ao analisar a adsorção dos metais em biochar de plantas e estrume. Comprovando a eficiência desse método.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos do lodo de esgoto e seu biochar em remediar os teores de Cd, Pb e Zn no solo e o desenvolvimento inicial de mudas de eucalipto em solo contaminado do município de Santo Amaro – BA.

2.2 Objetivos Específicos:

- Avaliar o efeito do lodo de esgoto e biochar de lodo de esgoto na qualidade e desenvolvimento inicial das mudas;
- Avaliar a disponibilidade de Cd, Pb e Zn em solos poluídos sob a aplicação de biochar de lodo de esgoto;
- Analisar o potencial de fitorremediação do cultivo de eucalipto no solo poluído com escória metalúrgica;

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Coleta e caracterização do solo

O solo utilizado no experimento foi proveniente da área de descarte de resíduo da antiga fábrica COBRAC, localizada no município de Santo Amaro - BA, na camada de 0,0 – 0,2m de profundidade. O solo foi homogeneizado, seco ao ar e peneirado em peneira de 4,0 mm.

Amostras em triplicata desse solo foram coletadas, destorroadas em peneiradas em peneira de abertura de 2 mm para caracterização química e física do solo. O pH determinado em água na relação solo:solução (1:2,5); K^+ , Na^+ extraídos com a solução de Mehlich⁻¹ e dosados por meio de fotometria de emissão de chama; Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis dosados pelo método volumétrico por titulação com EDTA, após a extração desses cátions pela solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L⁻¹; Al^{3+} trocável determinado pelo método volumétrico por titulação com hidróxido de sódio, após a extração com cloreto de potássio (KCl) 1 mol L⁻¹; H^+ + Al^{3+} por titulação alcalimétrica do extrato após a extração com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹; P disponível foi extraído com solução de Mehlich⁻¹ e determinado por colorimetria; O carbono orgânico (C.O.) foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado (Silva et al., 1999). Determinação das características físicas de granulometria pelo método do densímetro (Almeida, 2008).

Os teores disponíveis de Cd, Pb e Zn no solo foram extraídos por meio da solução de $CaCl_2$ 0,01 mmol⁻¹, agitadas por 24 horas em tubos de centrífuga com capacidade de 50 mL. Em seguida a amostra foi centrifugada por 20 minutos a 4000 rpm e o sobrenadante filtrado (Yin et al., 2016). A determinação foi feita em ICP-OES.

Os teores ambientalmente disponíveis foram obtidos pelo método 3051A (USEPA, 2007). Utilizou-se 0,500 g de solo macerado em almofariz de ágata e passado em peneira de aço inox de 0,3 mm de abertura. O solo foi colocado em tubos de teflon e adicionou-se 9 mL de HNO_3 + 3 mL de HCl . As amostras foram digeridas em forno micro-ondas (Mars Xpress), por 18 minutos até atingir a temperatura de 175° C, mantendo essa temperatura por 4 minutos e 30 segundos. As amostras digeridas foram vertidas para balões volumétricos de 25 ml e tiveram o volume completado com água ultrapura e os extratos filtrados em papel de filtragem lenta (Macherey Nagel®).

Tabela 1. Características química e física do solo utilizado no experimento e valores orientadores de qualidade para metais pesados no solo.

Variáveis	Unidades	Resultados
pH		7,2
Ca ²⁺	cmolc dm ⁻³	27,0
Mg ²⁺	cmolc dm ⁻³	6,7
K ⁺	cmolc dm ⁻³	0,4
Al ³⁺	cmolc dm ⁻³	0,0
H + Al	cmolc dm ⁻³	2,8
CTC	cmolc dm ⁻³	37,5
P-disp	mg kg ⁻¹	43,9
COS	g kg ⁻¹	20,3
MOS	g kg ⁻¹	35,0
Areia	g kg ⁻¹	90,5
Silte	g kg ⁻¹	318,5
Argila	g kg ⁻¹	591,0
Cd (CaCl ₂)	mg kg ⁻¹	19,2
Pb (CaCl ₂)	mg kg ⁻¹	855,6
Zn (CaCl ₂)	mg kg ⁻¹	65,1
Cd (3051A)	mg kg ⁻¹	19,3
Pb (3051A)	mg kg ⁻¹	1392,8
Zn (3051A)	mg kg ⁻¹	366,3
Cd (V. I.)	mg kg ⁻¹	20,0
Pb (V.I.)	mg kg ⁻¹	900,0
Zn (V. I.)	mg kg ⁻¹	2000,0

SB soma de bases; *CTC* capacidade de troca de cátions; *Pdisp* fósforo disponível do solo; *COS* carbono orgânico de solo; *MOS* matéria orgânica do solo; *Cd*, *Pb*, *Zn(CaCl₂)* teores disponíveis dos metais pesados no solo extraído com solução de CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹) (Yin et al., 2016); *Cd*, *Pb*, *Zn(3051A)* teores ambientalmente disponíveis dos metais no solo extraídos de acordo com o protocolo 3051A da Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (US EPA 2007); *Cd*, *Pb*, *Zn(VI)* valores de investigação para cenário agrícola, preconizados pela Resolução nº 420/2009 do CONAMA (CONAMA 2009).

3.2. Obtenção e caracterização química do lodo de esgoto e do biochar de lodo de esgoto

O lodo aeróbico utilizado foi obtido da empresa Lógica Ambiental, que coleta efluentes industriais e sanitário oriundo da região metropolitana do Recife. Esses efluentes são tratados física, química e biologicamente, gerando como resíduo o lodo de esgoto. Para aplicação do lodo de esgoto, foi realizado um pré-tratamento com cal (CaO), visando reduzir a presença de patógenos no material (CONAMA, 2006).

A produção do biochar de lodo de esgoto foi realizada por meio da combustão incompleta pelo processo chamado de pirólise lenta, em forno artesanal composto por dois cilindros, concêntricos (figura 1). O forno foi confeccionado com base em um forno utilizado por Silva, 2016. A pirólise foi realizada a 400 °C por 1 h.

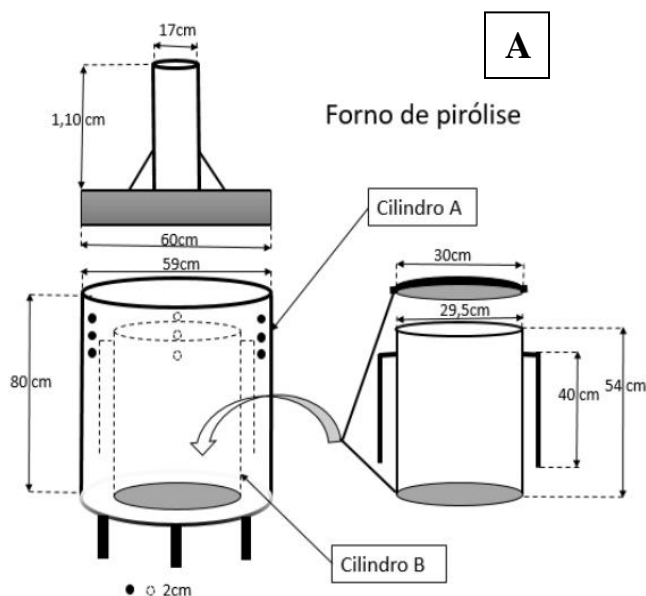


Figura 1. Modelo adaptado de forno para produção de biochar (A); Forno produzido utilizado para montagem do experimento (B).

Após a produção, o biochar foi caracterizado segundo recomendação do CONAMA (2006), resolução N° 375. (Tabela 2). Amostras do lodo foram moídas e digeridas para determinação do carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl, pH em água (1:10), potássio total e sódio total. Para determinação dos teores de metais pesados, as amostras de lodo foram secas ao ar, destorroadas, pulverizadas em almofariz de ágata, homogêneas e peneiradas em peneira de abertura de 0,3 mm (ABNT 50), de aço inoxidável para evitar contaminações. Os teores de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn no lodo foram digeridos utilizando o método 3051A (USEPA, 1998), conforme descrito para as amostras de solo. Os teores totais de N foram obtidos por titulometria, K por fotometria de chama, P por fotocolorimetria, os metais + Ca e Mg, por espectrometria de emissão ótica (ICP – OES Perkin Elmer 7000 DV).

Tabela 2. Características química do lodo de esgoto utilizado no experimento e valores orientadores de qualidade para metais pesados no solo.

Variáveis	Unidades	Resultados
pH	água (1:2,5)	7,94
P	g kg ⁻¹	4,11
K	g kg ⁻¹	4,88
Na	g kg ⁻¹	1,65
N	g kg ⁻¹	6,14
COT	g kg ⁻¹	421,64

As	mg kg ⁻¹	1,97
Ba	mg kg ⁻¹	322,52
Cd	mg kg ⁻¹	0,0
Cr	mg kg ⁻¹	96,92
Cu	mg kg ⁻¹	39,1
Fe	g kg ⁻¹	15,83
Mn	mg kg ⁻¹	730,45
Ni	mg kg ⁻¹	87,2
Pb	mg kg ⁻¹	27,43
Zn	mg kg ⁻¹	139,3
As (V. I.)	mg kg ⁻¹	41,0
Ba (V.I.)	mg kg ⁻¹	1300,0
Cd (V. I.)	mg kg ⁻¹	39,0
Cr (V.I.)	mg kg ⁻¹	1000,0
Cu (V. I.)	mg kg ⁻¹	1500,0
Fe (V.I.)	mg kg ⁻¹	-
Mn (V. I.)	mg kg ⁻¹	-
Ni (V.I.)	mg kg ⁻¹	420,0
Pb (V.I.)	mg kg ⁻¹	300,0
Zn (V. I.)	mg kg ⁻¹	2800,0

COT carbono orgânico total; As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn(VI) valores de investigação para cenário agrícola, preconizados pela Resolução nº 420/2009 do CONAMA (CONAMA 2009).

3.3. Execução do experimento em casa de vegetação

Cada parcela experimental consistiu de vasos contendo 5 kg de solo. Para produção das mudas, foram utilizadas sementes de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, postos para germinar em tubetes, preenchidos com substrato (vermiculita e areia) e, 25 dias após a emergência foram transplantadas para os vasos. No momento do transplântio foi montado o experimento composto de 3 tratamentos (Lodo; Biochar; lodo + biochar), além do controle negativo (solo sem adição de lodo e/ou biochar) com cinco repetições cada, e sendo incorporadas ao solo doses de 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto compostado, do biochar e do lodo de esgoto + biochar, na proporção de 1:1, respectivamente. As doses utilizadas foram baseadas em estudos anteriores (Gonzaga et al., 2018; Silva, 2020). O experimento foi montado dispondo os tratamentos em delineamento inteiramente casualizado. Os vasos foram irrigados diariamente mantendo-se a capacidade de pote em 80%, mediante pesagem e reposição da água perdida por evapotranspiração.

Aos 90 dias após o transplântio, foi realizada a avaliação do desenvolvimento das mudas de eucalipto pelas medições de diâmetro do colmo e altura da planta, seguida da coleta do experimento. Foram coletadas as plantas de eucalipto fracionando as plantas em

parte aérea e raiz. Na ocasião também foram coletadas amostras de solo de todos os tratamentos para determinação dos teores de Cd, Pb e Zn.



Figura 2. Montagem do experimento em casa de vegetação.

3.4. Análise de plantas

As plantas (parte aérea e raiz) foram lavadas em água destilada e postas para secar em estufa a 65 °C, até peso constante, para obtenção da matéria seca. Em seguida, as amostras vegetais foram moídas em moinho do tipo Willey para digestão e determinação dos metais. Amostras de 0,0500 foram digeridas em solução de HCl 1 mol L⁻¹ a temperatura de 80°C por 15 minutos. Posteriormente, as amostras foram filtradas e dosadas por espectrometria de emissão ótica (ICP ± OES Perkin Elmer 7000 DV) e determinados os teores de Cd, Pb e Zn.

3.5. Cd, Pb e Zn disponível

A extração dos teores disponíveis dos metais foi realizada em solução de CaCl₂ 0,01 mmol⁻¹. A extração ocorreu com a agitação de 4,0 g de solo (TFSA) com 40 mL da solução extratora por 24h, posteriormente centrifugado por 20 minutos a 4000 rpm, o sobrenadante filtrado em papel de filtro quantitativo e armazenado a 4°C para posterior análise (Yin et al., 2016).

3.6. Teores ambientalmente disponíveis de Cd, Pb e Zn

Este método de digestão foi baseado no protocolo 3051A (USEPA, 2007). Foi utilizado 0,500 g de solo previamente macerado em almofariz de ágata e passado em peneira de 0,3 mm e digerido com 9 mL de HNO₃ + 3 mL de HCl em forno micro-ondas a 175° C por 4' 3". Posteriormente, os extratos foram filtrados em papel filtro de faixa azul e o volume foi aferido para 25 mL em balões volumétricos certificados com água ultrapura.

3.7. Determinação de Cd, Pb e Zn

Os teores totais de Cd, Pb e Zn disponíveis e ambientalmente disponíveis no solo e totais na parte aérea e raiz de eucalipto foram dosados por espectrometria de emissão ótica (ICP ± OES Perkin Elmer 7000 DV). Foram utilizadas amostras certificadas de Montana soil (Moderately elevated trace element concentrations) SRM 2711, do National Institute of Standards and Technology (NIST) para controle de qualidade de Cd, Pb e Zn, e amostra do padrão 1570A Trace Elements in Spinach Leaves (National Institute of Standards and Technology) para o controle de qualidade das análises destes metais em planta.

4. ANÁLISE DE DADOS

A normalidade do conjunto dos dados foi avaliada por meio do teste Shapiro ± Wilk ($p < 0,05$). Os valores de média e desvio-padrão foram calculados para todas as variáveis analisadas. Os valores médios dos teores ambientalmente disponíveis e disponíveis no solo e totais na planta de Cd, Pb e Zn foram comparados pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram feitas utilizando o software Statistica (versão 10.0).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Matéria seca da planta (raiz e parte aérea)

A produção de matéria seca radicular das plantas não foi influenciada pelos tratamentos. No entanto, a matéria seca da parte aérea aumentou 41%, 30% e 8% com a aplicação de biochar, biochar _ lodo de esgoto e lodo de esgoto, respectivamente, quando comparado com o tratamento controle. O melhor resultado mostrado pelo biochar deve estar associado as alterações químicas que produz no solo, como maior capacidade de adsorção de metais pesados, tornando-os menos disponíveis para a planta e deixando o ambiente mais propício para absorção de nutrientes. Estudos anteriores encontraram

aumento da matéria seca da parte aérea quando aplicado doses de biochar de lodo de esgoto, comprovando a eficácia do biochar no desenvolvimento (Gonzaga et al., 2018).

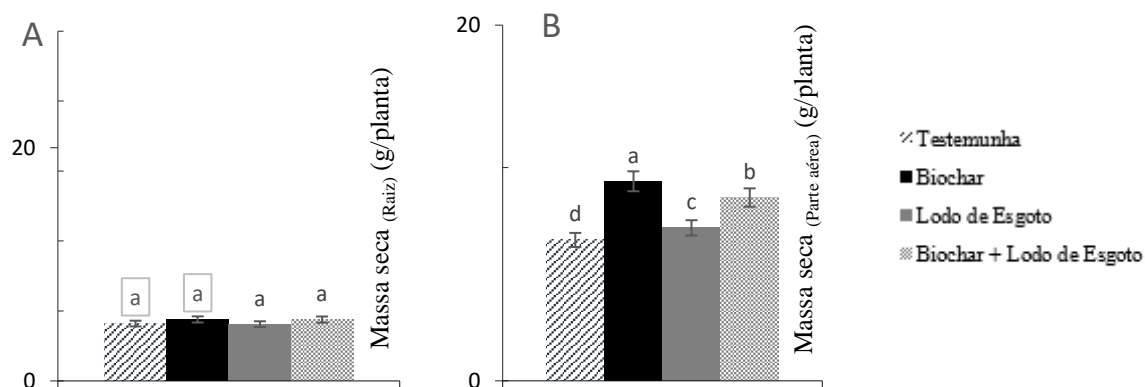


Figura 3. Matéria seca de raiz (A) e parte aérea (B) de eucalipto em solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar.

5.2. Altura e Diâmetro

Para as variáveis altura e diâmetro do caule das plantas houve efeito dos tratamentos. A altura das plantas foi maior no tratamento biochar + lodo de esgoto seguido dos tratamentos com biochar e controle, que não diferenciaram estatisticamente, enquanto o menor índice de altura ocorreu no tratamento com lodo de esgoto. Já para variável diâmetro, o melhor desempenho ocorreu no tratamento com biochar, tendo um aumento de 14% em comparação com o tratamento controle. Nos tratamentos com lodo de esgoto e biochar + lodo de esgoto não houve diferença. Resultados parecidos são encontrados por Silva et al (2018) e Petter et al. (2012) que verificaram maiores alturas e diâmetros em espécies de eucaliptos quando aplicados em diferentes doses de biochar.



Figura 4. Mudanças de eucalipto no primeiro mês do experimento.



Figura 5. Mudanças de eucalipto no fim do experimento.

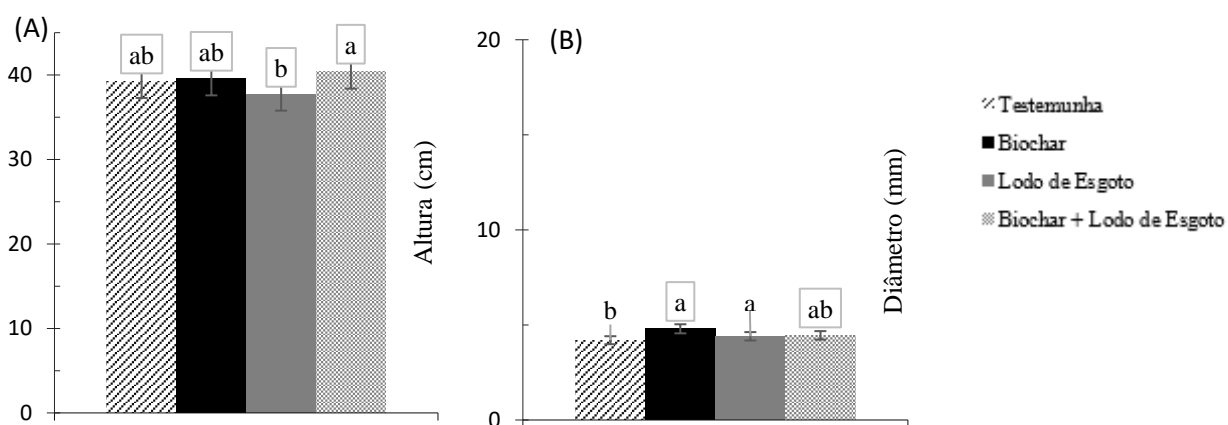


Figura 6. Altura (A) e Diâmetro do coleto (B) do híbrido de eucalipto em solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar.

5.3. Cd Pb e Zn disponível

Não houve diferença entre os teores de Cd e Pb disponível no solo nos tratamentos avaliados, no entanto, a disponibilidade de Zn foi decrescente com a aplicação dos tratamentos. A maior redução na disponibilidade do Zn foi no tratamento biochar + lodo de esgoto com cerca de 60% em relação ao controle. Os tratamentos biochar e o tratamento lodo de esgoto apresentaram uma redução de 27% e 47% respectivamente, em relação ao controle. O efeito sinérgico está associado a afinidade muito grande entre a matéria orgânica e os cátions. A matéria orgânica oferece sítios para a troca de cátions e tem papel importante na adsorção de Zn (Camargo, 2019).

A aplicação de biochar em conjunto com o lodo de esgoto interfere na redução da disponibilidade do metal. Isso pode ocorrer pelo aumento da adsorção dos metais pela matéria orgânica ou aumento na formação de complexos estáveis entre material orgânico e os metais. Este resultado pode decorrer do aumento no volume dos poros e da área superficial específica das partículas de biochar resultante da pirólise do lodo de esgoto (Cheng et al. 2018; Chagas, 2018). Outro aspecto importante é que os componentes minerais do biochar podem trocar ou precipitar com metais pesados reduzindo a disponibilidade desses metais (Li et al., 2017). Estudos anteriores feitos por Bashir et al. (2018) e Corrêa et al. (2008) encontraram resultados semelhantes, onde tratamento com biochar e lodo de esgoto reduziram a disponibilidade de metais pesados, sugerindo interações destes com os grupos funcionais do biochar e lodo de esgoto.

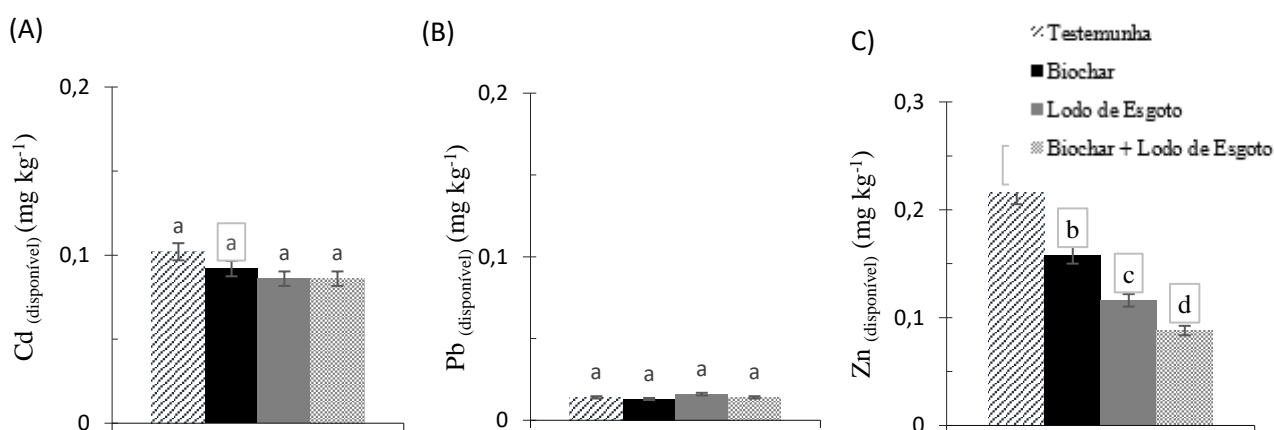


Figura 7. Teores disponíveis de Cádmi (A), Chumbo (B) e Zinco (C) disponível em solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar.

5.4. Teores Ambientalmente disponíveis de Cd, Pb e Zn

A adição de biochar no solo resultou na diminuição da biodisponibilidade dos metais (figura 8). O comportamento dos metais pesados Cd, Pb e Zn foi muito semelhante, ambos apresentaram acréscimo de aproximadamente 5% dos teores ambientalmente disponíveis no solo, quando comparados com o tratamento controle.

Isso pode ter ocorrido porque a pirólise na geração de biochar gera maior área superficial e porosidade dos materiais, facilitando a adsorção de metais pesados (Kim et al., 2014).

Os grupos funcionais criados na superfície também desempenham um papel importante na imobilização de metais pesados. Essa interação dos grupos funcionais na superfície do biochar com os metais pesados refere-se a complexação, que pode formar complexos que imobilizam os metais pesados. Esses grupos funcionais atuam como doadores de elétrons para se ligarem aos metais pesados, alcançando assim a complexação (Zhu et al., 2020). Outro fator também é que o biochar pode reagir com metais pesados no solo para reduzir sua mobilidade e biodisponibilidade por reações de fisissorção, quimissorção e precipitação, que reduz a absorção de metais pelas plantas e torna os metais menos acessíveis ao ambiente (Alvarez-Rogel et al., 2018). Penido et al. (2019) sugeriram que os metais pesados podem sofrer reações de adsorção com grupos funcionais do biochar, pois ao ser adicionado ao solo, grupos hidróxidos e carbonatos alcalinos são liberados pelo biochar em contato com a água no solo, elevando o pH, tornando o solo mais alcalino e gerando reações de adsorção. O aumento do pH no solo pela adição do biochar também pode formar precipitados com carbonato e fosfato.

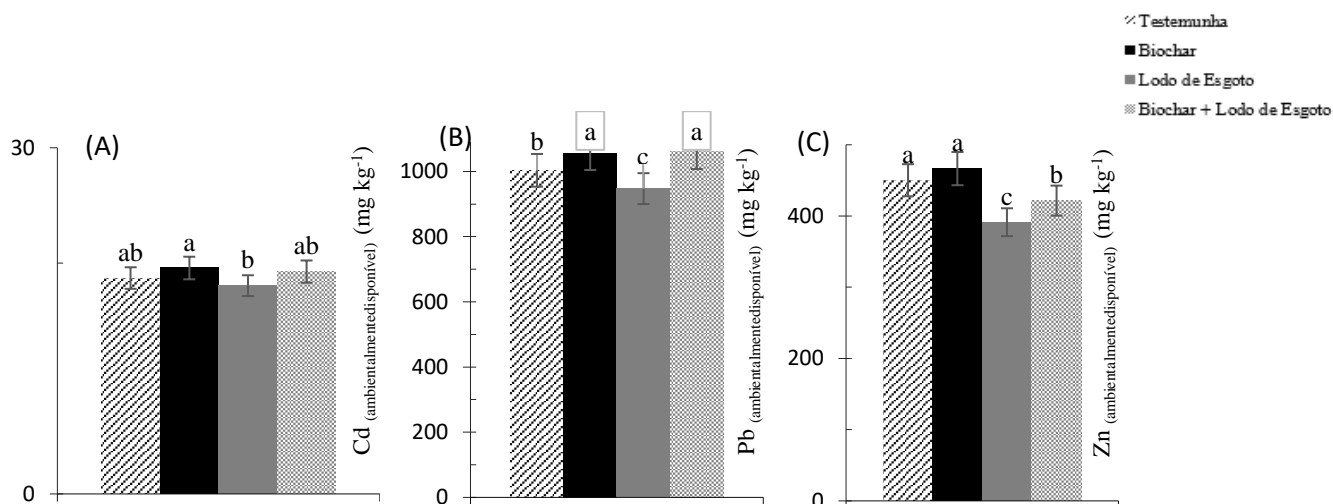


Figura 8. Teores ambientalmente disponíveis de Cádmio (A), Chumbo (B) e Zinco (C) disponível no solo contaminado do município de Santo Amaro e tratado com lodo de esgoto e biochar.

5.5. Fitorremediação de metais por Eucalipto

A absorção e translocação dos metais para parte aérea foi mais eficiente para o Zn, principalmente no tratamento com lodo de esgoto. Isso ocorreu porque os metais Cd e Pb foram mais estabilizados e adsorvidos pelas raízes e biochar.

Pode ter ocorrido também uma maior translocação do Zn por conta da contribuição genética da espécie *Eucalyptus urophylla* no híbrido usado no experimento (*E. urophylla* x *E. gradis*). Magalhães et al. (2011), ao avaliar o potencial de duas espécies de eucalipto na fitoestabilização de solo contaminado, observaram que o *E. urophylla* acumula maior parte de Zn principalmente na parte aérea, obtendo maior taxa de fitoextração.

As raízes das mudas de eucalipto foram mais eficientes em estabilizar os metais principalmente nos tratamentos controle e no tratamento lodo de esgoto para os três metais (Cd, Pb e Zn), (figura 9). A maior taxa ocorreu com o Pb por ele ser o metal com maior concentração no solo, destacando a eficiência fitoestabilizadora desse metal pela raiz de eucalipto. Segundo Metzger et al (1992) e Varennes et al (1996) uma das estratégias de defesa das plantas a toxidez de Pb é a restrição do transporte desse elemento para parte aérea, imobilizando-o nas raízes, nas quais é ligado a polímeros orgânicos insolúveis. Al-Salmany et al. (2021) ao analisarem a fitoextração de cádmio e chumbo por mudas de eucaliptos em solo contaminado, encontraram resultado semelhante, com uma boa capacidade das mudas em absorver e acumular Pb em suas raízes e com capacidade de resistir a concentrações elevadas desse metal, mostrando-se adequado o uso das mudas de eucalipto no processo de fitorremediação. Nos outros tratamentos (biochar e biochar+lodo de esgoto), a estabilização dos metais pelas raízes teve uma menor concentração, o que pode ter acontecido pela eficiência de adsorção dos metais pelo biochar, deixando-os menos disponíveis para planta.

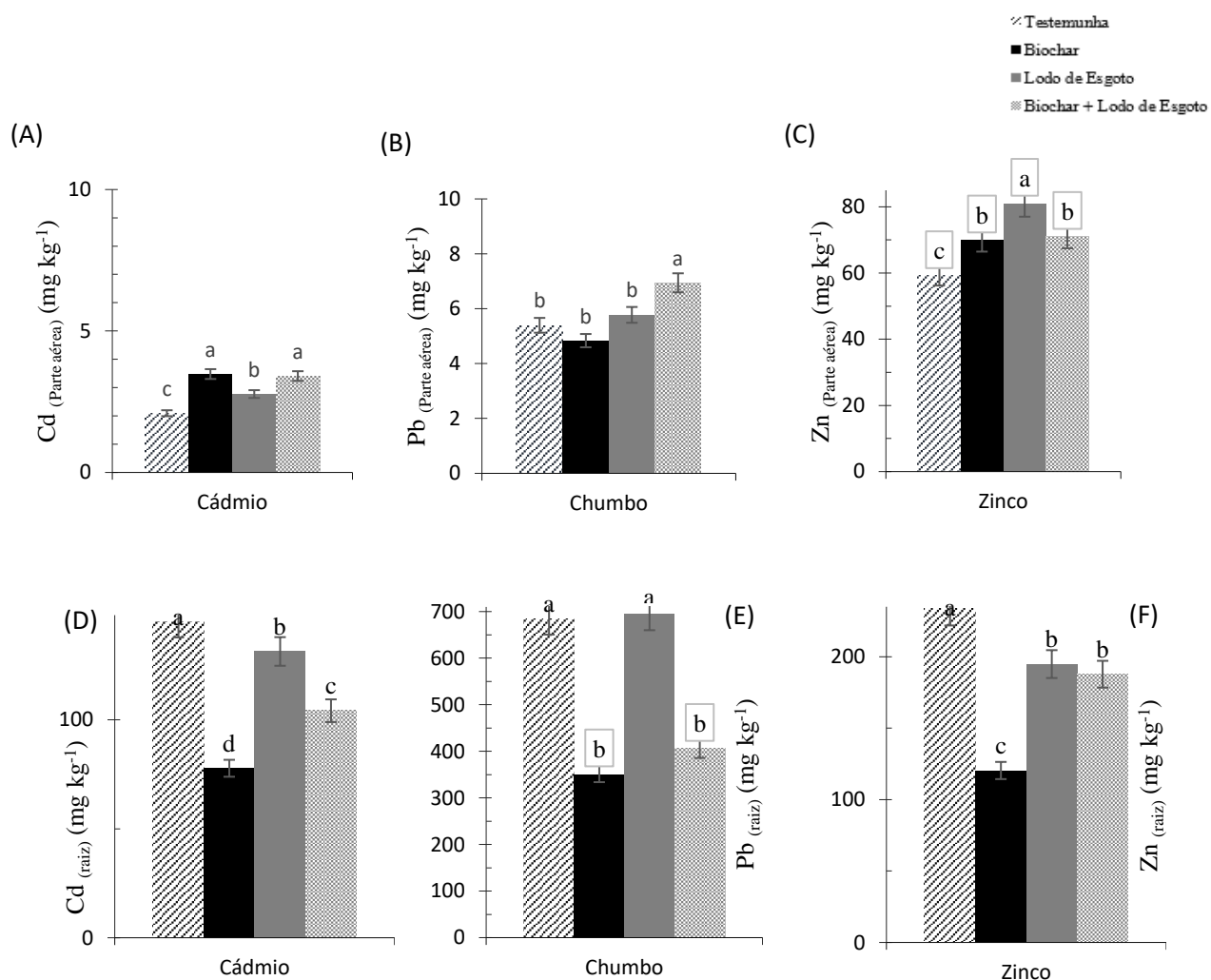


Figura 9. Teores de Cádmio, Chumbo e Zinco na parte aérea (A, B e C) e raízes (D, E e F) da muda de eucalipto em solo contaminado com metais pesados do município de Santo Amaro e tratado com, lodo de esgoto e biochar.

6. CONCLUSÕES

O uso e aplicação do biochar de lodo de esgoto pode ser indicado como amenizante de metais pesados em programa de fitoestabilização no solo contaminado de Santo Amaro, uma vez que promoveu diminuição da mobilidade e biodisponibilidade de metais no solo, com melhoria no desenvolvimento de mudas de eucalipto.

O lodo de esgoto pode ser indicado como aporte nutricional para um melhor desenvolvimento das mudas de eucalipto em consórcio com o biochar.

As mudas de eucalipto se apresentaram eficientes no processo de fitorremediação, apresentando maior extração de zinco e translocando-o para parte aérea. O híbrido de eucalipto também bioacumulou níveis mais altos de metais nas raízes, com especial destaque para Pb, mitigando sua translocação para parte aérea, prevenindo riscos de disseminação de contaminação.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo.** 2008. 108 p. Tese de Doutorado. Solos e Nutrição de Plantas - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ALMEIDA, J. B. Biocarvão na remediação da toxidez por alumínio e cádmio em *Sorghum bicolor* L. Dissertação (Mestrado em produção vegetal – Universidade Federal de Minas Gerais), Montes Carlos, 2018.

AL-SALMANY, S. W. K.; IBRAHIM, I. A. Phytoextraction of cadmium and lead from a contaminated soil using eucalyptus seedlings. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences.*, v. 52, n. 4, p.810-827, 2021.

ÁLVARZ-ROGEL, J.; GOMEZ, M. D. T.; CONESA, H. M.; PARRAGA-AGUADO, I.; GONZALEZ-ALCARAZ, M. N. Biochar from sewage sludge and pruning trees reduced porewater Cd, Pb and Zn concentrations in acidic, but not basic, mine soils under hydric conditions. *J. Environ. Manag.* V.223, 554-565, 2018.

ANDRADE, M. G. DE, MELO, V. DE F., GABARDO, J., SOUZA, L. C. DE P. & REISSMANN, C. B. (2009). Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. I - Fitoextração. In: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33;1879-1888.

BAI, Y.; ZANG, C.; GU, M.; GU, C.; SHAO, H.; GUAN, Y.; WANG, X.; ZHOU, X.; SHANA, Y.; FENG, K. Sewage sludge as na initial fertility driver for rapid improvement of mudflat saltsoils. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v.578, p.47-55, 2017.

BASHIR, S.; HUSSAIN, Q.; SHAABAN, M.; HU, H. Efficiency and surface characterization of different plant derived biochar for cadmium (Cd) mobility, bioaccessibility and bioavailability to Chinese cabbage in highly contaminated soil. *Chemosphere*, v. 211, p. 632±639, 2018. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.168.

BRASIL. (2003). FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. Avaliação de risco à saúde humana por metais pesados em Santo Amaro da Purificação, Bahia.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA n°420. Resolução n° 420, de 28 de dezembro de 2009. Brasília, 2009.

CAMARGO, O. A. Reações e Interações de Micronutrientes no Solo. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/micronutrientes/Index.htm. Acesso em: 17 de maio de 2022.

CAMPOS, E. A.; SILVA, I. F.; WARDEN, C. F. Exposição a metais em população adulta residente em áreas industriais: revisão sistemática da literatura. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 26, n.6, p. 2253-2270, 2021

CARVALHO, F. M.; SILVANY NETO, A. M.; TAVARES, T. M.; COSTA, A. C. A.; CHAVES, C. R.; NASCIMENTO, L. D.; REIS, M. A. Chumbo no sangue de crianças e passivo ambiental de uma fundição de chumbo no Brasil. *Rev Panam Salud Publica/Pan Am J Public Health*, v.13, n.1, p.19-24, 2003.

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. Projeto Santo Amaro - BA: aglutinando idéias, construindo soluções. Diagnósticos. 2012.

CHAGAS, J. K. M.; Acúmulo e disponibilidade de metais pesados no solo após adição de biochar de lodo de esgoto. Monografia (Agronomia - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília). p. 42, 2018.

CHENG, J.; LI, Y.; GAO, W.; CHEN, Y.; PAN, W.; LEE, X.; TANG, Y. Effects of biochar on Cd and Pb mobility and microbial community composition in a calcareous soil planted with tobacco. *Biology and Fertility of Soils*, v. 54, p. 373-383, 2018. DOI: 10.1007/s00374-018- 1267-8.

COÊLHO, J. G. S.; ARAÚJO, J.; LIMA, A. K. V. O.; PEREIRA, F. C. Fitorremediação na recuperação de áreas degradadas e combate a desertificação: estado da arte. I Congresso Internacional das Ciências Agrárias – COINTER – 2016.

CORRÊA, J. C.; BULL, L. T.; PAGANINI, W. S.; GUERRINI, I. A. Disponibilidade de metais pesados em latossolo com aplicação superficial de escória , lama cal, lodos de esgoto e calcário. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.43, n.3, p.411-419, 2008.

CRVRE, W. P.; RAMOS, S. J.; PEREIRA, W. V. S.; SOUZA, E. S.; MARTINS, G. C.; TEIXEIRA, O. M. M.; AMARANTE, C. B.; DIAS, Y. N.; FERNANDES, A. R. Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health. *Journal of Hazardous Materials*, v. 421, p. 126-688, 2022.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Brasília: EMBRAPA, p. 370, 2009.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Manual de Métodos de Análise de Solo, 2ª Ed. 2013.

ESTÉVEZ ALVAREZ, J. R.; MONTERO, A. A.; JIMÉNEZ, N. H.; MUÑIZ, U. O.; PADILLA, A. R.; MOLINA, R. J.; VERA, S. Q. Nuclear and related analytical methods applied to the determination of Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in a red ferralitic soil and Sorghum samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 247, p. 479-486, 2001. DOI: 10.1023/A:1010640009301.chagas.

FERREIRA, R.M. LOFRANO, F.C. & MORITA, D.M. (2020). Remediação de áreas contaminadas: uma avaliação crítica da legislação brasileira. Artigo técnico. *Revista Engenharia Sanitaria Ambiental*, v.25, n.1, jan/fev 2020, p 115-125.

GAO, Y.; WU, P.; JEYAKUMAR, P.; BOLAN, N.; WANG, H.; GAO, B.; WANK, S.; WANG, B. Biochar as a potential strategy for remediation of contaminated mining soils: Mechanisms, applications, and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, v. 313, 2022.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; ALMEIDA, A. Q.; JUNIOR, J. I. C. Sewage sludge derived biochar and its effect on the growth and morphological traits of *eucalyptus grandis* w.hill ex maiden seedlings. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 687-695, 2018.

HADZI, G. Y.; AYOKO, G.Y.; ESSUMANG, D. K.; OSAE, S. K. D. Contamination impact and human health risk assessment of heavy metals in surface soils from selected major mining areas in Ghana, v. 41, p. 2821-2843, 2019.

IBGE. Santo Amaro - BA. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba/santo-amaro.html>. Acessado em 09 de julho de 2021.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. 2012. Availableat:

<[HTTP://www.biocharinternational.org/sites/default/files/Guidelines_for_Biochar_That_Is_Used_in_Soil_Final.pdf](http://www.biocharinternational.org/sites/default/files/Guidelines_for_Biochar_That_Is_Used_in_Soil_Final.pdf)> .Acesso em: 10 de julho de 2021.

KIM, M., MIN, H., KOO, N., PARK, J., LEE, S., BAK, G., KIM, J., 2014. The effectiveness of spent coffee grounds and its biochar on the amelioration of heavy metals-contaminated water and soil using chemical and biological assessments. *J. Environ. Manag.* 146, 124–130.

LI, H.; DONG, X.; DA SILVA, E. B.; DE OLIVEIRA, L. M.; CHEN, Y.; MA, L. Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, v. 178, p. 466–478, 2017.

LI, H.; DONG, X.; SILVA, E. B.; OLIVEIRA, L. M.; CHEN, Y.; MA, L. Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, v. 178, p. 466-478, 2017. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.072.

LIU, S. ET AL. Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology, Firenze*, v. 116, n.1, p. 12-22, 2017.

LLORET, L.; PASCUAL, J. A.; BRODIE, E. L.; BOUSKILL, N. J.; INSAM, H.; JUÁREZ, M. F.; GOBERNA, M. Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. *Applied Soil Ecology, Amsterdam*, v.101, p.37–46, 2016.

LU, H.; LI, Z.; FU, S.; GASGÓ, G.; PAZ-FERREIRO, J. Combining phytoextraction and biochar addition improves soil biochemical properties in a soil contaminated. *Chemosphere*, v.119, p. 209-216, 2015.

MACIEL, A. L.; CASALVARA, H. F. A.; TOMÉ, J. D. S.; PEREIRA, R. G.; LOURENÇO, T. C. X.; CONSOLIN FILHO, N.; ARAÚJO, J. H. B. Fitorremediação de solos contaminados por ferro (Fe) na forma de sulfato ferroso (FeSO₄) utilizando a espécie *Mimosa bimucronata* (DC.) Kuntze. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. v.12 - n.6, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.006.0002

MAGALHÃES, M. O. L. Avaliação do potencial de espécies de eucalipto na remediação de áreas contaminadas com metais pesados. Dissertação (mestrado em ciência do solo – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro), Seropédica, 2008.

MAGALHÃES, M. O. L.; SOBRINHO, N. M. A.; SANTOS, F. S.; MAZUR, N. Potencial de duas espécies de eucalipto na fitoestabilização de solo contaminado com zinco. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, p. 805-812, 2011.

MANDU, T. S. Cádmio, cobre e zinco no sistema solo-eucalipto tratado com lodo de esgoto: fracionamento, disponibilidade, desenvolvimento e nutrição das plantas. Dissertação (Mestrado – Energia Nuclear na Agricultura – Universidade de São Paulo), Piracicaba, 2020.

MELO, E. E. C.; NASCIMENTO, C. W. A.; SANTOS, A. C. Q. Solubilidade, fracionamento e fitoextração de metais pesados após aplicação de agentes quelantes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.1051-1060, 2006.

NASCIMENTO, A.R.V.J.; NASCIMENTO, C.W.A.; CUNHA, K.P.V. Solos de minas de scheelita como fontes de contaminação por metais pesados. *Eng Sanit Ambient*, v.25 n.4, p. 555-566, | 2020.

NENMAN, D. V, NIMYEL, N.D., EZEKIEL, D.I. (2012). The Potentials of *Eucalyptus camaldulensis* for the phytoextraction. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(2), 346 – 349.

NOGUEIRA, R. C.; MELO, W. J.; BERTONCINI, E. I.; ALLEONI, L. R. F. Concentrations of Cu, Fe, Mn, and Zn in tropical soils amended with sewage sludge and composted sewage sludge. *Environ Monit Assess*, v.185, p.2929–2938, 2013.

PARK, H.; NOH, K.; MIN, J. J.; RUPAR, C. Effects of Toxic Metal Contamination in the Tri-State Mining District on the Ecological Community and Human Health: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Sep 17;17(18):6783.

PENIDO, ES, MARTINS, GC, MENDES, TBM, MELO, LCA, DO ROSÁRIO GUIMARÃES, I., GUILHERME, L. R. G., 2019. Combining biochar and sewage sludge for metal immobilization heavy in mining soils. *Ecotoxicol. Environment. Safe* 172, 326-333. Phillips, CL, Trippe, KM, Whittaker, G., Griffith, SM, Johnson, MG, Banowetz,

GM, 2016. Aerated grass and wood biochars facilitate plant establishment in soils mine acids. *J. Environment. Which.* 45 (3), 1013-1020.

PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; JUNIOR, B. H. M.; GONÇALVES, L. G. B.; SCHOSSLER, T. R. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. *Revista Caatinga, Mossoró*, v. 25, n. 4, p. 44-51, 2012.

RABELO, T. S. Estudo da Contaminação Remanescente de Chumbo e Cádmio no Município de Santo Amaro – BA. Dissertação (Mestrado – Engenharia Ambiental Urbana- Universidade Federal da Bahia), Salvador, 2010.

RASAFI, T. E. PEREIRA, R.; PINTO, G.; GONÇALVES, F. J. M.; HADDIOUI, A.; KSIBI, M.; ROMBKE, J.; SOUZA, J. P.; MARQUES, C. R. Potential of *Eucalyptus globulus* for the phytoremediation of metals in a Moroccan iron mine soil—a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 15782–15793, 2021.

Santo Amaro (BA), município mais contaminado por chumbo no mundo, deve receber centro de referência para vítimas. *Ecodebate*, site de informações, artigos e notícias socioambientais. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2013/03/21/santo-amaro-ba-municipio-mais-contaminado-por-chumbo-no-mundo-deve-receber-centro-de-referencia-para-vitimas/>. Acesso em: 11 de julho de 2021

SANTOS, N. M.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, I. R.; SANTOS, J. A. G. Biodisponibilidade de chumbo por extratores químicos em solo tratado com ácidos húmicos e carvão ativado. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 46, n. 4, p. 663-668, 2015. DOI: 10.5935/1806-6690.20150052.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://snif.florestal.gov.br/pt-br/>>. Acesso em: 13 de junho de 2021.

SESAB - SERETARIA DE DAÚDE DO ESTADO DA BAHIA. Protocolo de vigilância e atenção à saúde da população exposta ao chumbo, cádmio, cobre e zinco em Santo Amaro, Bahia. Disponível em: <http://www.saude.ba.gov.br/suvisa/vigilancia-em-saude-ambiental/documentos-2/>. Acesso em: 11 de julho de 2021

SILVA, V. L.; BELÉM, R. S.; MARIMON JUNIOR, B. H.; ANDRADE, F. R.; FARIAS, J.; ROCHA, N. C. L. Biochar como condicionante de solo no cultivo do eucalipto híbrido urograndis. *Sci. Elec. Arch.* Vol. 11, n. 4, 2018.

SILVA, A. C.; TORRADO, P. V.; ABREU JUNIOR, J. de S. Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. *R. Un. Alfenas*, v.5, p.21-26,1999.

SILVA, T. J.; HANSTED, F. A. S.; TNELLO, P. S.; GOVEIA, D. **Fitorremediação de Solos Contaminados com Metais: Panorama Atual e Perspectivas de uso de Espécies Florestais.** *Rev. Virtual Quim.* Vol 11, No. 1, p.18-34, 2019.

SILVA, W. R. ; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; NASCIMENTO, C. W. A. Assessing human health risks and strategies for phytoremediation in soils contaminated with As, Cd, Pb, and Zn by slag disposal. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 144, p. 522± 530, 2017. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.06.068.

SILVA, W. R. Fitoextração e bioacessibilidade de as, cd, pb e zn em solos contaminados por resíduos metalúrgicos. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo – Universidade Federal Rural de Pernambuco), Recife, 2015.

SILVA, W. R. Uso agrícola de lodo do tratamento de resíduos industriais e sanitários: impactos agrônômicos, ambientais e nos indicadores microbiológicos de qualidade do solo. Recife, 2020. 107p. (tese de doutorado).

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-esgotamento-sanitario>. Acesso em: 10 de julho de 2021.

SOUZA, A. A. T. C. Biochar de lodo de esgoto: efeitos no solo e na planta no cultivo do rabanete. Brasília, 2015. 63p. (tese mestrado).

SOUZA, B. G. Fitorremediação de diferentes contaminantes do solo. Trabalho de Conclusão de Curso (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – IFGO), Rio Verde, Goiás, 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise do solo. 3 ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

USEPA, (United States Environmental Protection Agency). METHOD 3051A: MICROWAVE ASSISTED ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, SOILS, AND OILS. 2007. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3051a.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2019.

VIEIRA, GR.F& PAZIANOTTO, R. A. A. Microbial activities in soil cultivated with corn and amended with sewage sludge. **Springer Plus**, v. 5, p. 1844, 2016.

WENDSON DE MORAES SILVA. Aplicação de biochar de resíduos de café em neossolorególítico: efeito nas características químicas e biológicas e na produção de milho e feijão. Garanhuns, 2016. 57p. (Tese de Mestrado)

XU, D.; ZAO, Y.; SUN, K.; SUN, K.; GAO, B.; WANG, Z.; JIN, J.; ZHANG, Z.; WANG, S.; YAN, Y.; LIU, X.; WU, F. Cadmium adsorption on plant-and manure-derived biochar and biochar-amended sandy soils: impact of bulk and surface properties. **Chemosphere**, v. 111, p. 320±326, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.04.043.

YIN, D.; WANG, X.; CHEN, C.; PENG, B.; TAN, C.; LI, H. Varying effect of biochar on Cd, P and As mobility in a multi-metal contaminated paddy soil. **Chemosphere**, v. 152, p. 196-206, 2016.

ZHU L, TONG L, ZHAO N, WANG X, YANG X, LV Y. 2020. Key and microscopic factors mechanisms that control the adsorption of cadmium by oxidized and amended biochars in the surface. **J. Maternal Danger**. 382, 121002