



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

ROBSON DA COSTA LEITE

**RESÍDUOS DE BAUXITA E DA PALMA DE ÓLEO: POTENCIAL
AGRONÔMICO E AMBIENTAL PARA O CONDICIONAMENTO DE SOLOS
ÁCIDOS**

**BELÉM - PA
2022**

ROBSON DA COSTA LEITE

**RESÍDUOS DE BAUXITA E DA PALMA DE ÓLEO: POTENCIAL
AGRONÔMICO E AMBIENTAL PARA O CONDICIONAMENTO DE SOLOS
ÁCIDOS**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia.

Área de concentração: Agronomia

Orientador: Prof.º Dr.º Antonio Rodrigues Fernandes

**BELÉM- PA
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L533r Leite, Robson da Costa
Resíduos de bauxita e da palma de óleo : Potencial agrônômico e ambiental para o
condicionamento de solos ácidos / Robson da Costa Leite. - 2022.
97 f. : il. color.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de
Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Antonio Rodrigues Fernandes

1. Economia circular. 2. Reutilização de resíduos. 3. Condicionador de solos. 4. Manejo do solo. I. Fernandes, Antonio Rodrigues, *orient.* II. Título

CDD 631.4

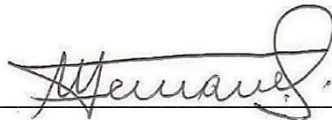
ROBSON DA COSTA LEITE

**RESÍDUOS DE BAUXITA E DA PALMA DE ÓLEO: POTENCIAL
AGRONÔMICO E AMBIENTAL PARA O CONDICIONAMENTO DE SOLOS
ÁCIDOS**

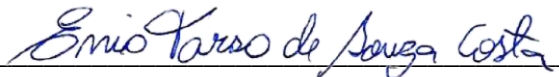
Tese submetida à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Área de concentração em Agronomia, para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Aprovada em 31 de agosto de 2022

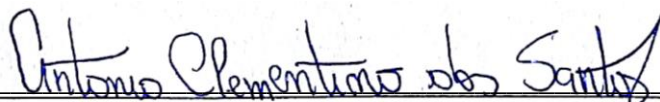
BANCA EXAMINADORA:



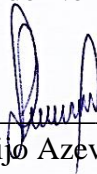
Prof.º Dr.º Antonio Rodrigues Fernandes – Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA



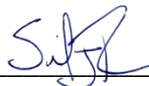
Prof.º Dr.º Enio Tarso de Souza Costa – 1º examinador
Universidade Federal de Uberlândia-UFU



Prof.º Dr.º Antonio Clementino dos Santos – 2º examinador
Universidade Federal do Norte do Tocantins-UFNT



Prof.º Dr.º Leônidas Carrijo Azevedo Melo – 3º examinador
Universidade Federal de Lavras-UFLA



Pesquisador Dr.º Silvio Júnio Ramos – 4º examinador
Instituto Tecnológico Vale- ITV

Eu dedico a DEUS. Aos meus pais, Lucas e Valdirene. Minha esposa Ana Caroline. Meus irmãos, Rubson e Dagna. E em especial ao meu avô (In memoriam), José Tomé.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por todas as bênçãos em minha vida, por iluminar os meus passos e por cuidar do meu bem mais precioso à família.

Agradeço aos meus pais, Lucas e Valdirene, por sempre me apoiar e sonhar junto comigo, sempre abriram mão de muitas coisas por mim.

À minha esposa, com apelido carinhoso de MOZI, sempre esteve ao meu lado durante este período, foi luz em meus caminhos e foi um anjo por me aturar nessa trajetória.

Ao meu orientador, conhecido como Toninho, pela excelente orientação acadêmica, um orientador excepcional e que deveria ser mais reconhecido.

À UFRA e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade em concluir esse doutorado em alto nível de aprendizado e formação.

Ao Instituto Senai de Inovação em Tecnologias Minerai-ISI em nome do Dr.º Adriano, pela bolsa de estudo e suporte financeiro adequado à pesquisa. Aos colegas pesquisadores que colaboraram com a pesquisa (André, Rose, Patricia, Vivian, Alice, Alex e Fernando).

À Norsk Hydro, por ceder o material necessário e suporte financeiro à pesquisa.

À banca de avaliação pelas contribuições e sugestões para uma publicação de alto impacto científico.

Em seu coração o homem planeja o seu caminho, mas o senhor determina os seus passos.

Provérbios 16: 9

RESUMO GERAL

O agronegócio é um dos pilares para o resultado positivo do produto interno bruto (PIB) no Brasil. O crescimento linear deste setor tem gerado maior demanda por insumos que afetam a produtividade dos cultivos. A utilização de fontes alternativas como os resíduos de mineração e da agroindústria podem ajudar no desenvolvimento alternativo de novos produtos para o uso nos solos. A associação de resíduos de bauxita (RB) com propriedades alcalinas à resíduos da palma de óleo, que são fontes de matéria orgânica e de nutrientes podem caracterizar formulação com potencial para o uso como condicionador de solos. O primeiro capítulo teve como objetivo avaliar as propriedades físico-químicas (nitrogênio total, carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, relação carbono/nitrogênio C/N, nutrientes de plantas e elementos potencialmente tóxicos - EPTs), assim como o potencial de risco ecológico (PERI) de condicionadores de solo gerados pela associação de RB sob diferentes resíduos orgânicos da palma de óleo. Assim, foi definido um fatorial com três doses de RB (25, 50 e 75%) combinados com dois tipos de resíduos orgânicos provenientes da produção de óleo de palma (1: POMW- fibra, bucha e borra em proporção de 30/1 relação C/N, nível ideal para compostagem; 2: POC-composto maduro de resíduos orgânicos da palma de óleo) em recipientes de 60 L e avaliados após 90 dias. O segundo capítulo teve como objetivo avaliar a lixiviação de elementos químicos, estimativa de contaminação do solo e águas subterrâneas, características físico-químicas do solo e eficiência agrônômica de formulação contendo RB e resíduos da palma de óleo no solo cultivado com *Urochloa híbrida* cv. Sabiá. Selecionou-se as formulações considerando os parâmetros para condicionadores de solos, cujas doses foram (40, 80 e 120 t ha⁻¹). Utilizou-se colunas de policloreto de vinila (PVC) com capacidade para 5 kg, acopladas com mangueiras e garrafas adaptadas para facilitar a drenagem e coleta dos lixiviados. Durante 60 dias foi aplicada chuvas simuladas visando saturar o substrato. Após esse período as mangueiras e garrafas foram retiradas e as colunas passaram a ser utilizadas como vasos para o cultivo do capim Sabiá. Os resultados indicaram que a utilização de 25% de RB associado aos resíduos da palma de óleo constituiu formulação que atende os requisitos para o condicionamento de solos. Quanto maior a concentração de resíduos orgânicos maior os valores de capacidade de troca catiônica, capacidade de retenção de água, carbono orgânico, N total, nutrientes, além de menor sodicidade e EPTs. A aplicação das formulações resultou na lixiviação de nove elementos, entretanto, não foi detectado EPTs na solução lixiviada e nem no solo. Os

tratamentos neutralizaram o Al^{3+} nas maiores doses e elevaram a saturação por bases (V= 55.6%) em relação ao solo de mata nativa (10.8%), como ocorrido com o calcário (83%). Também elevaram o pH do solo (5,5) em relação ao solo de mata nativa (4,7). A produção do capim Sabiá aumentou em relação ao solo nativo, equiparando com o calcário. Dessa forma, formulação contendo RB e resíduos da palma de óleo pode ser classificada como condicionadora de solos, sem impacto na contaminação do solo e águas subterrâneas, além de incrementar os parâmetros físico-químicos do solo e a produção do capim Sabiá.

Palavras-chave: Economia circular; *Elaeis guineensis* Jacq; Manejo do solo; reutilização de resíduos; *Urochloa híbrida* cv. Sabiá.

GENERAL ABSTRACT

Agribusiness is one of the pillars for the positive result of the gross domestic product (GDP) in Brazil. The linear growth of this sector has generated greater demand for inputs that affect crop productivity. The use of alternative sources such as mining and agro-industry wastes can help in the alternative development of new products for use in soils. The association of bauxite residue (BR) with alkaline properties to oil palm waste, which are sources of organic matter and nutrients can characterize formulation with ideal conditions for soil conditioning. The first chapter aimed to evaluate the physicochemical properties (total N, organic carbon, cation exchange capacity, C/N ratio, nutrients and potentially toxic elements PTEs) as well as the potential ecological risk (PERI) of conditioners generated by BR increment under different oil palm organic residues. Thus, we defined a factorial with three doses of BR (25, 50 and 75%) and combined with two types of organic waste from palm oil production (1: palm oil mill waste POMW- fiber, bunch of empty fruits and blurs palm in ideal proportions for composting; 2: palm oil compost POC- mature compost of organic waste from oil palm) in 60 L containers and we evaluated after 90 days. The second chapter aimed to evaluate leaching of chemical elements, soil and groundwater contamination estimation, soil physicochemical characteristics and agronomic efficiency of formulation containing BR and oil palm residues in soil cultivated with *Urochloa* hybrid cv. Sabiá. The formulations were selected considering the parameters for soil conditioners, whose doses were (40, 80 and 120 t ha⁻¹). PVC columns with a capacity of 5 kg were used, coupled with hoses and bottles adapted to facilitate drainage and collection of leachates. During 60 days simulated rainfall was applied aiming to saturate the substrate. After this period the hoses and bottles were removed and the columns started to be used as pots for growing *Urochloa*. The results indicated that the use of 25% BR associated with oil palm residues constituted a formulation that meets the requirements for soil conditioning. The higher the concentration of organic residues the higher the values of cation exchange capacity, water retention capacity, organic carbon, total N, nutrients, as well as lower sodicity and PTEs. The application of the formulations leached nine elements, however, neither in the leached solution nor in the soil was detected EPTs. The treatments neutralized Al³⁺ at the highest doses and also increased the base saturation (55.6%) in relation to the native forest soil (10.8%), as occurred with limestone (83%). They also raised soil pH (5.5) compared to native forest soil (4.7). Sabiá yields increased relative to native soil,

matching limestone. Therefore, formulation containing BR and oil palm residues can be classified as soil conditioner, without impact on soil and groundwater contamination, besides increasing soil physicochemical parameters and grass production.

Keywords: Composting; circular economy; reuse of waste; *Urochloa híbrida* cv. Sabiá.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 2

Figura 1. Materiais utilizados em ensaio de formulação de condicionador de solo.....	30
Figura 2. Localização da montagem e da condução de experimento para formulação de condicionador de solo.....	31
Figura 3. Difratoograma do resíduo de bauxita obtido por DRX.....	35
Figura 4. pH (a), condutividade elétrica (b) e temperatura (c) durante a condução do experimento de formulação de condicionador de solo	38
Figura 5. Parâmetros de qualidade de condicionador de solo e fertilizante orgânico composto para a formulação de condicionador de solo.....	41
Figura 6. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise granulométrica a laser das partículas do resíduo de bauxita das formulações do condicionador de solo após 90 dias.	44
Figura 7. Análise de componentes principais com a porcentagem de variação das componentes e Dendograma da associação dos tratamentos pela distância Euclidiana quadrática.....	46

Capítulo 3

Figura 1. Aspecto dos condicionadores antes da aplicação nas colunas de lixiviação com solo.....	59
Figura 2. (a) Diagrama esquemático das colunas de lixiviação; (b) Colunas após montagem para o ensaio de lixiviação de elementos químicos de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.....	61
Figura 3. (a) Vasos utilizados para a avaliação da produção, crescimento do capim Sabiá e parâmetros físico-químicos de solos condicionados com formulações contendo resíduos de bauxita e da palma de óleo; (b) Sementes da forrageira semeada nos vasos.....	64
Figura 4. pH (a) e condutividade elétrica (b) dos lixiviados em ensaio de lixiviação em condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.....	67
Figura 5. Número de perfilhos (a) e massa seca total (b) de capim Sabiá sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.....	73

Figura 6. pH em água (a), alumínio trocável (b), saturação por bases (c) e porcentagem de sódio trocável (d) do solo após a condução de experimento sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.....	75
Figura 7. Índice de qualidade do solo em experimento de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.....	80
Figura 8. FTIR spectra de resíduos orgânicos utilizados em ensaio de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.....	81

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 1. Disposição dos tratamentos em ensaio de formulação de condicionador de solos à base de resíduo de bauxita e da palma de óleo.	32
Tabela 2. Concentração total de elementos, pH e condutividade elétrica (CE) dos materiais usados na formulação de condicionador de solo.....	36
Tabela 3. Concentração de elementos e densidade nas formulações de condicionador de solo obtidos após 90 dias de ensaio.....	43
Tabela 4. Concentração de elementos potencialmente tóxicos e limites máximos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo para a formulação de condicionador de solo.. ..	45

Capítulo 3

Tabela 1. Propriedades químicas dos condicionadores e do solo.....	60
Tabela 2. Concentração de elementos químicos lixiviados em ensaio de lixiviação em condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.....	68
Tabela 3. Estimativa da concentração de elementos potencialmente tóxicos lixiviados para a água subterrânea, considerando a maior dose dos tratamentos.....	70
Tabela 4. Estimativa da concentração de elementos potencialmente tóxicos no solo, considerando a maior dose dos tratamentos.....	71
Tabela 5. Teores trocáveis dos elementos Ca, Mg, P, K e S no solo em experimento sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo...77	
Tabela 6. Teores trocáveis dos elementos B, Cu, Fe, Mn, Zn e Pb no em experimento sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo...78	

LISTA DE ABREVIações

- RB** – Resíduo de bauxita;
- CTC** – Capacidade de troca catiônica;
- CRA** – Capacidade de retenção de água;
- CO** – Carbono orgânico;
- POMW**- Palm oil mill waste;
- POC**- Palm oil compost;
- C/N** – Carbono/nitrogênio;
- CE** – Condutividade elétrica;
- ICP-OS** - Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry;
- FRX** – Fluorescência de raios-X;
- ICP-MS** - Inductively coupled plasma mass spectrometry;
- EPA** - Environmental Protection Agency;
- AAS** - Atomic Absorption Spectrometry;
- AES** - Atomic emission spectrometry;
- MEV** - Microscópio Eletrônico de Varredura;
- KMO** - Kaiser-Meyer-olkin's;
- MAPA** – Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento;
- PCA** - Principal component analysis;
- IN** – Instrução normativa;
- MO** – Matéria orgânica;
- EPTs** – Elementos potencialmente tóxicos;
- PVC** - Policloreto de vinila.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	06
GENERAL ABSTRACT	08
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	16
Referências	20
2 PRODUÇÃO DE CONDICIONADORES DE SOLO À BASE DE RESÍDUOS DE BAUXITA E DA PALMA DE ÓLEO	24
Resumo	25
Abstract	27
2.1 Introdução	28
2.2 Material e métodos	30
2.2.1 Materiais usados	30
2.2.2 Local de estudo e delineamento	31
2.2.3 Caracterização do resíduo de bauxita	32
2.2.4 Caracterização dos materiais orgânicos.....	33
2.2.5 Propriedades físico-químicas dos tratamentos.	33
2.2.6 Análise estatística.	35
2.3 Resultados e Discussão	35
2.3.1 Caracterização físico-química dos materiais do ensaio.....	35
2.3.2 pH, condutividade elétrica e temperatura dos tratamentos.....	37
2.3.3 Propriedades físico-químicas dos tratamentos	39
2.3.4 Análise de componentes principais.	45
2.4 Conclusão	47
Referências	47
3 AVALIAÇÃO AGRONÔMICA E SEGURANÇA AMBIENTAL DE CONDICIONADOR DE SOLO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUOS DE BAUXITA E DA PALMA DE ÓLEO	54
Resumo	55
Abstract	57
3.1 Introdução	58
3.2 Matéria e Métodos	59
3.2.1 Experimento 1: lixiviação de elementos químicos.....	59
3.2.1.1 Preparação das colunas de lixiviação.....	60

3.2.1.2 Propriedades químicas dos lixiviados.....	61
3.2.1.3 Estimativa de risco de contaminação de águas subterrâneas	62
3.2.1.4 Estimativa do risco de contaminação do solo.....	62
3.2.2 Experimento 2: eficiência agronômica dos condicionadores de solo.....	63
3.2.2.1 Crescimento e desenvolvimento vegetal.....	64
3.2.2.2 Parâmetros de fertilidade do solo.....	64
3.2.2.3 Índice de qualidade do solo (IQS).....	65
3.2.3 Caracterização dos grupos funcionais no resíduo orgânico.....	66
3.2.4 Análise estatística	66
3.3 Resultados e Discussão	66
3.3.1 Experimento 1: lixiviação de elementos químicos.....	66
3.3.1.1 pH e condutividade elétrica dos lixiviados.....	66
3.3.1.2 Elementos químicos lixiviados.....	68
3.3.1.3 Estimativa de risco de contaminação por EPTs.....	70
3.3.2 Experimento 2: eficiência agronômica dos condicionadores de solo.....	72
3.3.2.1 Avaliação do capim Sabiá.....	72
3.3.2.2 Parâmetros de fertilidade do solo.....	74
3.3.2.3 Índice de qualidade do solo (IQS).....	79
3.3.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	81
3.4 Conclusão.....	82
Referências.....	83
CONCLUSÃO GERAL.....	90
APÊNDICES.....	91

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O crescimento da agricultura brasileira tem gerado maior demanda por corretivos, condicionadores e fertilizantes de solo, que tem beneficiado a produção de alimentos e estimulado o superávit agrícola nos últimos anos no Brasil, no entanto, estes insumos são provenientes de fontes não renováveis e tem o custo mais elevado. E este fato tem contribuído para o interesse de utilização de fontes alternativas, como os resíduos de mineração e da agroindústria (SILVA et al., 2012).

A gama de opções de subprodutos é cada vez maior, como rochas ou seus resíduos derivados de atividades de mineração, que podem ser ofertados aos agricultores como fontes alternativas de nutrientes e como condicionadores de solo em diferentes regiões do Brasil (RESENDE et al., 2012). Também existe grande oferta de resíduos da produção agrícola, que são ricos em matéria orgânica e nutrientes para a nutrição vegetal. Sendo assim, ocorre grande diversidade de subprodutos, podendo ser enquadrados como condicionadores, corretivos, remineralizadores e fertilizantes organominerais, seguindo as legislações vigentes do Ministério da Agricultura, pecuária e abastecimento.

Em regiões tropicais, onde o principal fator limitante do potencial agrícola é a baixa fertilidade natural dos solos, cujos fatores adversos são a alta acidez associada à toxidez por Al e as baixas reservas de nutrientes, os resíduos de mineração e/ou agroindustriais adquirem expressivo significado para a viabilização da agricultura sustentável (SOUZA, 2014). Conseqüentemente, novos insumos e tecnologias de produção que se apropriem das diferentes condições locais e conciliem a produção de alimentos com a sustentabilidade, podem reduzir o impacto ambiental das atividades antropogênicas (PETTER; MADARI, 2012).

Com o reaproveitamento de resíduos na agricultura, melhora-se a qualidade do solo e conseqüentemente a produtividade das culturas e ainda diminui problemas com contaminação ambiental em relação ao armazenamento desses resíduos que podem conter alta concentração de EPTs, prejudiciais à saúde humana (SOUZA et al., 2017; DUARTE et al., 2010; CORRÊA et al., 2008).

A eficiência agrônômica dos resíduos de mineração depende da origem, da mineralogia, composição química e outros fatores associados às características do ambiente, tempo de incubação do material, e também das espécies cultivadas. Assim, a sua utilização pode contribuir em alguma dessas características como a correção da acidez, fonte de nutrientes, remineralização e condicionamento do solo, podendo

umentar a produtividade, melhorar a fertilidade e reduzir a necessidade de fertilizantes convencionais (SOUSA, 2014). Todavia, a maioria desses resíduos de mineração são fontes de EPTs para o solo e podem contaminar a água e os vegetais (PARK et al., 2017; MOREIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2012; SILVA et al., 2012).

O aumento do teor de matéria orgânica no solo pode imobilizar os EPTs e viabilizar o uso de determinados resíduos de mineração. Assim, o uso de resíduos orgânicos adicionados aos resíduos de mineração pode representar uma contribuição significativa no controle da contaminação do solo, através da complexação, melhorar as características químicas, físicas, hidráulicas e biológicas do resíduo de mineração, além de aumentar a produtividade das culturas (GONZAGA et al., 2018; FIGUEREDO et al., 2017; BIEDERMAN; HARPOLE, 2013; PETTER; MADARI, 2012; BRUUN et al., 2011).

A absorção e o acúmulo de elementos tóxicos na planta dependem da disponibilidade no solo, que por sua vez depende das propriedades do solo (pH, argila, óxidos, teores de MO e CTC), logo o resíduo orgânico quando associado aos resíduos de mineração obtém potencial em diminuir a disponibilidade de EPTs. A utilização de resíduos de mineração em solos com alto nível de matéria orgânica e textura argilosa favorece a sorção de metais e diminui a sua disponibilidade (SOUZA et al., 2019; PARK et al., 2017).

A combinação de resíduo de basalto e lodo de esgoto apresentaram propriedades químicas e físicas em níveis adequados para um bom desenvolvimento de aveia preta (*Avena strigosa*) (ARTICO et al., 2018). A incorporação de húmus de composto orgânico ao resíduo de basalto no solo, acelerou o processo de solubilização dos nutrientes do resíduo no solo (MELO et al., 2012).

No Brasil existe uma grande diversidade de resíduos agroindustriais que podem ser usados para fins agrônômicos (MARTINS et al., 2018; RESENDE et al., 2012). No estado do Pará, destaca-se como as principais atividades geradoras de resíduo agroindustrial, as culturas do açaí, cacau, coco e palma de óleo. A cultura da palma de óleo (dendê) ocorre em diversas regiões do mundo, principalmente Indonésia (53%), Malásia (32%) e Tailândia (3%) que são os maiores produtores mundiais. Sendo que o Brasil ocupa a 9ª posição, com aproximadamente 236 mil hectares de áreas cultivadas, e cerca de 88% desta área está localizada no estado do Pará (ABRAPALMA, 2016).

Na atividade de mineração o Brasil tem alto potencial. Por exemplo, o estado do Pará tem a maior produção de bauxita do Brasil, sendo responsável por 91% da produção

bruta nacional (AMB, 2018). A bauxita é formada como um produto residual ao longo de milhões de anos por intemperismo químico de rochas. Porém, não se trata de uma espécie mineral, mas um material heterogêneo formado por uma assembleia mineral, como Oxihidróxidos de alumínio, Caulinita, Quartzo, Hematita, Goethita, entre outros (KUSIN et al., 2017; GUIMARÃES et al., 2018).

O nome bauxita se refere à cidade de Les Baux, na França, onde foi identificado pela primeira vez em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier. A partir da bauxita se obtém o alumínio, o terceiro elemento em maior abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e silício (ABAL, 2017). O subproduto do refinamento da bauxita é denominado resíduo de bauxita (RB), no qual, a cada tonelada de alumina são geradas 2,0 toneladas de RB (KONG et al., 2017; DI CARLO et al., 2019; RASHTI et al., 2019).

A natureza alcalina do RB pode ser usada para aumentar o pH dos solos, principalmente solos ácidos, devido a grande quantidade de hidroxilas (grupos OH) oriundas da adição de NaOH para a extração da alumina. Por outro lado, o excesso de sódio pode ser um agravante para a utilização na agricultura (RASHTI et al., 2019; TIAN et al., 2019). Até 5% de RB (p/p) aplicado diretamente no solo não afeta o crescimento de plantas e aumenta o pH em até 2,3 unidades e os níveis de EPTs não excederam os critérios de qualidade de solo na Hungria (UJACZKI et al., 2015). Entretanto, é importante estudos mais aprofundados sobre o potencial agronômico, riscos ambientais e possíveis alterações na qualidade do solo.

Diversos trabalhos sob a temática de viabilização de crescimento vegetal em áreas de disposição de RB vêm sendo realizados, e os resultados indicam que a incorporação de diferentes fontes de resíduos orgânicos ao RB proporciona melhores condições químicas, físicas e biológicas para a área, promovendo o crescimento vegetal (JONES et al., 2010; GOLORAN et al., 2015; ZHU et al., 2016).

Sendo assim, uma nova rota de aproveitamento de RB pode ser explorada, no qual, com a adição de RB aos resíduos orgânicos, espera-se obter resultados agronômicos e ambientais promissores para a obtenção de um novo produto alternativo para a melhoria das características físico-químicas do solo e produtividade das culturas. Espera-se enquadrar tais misturas como condicionador de solos (devido as suas características e o não enquadramento em outras especificações como corretivos de acidez e fertilizantes organominerais), que é um insumo que promove a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou atividade biológica do solo, podendo recuperar solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente (BRASIL, 2006).

Nesse sentido, a obtenção de condicionadores elaborados a partir de RB e resíduos da palma de óleo pode se tornar uma alternativa importante para a redução do volume e dos impactos gerados pelas atividades agroindustrial e de mineração. Além disso, esta é uma estratégia sustentável inédita, contribuindo também para o conceito de economia circular (MORENO-BARRIGA et al., 2017).

Em síntese, a hipótese do primeiro capítulo é que a adição de RB aos resíduos orgânicos da palma de óleo reduz a sodicidade, alcalinidade e conteúdo de EPTs do RB e estabeleça um insumo com características físico-químicas equivalentes para o uso como condicionador de solos, seguindo as exigências da legislação brasileira (BRASIL, 2006). Para tal, o objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físico-químicas (N total, carbono orgânico, capacidade de retenção de água, capacidade de troca catiônica, relação carbono-nitrogênio, granulometria, macronutrientes, micronutrientes e EPTs), assim como o índice potencial de risco ecológico (PERI) de condicionadores de solo gerados pela associação de RB sob diferentes resíduos orgânicos da palma de óleo.

A hipótese do segundo capítulo é que a aplicação de condicionador a base de RB e resíduos orgânicos da palma de óleo não lixivia EPTs em concentração que cause contaminação das águas subterrâneas e do solo, além de incrementar os parâmetros físico-químicos do solo e a produção vegetal. Para isso, o objetivo deste estudo foi avaliar a lixiviação de elementos químicos, estimativa de contaminação do solo e águas subterrâneas, características físico-químicas e eficiência agronômica de RB associado ao resíduo de palma de óleo, em solo cultivado com a gramínea *Urochloa híbrida* cv. Sabiá.

REFERÊNCIAS

- ABAL-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no brasil: mineração responsável e competitividade.** Disponível em: http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf.
- AMB-ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO: **Principais Substâncias Metálicas.** Brasília, 2019. 34 p. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf.
- ARTICO, M. **Recuperação de áreas degradadas através do uso integrado de lodo de esgoto e rejeito de mineração de basalto como substituto ao solo de cobertura.** 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2018.
- BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **Global change biology bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202–214, mar. 2013. <https://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006. **Instrução normativa n. 35 de 04 de julho de 2006.** Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumosagropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf>. Acesso em: 04 de agosto de 2021.
- BRUUN, E. W.; MÜLLER-STÖVER, D.; AMBUS, P.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Application of biochar to soil and N₂O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 4, p. 581–589, ago. 2011. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01377.x>.
- CORRÊA, R. S.; BAPTISTA, G. M. DE. M.; BALDUÍNO, A. P. DO. C.; SILVA, L. DE. C. R. Eficiência agrônômica de dois resíduos orgânicos na revegetação do horizonte C de um Latossolo Vermelho. **Revista ciência agrônômica**, v.39, n. 4, p. 503-510, 2008.
- DI CARLO, E.; BOULLEMANT, A.; COURTNEY, R. A field assessment of bauxite residue rehabilitation strategies. **Science of The Total Environment**, v. 663, p. 915–926, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.376>>.
- DUARTE, R. F.; SAMPAIO, R. A.; BRANDÃO JÚNIOR, D. da. S.; FERNANDES, L. A.; SILVA, H. P. da. Crescimento inicial de Acácia em condicionador formado de fibra de coco e resíduo agregante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1176–1185, nov. 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001100007>.
- FIGUEREDO, N. A. de.; COSTA, L. M. da.; MELO, L. C. A.; SIEBENEICHLERD, E. A.; TRONTO, J. Characterization of biochars from different sources and evaluation of

release of nutrients and contaminants. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, n.3, p.395-403, 2017. <https://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20170046>.

GOLORAN, J. B.; CHEN, C. R.; PHILLIPS, I. R.; LIU, X. Transformation and plant uptake of ¹⁵N-labeled fertilizers mediated by ammonia-oxidizing bacteria in alkaline bauxite-processing residue sand amended with greenwaste compost. **Ecological Engineering**, v. 74, p. 68–78, 2015. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.118>>.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; DE ALMEIDA, A. Q.; JÚNIOR, J. I. T. de C. Sewage sludge derived biochar and its effect on the growth and morphological traits of eucalyptus grandis W.Hill ex maiden seedlings. **Ciencia Florestal**, v. 28, n. 2, p. 687–695, 29 jun. 2018. <https://dx.doi.org/10.5902/1980509832067>.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 11, p. 2281–2288, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.06.013>>.

KONG, X.; LI, M.; XUE, S.; HARTLEY, W.; CHEN, C.; WU, C.; LI, X.; LI, Y. Acid transformation of bauxite residue: Conversion of its alkaline characteristics. **Journal of Hazardous Materials**, v. 324, p. 382–390, 2017. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.073>>.

KUSIN, F. M.; RAHMAN, M. S. A.; MADZIN, Z.; JUSOP, S.; MOHAMAT-YUSUFF, F.; ARIFFIN, M.; Z, M. S. M. The occurrence and potential ecological risk assessment of bauxite mine-impacted water and sediments in Kuantan, Pahang, Malaysia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 2, p. 1306–1321, 2017. <<https://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7814-7>>.

MARTINS, G. C.; PENIDO, E. S.; ALVARENGA, I. F. S.; TEODORO, J. C.; BIANCHI, M. L.; GUILHERME, L. R. G. Amending potential of organic and industrial by-products applied to heavy metal-rich mining soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 162, n. July, p. 581–590, 2018. <<http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.040>>.

MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; DIAS, F. O.; BARBOSA, G. F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 42, n. 4, p. 471-476, 2012.

MOREIRA, R. S.; MINCATO, R. L.; SANTOS, B. R. Heavy metals availability and soil fertility after land application of sewage sludge on dystroferric red latosol. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37. n. 6 p. 512–520. 2013.

MORENO-BARRIGA, F.; DÍAZ, V.; ACOSTA, J. A.; MUÑOZ, M. Á.; FAZ, Á.; ZORNOZA, R. Creation of technosols to decrease metal availability in pyritic tailings with addition of biochar and marble waste. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 7, p. 1943–1951, 2017. <<https://doi.org/10.1002/ldr.2714>>.

PARK, J. H.; CHOPPALA, G. K.; BOLAN, N. S.; CHUNG, J. W.; CHUASAVATHI, T. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. **Plant and Soil**, v. 348, p. 439–451. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0948-y>.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.761-768, 2012. <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000700009>.

RASHTI, M. R.; ESFANDBOD, M.; PHILLIPS, I. R.; CHEN, C. Rhizosphere management by biochar and leaching improved plant performance in fresh bauxite residue sand. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 66–74, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.013>>.

RESENDE, A. V. de.; FURTINI NETO, A. E.; MARTINS, E. de. S.; HURTADO, S. M. C.; OLIVEIRA, C. G. de.; SENA, M. C. de. **Protocolo de avaliação agrônômica de rochas e produtos derivados como fontes de nutrientes às plantas ou condicionadores de solo**. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas. Documentos 143, 2012. 30p.

SILVA, D. R. G.; MARCHI, G.; SPEHAR, C. R.; GUILHERME, L. R. G.; REIN, T. A.; SOARES, D. A.; ÁVILA, F. W. Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 951–962, jun. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300025>.

SOUZA, F. N. da. S. **Potencial de agrominerais silicáticos como fonte de nutrientes na agricultura tropical**. 2014. 124 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SOUZA, E. S. de.; TEXEIRA, R. A.; COSTA, H. S. C. da.; OLIVEIRA, F. J.; MELO, L. C. A.; FAIAL, K. do. C. F.; FERNANDES, A. R. Assessment of risk to human health from simultaneous exposure to multiple contaminants in an artisanal gold mine in Serra Pelada, Pará, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 576, p. 683–695, jan. 2017. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.133>.

SOUZA, E. S. de.; DIAS, Y. N.; COSTA, H. S. C. da.; PINTO, D. A.; OLIVEIRA, D. M. de.; FALÇÃO, N. P. de. S.; TEIXEIRA, R. A.; FERNANDES, A. R. Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 169, p. 425–434, jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.032>.

TIAN, T.; ZHOU, J.; ZHU, F.; YE, Y.; GUO, Y.; HARTLEY, W.; XUE, S. Effect of amendments on the leaching behavior of alkaline anions and metal ions in bauxite residue. **Journal of Environmental Sciences**, v. 85, p. 74–81, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.05.005>>.

UJACZKI, É.; KLEBERCZ, O.; FEIGL, V.; MOLNÁR, M.; MAGYAR, Á.; UZINGER, N.; GRUIZ, K. Environmental toxicity assessment of the spilled ajka red mud in soil microcosms for its potential utilisation as soil ameliorant. **Periodica**

polytechnica chemical engineering, v. 59, n. 4, p. 253–261, 2015.
<<https://dx.doi.org/10.3311/PPch.7839>>.

ZHU, F.; LIAO, J.; XUE, S.; HARTLEY, W.; ZOU, Q.; WU, H. Evaluation of aggregate microstructures following natural regeneration in bauxite residue as characterized by synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. **Science of The Total Environment**, v. 573, p. 155–163, 2016.
<<https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.108>>.

2. PRODUÇÃO DE CONDICIONADORES DE SOLO À BASE DE RESÍDUOS DE BAUXITA E DA PALMA DE ÓLEO.



Acesso ao artigo publicado
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155413>.

RESUMO

O resíduo de bauxita (RB) é um subproduto do processo Bayer, principal tecnologia para a produção de alumina, tendo como principais características alcalinidade e sodicidade, além da presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Várias alternativas vêm sendo estudadas para a utilização de RB em novos produtos. Porém, a maior dificuldade é o escalonamento das tecnologias, uma vez que os resíduos apresentam particularidades decorrentes da bauxita e do circuito de processamento, além de elevado volume produzido no mundo (150 milhões de toneladas anuais). A incorporação de RB à matéria orgânica é uma alternativa sustentável para a melhoria da qualidade físico-química do RB, podendo viabilizar seu uso como condicionador de solos. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físico-químicas (N total, carbono orgânico, capacidade de retenção de água, capacidade de troca catiônica, relação carbono-nitrogênio, granulometria, macronutrientes, micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos) de condicionadores gerados pelo incremento de RB sob diferentes resíduos orgânicos da palma de óleo. O experimento foi conduzido em vasos de polipropileno em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado. Foram utilizados sete tratamentos em fatorial ($3 \times 2 + 1$) que consistiam em três proporções de RB (25, 50 e 75%) incorporados em dois tipos de resíduos orgânicos; (1) resíduos orgânicos da palma de óleo (fibras do cacho, bucha do cacho e borra) em processo de compostagem- POMW e (2) composto dos resíduos da palma de óleo misturados- POC, e mais um controle. Os tratamentos que incluem 25% de RB e material orgânico da palma de óleo compostado (T2) ou material orgânico em compostagem (T1) constituem produtos que atendem aos pressupostos para o incremento de propriedades físico-químicas do solo, enquadrados como condicionadores de solo. No entanto, a formulação constituída por material orgânico compostado e RB (T2) foi a que apresentou os melhores parâmetros de qualidade para o condicionamento de solos. Assim, a alcalinidade, sodicidade, conteúdo de EPTs e a densidade mais altos no RB diminuíram, além disso, houve incremento significativo na CTC, CRA, CO, N total, macro e micronutrientes. Sendo assim, o RB incorporado à resíduos da palma de óleo torna-se uma fonte potencial para o uso como condicionador de solos ácidos e acima de tudo é uma alternativa importante para a redução do volume de resíduos estocados, transformando passivos ambientais em produtos que promovam a melhoria das características físico-químicas do solo.

Palavras-chave: Compostagem; condicionador de solos; estratégia sustentável; palma de óleo.

ABSTRACT

Bauxite residue (BR) is a by-product of the Bayer process, the main technology for alumina production, and its main characteristics are alkalinity and sodicity, in addition to the presence of potentially toxic elements (PTEs). Several alternatives have been studied for the use of BR in new products. However, the greatest difficulty is the scaling up of technologies, since the waste has particularities arising from bauxite and the processing circuit, besides the high volume produced worldwide (150 million tons annually). The incorporation of BR to organic matter is a sustainable alternative for improving the physical and chemical quality of BR, and may enable its use as a soil conditioner. Thus, we investigated the increase of BR in organic residues from oil palm aiming to decrease alkalinity, sodicity, PTEs and obtain a soil conditioner. The experiment was conducted in polypropylene pots in a greenhouse in an entirely randomized design. Seven treatments were used in factorial ($3 \times 2 + 1$) consisting of three proportions of BR (25, 50 and 75%) incorporated into two types of organic residues; (1) organic waste from oil palm in composting process and (2) compost from oil palm waste, and one more control. The treatment with the lowest BR increment (25%) and with composted waste showed similar temperature to the standard composting process. Treatments that include 25% BR and composted oil palm organic material (T2) or composted organic material (T1) constitute products that meet the assumptions for soil fertility enhancement. However, the formulation consisting of composted organic material and BR was the one that presented the best quality parameters for soil conditioning. The alkalinity, sodicity, PTEs content and density decreased, in addition, there was significant increase in CEC, WRC, OC, total N, macro and micronutrients. Thus, the use of BR incorporated into organic matter is a potential source for the conditioning of tropical soils, and above all the preparation of by-products from BR with agronomic and environmental character is an important alternative for reducing the volume produced, transforming environmental liabilities into products that promote the improvement of soil quality.

Keywords: Composting; soil conditioner; sustainable strategy; oil palm

2.1 Introdução

A produção brasileira de bauxita ocupa o terceiro lugar no mundo, com 50 milhões de toneladas, atrás apenas da China, com 65 milhões e Austrália com 81 milhões de toneladas anuais. A bauxita é um minério proveniente do intemperismo de uma assembleia mineral, formada por oxihidróxidos de alumínio, quartzo, caulinita, hematita, goethita entre outros, sendo esta a principal fonte para a obtenção do óxido de alumínio (alumina), precursor para a produção do alumínio metálico, um dos metais mais usados no mundo (JONES; HAYNES, 2011; KUSIN et al., 2017; AMB, 2018).

A principal rota para a obtenção da alumina é o Processo Bayer, que consiste na lixiviação cáustica da bauxita com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), em temperatura próxima a 145°C (EVANS, 2016). Entretanto, a variabilidade natural da bauxita implica em particularidades em cada unidade de produção, resultando em resíduos de bauxita de composição mineralógicas e propriedades físico-químicas diferentes (KLAUBER et al., 2011).

O processo Bayer gera um subproduto denominado resíduo de bauxita (RB), que no geral pode conter; As, Cd, Cr, Cu, Pb, Mn, Hg e Zn, além, de alcalinidade (pH 10-13) e sodicidade (PST 40-90%) (COURTNEY et al., 2018; XUE et al., 2018; DI CARLO et al., 2019b; DONG et al., 2019; RASHTI et al., 2019). Em média, para cada tonelada de alumina são geradas de 0,8-1,5 toneladas de RB (KONG et al., 2017; DI CARLO et al., 2019a; RASHTI et al., 2019).

Apesar dos esforços para o aumento da eficiência do processo Bayer, estima-se a produção mundial anual de 150 milhões de toneladas e um inventário global de 4,6 bilhões de toneladas de RB (ARAÚJO et al., 2020), no qual, é reaproveitado apenas 2 a 3% do volume total (UJACZKI et al., 2018). Logo, iniciativas para o reaproveitamento deste material em grande escala são essenciais e desafiadoras para o aumento da sustentabilidade da cadeia do alumínio, afim de fornecer uma solução para bilhões de toneladas armazenadas (GRÄFE et al., 2011; POWER et al., 2011).

Em dados, as principais pesquisas com RB foram focadas no tratamento e revegetação dos depósitos de resíduos sólidos, aplicação na construção civil (blocos e briquetes, substituição no clínquer de cimento, agregados), geopolímeros, recuperação de metais e elementos terras-raras, tratamento de drenagem ácida de minas e gases, entre outros (KLAUBER et al., 2011; COURTNEY; HARRINGTON, 2012; JONES et al., 2012a; EVANS, 2016; UJACZKI et al., 2018; DI CARLO et al., 2019a; DEY, 2021).

A aplicação agronômica do RB em solos agrícolas não é recomendada devido a possibilidade de fitotoxidez pelo excesso de sódio e alcalinidade (KLAUBER et al., 2011). Entretanto, há evidências científicas que a aplicação de determinadas doses de RB em solos ácidos, não afetaria a comunidade microbiana e poderia melhorar a retenção de água, aumentar o pH e o nível de nutrientes, melhorando a fertilidade do solo (KLAUBER et al., 2011; UJACZKI et al., 2016; FEIGL et al., 2017). Porém, a pesquisa atual deve-se aprofundar na melhoria físico-química do RB antes da aplicação no solo, diminuindo a alcalinidade e sodicidade.

A incorporação de matéria orgânica vem sendo avaliada como alternativa para a revegetação de depósitos de RB, com resultados promissores. Pesquisas demonstram que a adição de compostos orgânicos resultou na redução da alcalinidade e sodicidade do resíduo, bem como o aumento da CTC, N, K, Ca, Mg, P e micronutrientes, além de promoção da agregação das partículas finas (BANNING et al., 2014; BRAY et al., 2018; SANTINI; FEY, 2018; RASHTI et al., 2019; DI CARLO et al., 2020; TIAN et al., 2020).

Desta forma, o uso do RB incorporado a materiais orgânicos pode melhorar as condições físico-químicas do RB pela liberação de ácidos orgânicos, através da fermentação microbiana (SANTINI et al., 2016; XUE et al., 2020). Logo, estudos deste mecanismo seria um ponto inicial para desenvolvimento de formulações envolvendo RB e matéria orgânica. Entretanto, não existem pesquisas considerando o processo de incorporação de RB com fontes de matéria orgânica, tendo como objetivo a produção de condicionadores de solo. Tal produto poderia ser usado para a correção do pH, aumento da capacidade de retenção da água e da CTC, resultando no aumento da fertilidade de solos tropicais ácidos. (KLAUBER et al., 2011; UJACZKI et al., 2016; FEIGL et al., 2017).

Nesse contexto, o Estado do Pará, maior província mineral do Brasil, além de ser responsável por 91% da produção de bauxita no país e maior produtor de alumina, também possui grandes cadeias agroindustriais, geradoras de excedentes de matéria orgânica, por exemplo, a palma de óleo, coco e açaí, que poderiam ser incorporadas ao RB na geração de um novo produto destinado a melhoria dos solos tropicais ácidos, característicos da maior parte do país (AMB, 2018).

Portanto, a hipótese é que a adição de RB aos resíduos orgânicos da palma de óleo reduza a sodicidade, alcalinidade e conteúdo de elementos potencialmente tóxicos do RB e estabeleça um composto com características físico-químicas equivalentes para o uso como condicionador de solos, seguindo as exigências da legislação brasileira. Para tal, o

objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físico-químicas (N total, carbono orgânico, capacidade de retenção de água, capacidade de troca catiônica, relação carbono-nitrogênio, granulometria, macronutrientes, micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos) de condicionadores de solo gerados pela associação de RB sob diferentes resíduos orgânicos da palma de óleo.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Materiais usados

Para a formulação dos condicionadores de solo foram utilizadas proporções diferentes de RB, resíduos orgânicos da palma de óleo (POMW) compreendidos por: fibras do cacho, bucha do cacho e borra na proporção (0,6/1/0,03), além do composto dos resíduos da palma de óleo misturado (POC) que é subproduto do processo de compostagem da agroindústria (Figura 1).



Figura 1. Materiais utilizados em ensaio de formulação de condicionador de solo. RB: resíduo de bauxita; resíduos orgânicos da palma de óleo (POMW): fibra, bucha e borra; composto de resíduos orgânicos da palma de óleo (POC): produto de compostagem da agroindústria.

A amostra de RB utilizada no estudo foi cedida por uma refinaria de alumina situada no Estado do Pará. O material orgânico é proveniente de resíduos de uma agroindústria de processamento de palma de óleo, também situada no Pará.

2.2.2 Local do estudo e delineamento

O experimento foi desenvolvido em condições de casa de vegetação na Universidade Federal Rural da Amazônia em Belém-Pará (784597.00 E; 9839167.00 S, UTM) (Figura 2). A região é classificada como bioma Amazônico, com o tipo climático "Ami" de acordo com a classificação internacional de Köppen (Alvares et al., 2013), com distribuição de chuva definida em duas estações anuais, chuva intensa de dezembro a maio e moderadamente chuvosa de junho a novembro.

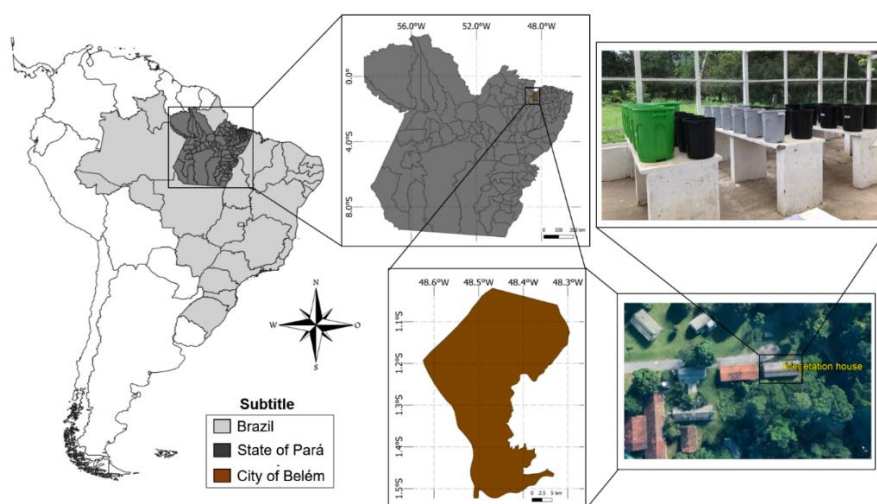


Figura 2. Localização da montagem e da condução de experimento para formulação de condicionador de solo.

Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $3 \times 2 + 1$, totalizando sete tratamentos com quatro repetições cada. O primeiro fator consistiu em três proporções de RB (25, 50 e 75% p/p). O segundo fator foi constituído por dois tipos de materiais orgânicos oriundos da agroindústria de óleo de palma (p/p), sendo (1) resíduos orgânicos em compostagem POMW (fibras do cacho, bucha do cacho e borra) e (2) composto dos resíduos orgânicos POC. E o tratamento controle foi caracterizado por 100% de resíduos orgânicos em compostagem (POMW) sem incremento de RB.

Nos tratamentos que possuíam resíduos orgânicos em compostagem houve o enriquecimento com 2% de N (sulfato de amônio) para obtenção de uma relação C/N próxima a 30. A Tabela 1 apresenta a composição dos tratamentos.

Tabela 1. Disposição dos tratamentos em ensaio de formulação de condicionador de solos à base de resíduo de bauxita e material orgânico.

Tratamentos	RB	Resíduos orgânicos em compostagem (POMW)	Composto de resíduos orgânicos (POC)
	------(%)-----		
T1	25	75	0
T2	25	0	75
T3	50	50	0
T4	50	0	50
T5	75	25	0
T6	75	0	25
Controle	0	100	0

As proporções de RB utilizadas nos tratamentos, levaram em consideração o mínimo definido na escalabilidade de uso do resíduo, em atendimento aos objetivos do International Aluminium Institute, que definiu que a reutilização do RB até 2025 deve alcançar pelo menos 20%.

Os tratamentos foram alocados em vasos de polipropileno de 60L com furos de 5 mm de diâmetro no fundo e nas laterais. E pela diferença de densidade dos materiais orgânicos e RB, os tratamentos com maior concentração de RB tiveram menor volume (p/p). Sendo assim, os vasos que eram constituídos por resíduos orgânicos em compostagem e RB ficaram com 9 kg de material, já os vasos com composto de resíduos orgânicos e RB ficaram com 7,5 kg. Para normatização a montagem seguiu a seguinte ordem: 1ª camada 50% dos resíduos orgânicos; 2ª camada 100% do RB e 3ª camada 50% dos resíduos orgânicos.

A umidade dos tratamentos foi ajustada para 60% da capacidade de retenção de água (CRA). Na primeira quinzena a cada três dias o material de cada vaso foi revolvido manualmente, na segunda quinzena o revolvimento passou a ser semanal e no último mês de ensaio foram somente dois revolvimentos com posterior adição de água conforme a necessidade de cada tratamento.

A temperatura foi aferida diariamente com a utilização de um termômetro tipo espeto Simpla TE07. Amostras foram coletadas durante o ensaio para a determinação do pH e CE dos tratamentos. No fim do ensaio aos noventa dias, amostras foram coletadas para a avaliação físico-química dos tratamentos.

2.2.3 Caracterização do resíduo de bauxita

O pH e a condutividade elétrica (CE) foram determinados em água na proporção 1:5 (m/v) em equipamento Thermo Scientific Orion Star A211 e condutivímetro Hanna, modelo HI 2030, respectivamente. Para a determinação química elementar, a amostra de RB foi digerida pela técnica de fusão com peróxido de sódio em cadinho de zircônio em temperatura baixa (DANIEL et al., 2017) e a concentração determinada por espectrometria de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

Particularmente para o Na, devido a alta concentração, a amostra do RB foi prensada sob a forma de pastilha com 5 g e 30% de aglutinante e analisada via Fluorescência de raios-X (FRX), modelo Epsilon 3^{XLE} da PANalytical, com tubo de ródio. A análise mineralógica foi realizada pelo método do pó, com preparação *backloading*, via Difractometria de Raios-X, com tubo de cobalto, em equipamento modelo Empyrean da PANalytical (HOLANDA et al., 2020).

2.2.4 Caracterização dos materiais orgânicos

O pH e a CE dos resíduos orgânicos em compostagem (fibras do cacho, bucha do cacho e borra) e composto de resíduos orgânicos foram determinados em água na proporção 1:5 (m/v) em equipamento Thermo Scientific Orion Star A211 e condutivímetro Hanna modelo HI 2030, respectivamente.

A composição química dos materiais orgânicos foi digerida pelo método da água régia (MCGRATH; CUNLIFFE, 1995) e a composição química elementar determinada por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado ICP-MS.

A concentração dos elementos carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foi determinada pelo método da combustão, em Analisador Elementar Perkin-Elmer CHNS/O 2400 Series II.

2.2.5 Propriedades físico-químicas dos tratamentos

Nos tratamentos estabelecidos foram determinados, o pH, CE, carbono orgânico total, N total, relação carbono nitrogênio, capacidade de troca catiônica, capacidade de retenção de água, umidade, macronutrientes, micronutrientes, elementos potencialmente tóxicos, densidade e granulometria.

O pH e a CE dos tratamentos foram determinados em água na proporção 1:5 (m/v), como descrito na caracterização dos materiais. O carbono orgânico total foi quantificado

por digestão com dicromato de potássio e determinado por titulometria (FONTANA; CAMPOS, 2017). A quantificação de N total foi realizada seguindo o método denominado macrométodo da liga de Raney, aplicável em fertilizantes. A relação C/N foi determinada pelo cálculo da relação entre a quantidade de carbono e nitrogênio total (BRASIL, 2017). A determinação da capacidade de troca catiônica (CTC) foi fundamentada na ocupação dos sítios de troca do material com íons hidrogênio, provenientes de uma solução diluída de ácido clorídrico, eliminação do excesso de ácido, deslocamento dos íons hidrogênio adsorvidos com solução de acetato de cálcio e titulação do ácido acético formado (BRASIL, 2007).

A CRA e a umidade a 65°C foram determinados pelo método gravimétrico em espuma fenólica em estufa, conforme descrito no manual de métodos analíticos oficiais para substratos e condicionadores de solo do MAPA (BRASIL, 2007).

A concentração total dos elementos potencialmente tóxicos foi determinada de acordo com a metodologia US EPA 3051 e o Cr hexavalente pelo método US EPA 3060a, em espectrômetro de absorção atômica (AAS) (ELEMENT, 1994, ELEMENT, 1996). A determinação de Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu e Zn também foi realizada em AAS. K e Na foram determinados por espectrometria de emissão atômica (AES).

O P total foi determinado pelo método gravimétrico de Quimociac, que consiste na solubilização do fósforo da amostra por extração fortemente ácida e posterior precipitação do íon ortofosfato (BRASIL, 2017). A determinação do enxofre ocorreu por ataque com HCl, precipitação com BaCl₂, calcinação do BaSO₄ e determinação gravimétrica do precipitado (CAMPOS; TEIXEIRA, 2017).

A densidade de partícula das amostras foi determinada pela secagem em estufa, sendo que a determinação do volume foi realizada pela diferença entre a quantidade de líquido necessária para preencher um recipiente e a quantidade do líquido necessário para completar o recipiente contendo a amostra, denominado picnômetro (VIANA et al., 2017).

Para a avaliação morfológica, micrografias das amostras foram geradas por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo Vega 3 (Tescan), com detector de elétrons secundários e filamento de tungstênio, após recobrimento das amostras com ouro em metalizador, modelo Desk V (Denton Vacuum). As micrografias foram feitas em aumento de 200 a 500 vezes. O RB foi completamente separado do material orgânico para a avaliação da granulometria. A amostra em forma de pó (após secagem) foi avaliada

por Difração a Laser, via úmida, utilizando-se água como dispersante, sem ultrassom, em analisador modelo Mastersizer 3000 da Malvern Panalytical.

2.2.6 Análise estatística

A normalidade e a homocedasticidade dos dados foram testadas para todas as propriedades medidas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett ($p < 0,05$), respectivamente. Os valores foram reportados como médias e para avaliar diferenças entre tratamentos utilizou-se do Teste de Student-Newman-Keuls ($p < 0,05$).

Após verificação da adequação dos dados pelos testes de Kaiser-Meyer-olkin's (KMO) e Bartlett, a análise de componentes principais foi realizada com rotação Varimax. Autovalores maiores que 1 foi o critério para a seleção dos fatores, sendo que a carga do fator maior que 0,5 foi considerada como o nível mais baixo de significância (GAUTAM et al., 2018). Para explorar a relação dos tratamentos com os parâmetros avaliados aplicou-se uma análise de agrupamento de Cluster.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Caracterização físico-química dos materiais do ensaio

A mineralogia do resíduo de bauxita (RB) indicou predominância das fases minerais: hematita (Fe_2O_3), goethita aluminosa ($(\text{AlFe})\text{OOH}$), anatásio (TiO_2), sodalita ($\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_2$) e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), conforme identificado no difratograma do DRX mostrado na Figura 3 (HOLANDA et al., 2020). A composição química foi semelhante a encontrada por Snars; Gilkes, (2009) e Braga et al. (2018) no Brasil.

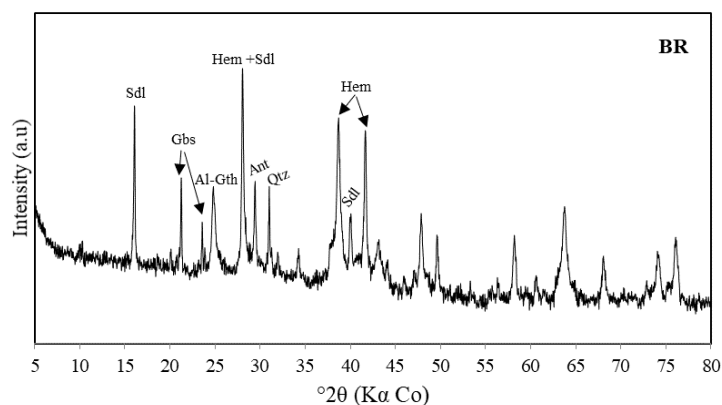


Figura 3. Difratograma do resíduo de bauxita obtido por DRX. Quartz (Qtz), hematite (Hem), sodalite (Sdl), anatase (Ant), aluminous goethite (Al-Gth), gibbsite (Gbs) and calcite (Cal).

Os elementos associados aos minerais (% de óxidos), determinados por XRF, eram: Fe₂O₃ (36.75%), Al₂O₃ (20.09%), SiO₂ (15.55%), Na₂O (10.27%), TiO₂ (5.18%), CaO (1.35%), ZrO₂ (0.86%), SO₃ (0.16%) e V₂O₅ (0.14%) (HOLANDA et al., 2020).

O pH das fontes de matéria orgânica variou entre 6,78 a 8,79, sendo que, o composto apresentou o maior valor (Tabela 2). O pH e a CE do RB apresentaram valores maiores, sendo caracterizado alcalino.

Tabela 2. Concentração total de elementos, pH e condutividade elétrica (CE) dos materiais usados na formulação de condicionador de solo.

Propriedades	Unidades	Resíduos orgânicos em compostagem (POMW)				Composto de resíduos orgânicos (POC)
		RB ^a	Fibra	Bucha	Borra	
pH H ₂ O	-	12,09	6,78	7,5	7,46	8,79
C.E	mS.cm ⁻¹	4,01	2,95	4,38	4,75	2,73
P	g kg ⁻¹	0,6	1,07	1,3	2,01	1,97
K	g kg ⁻¹	<LD	7,4	21	12,9	13,8
Ca	g kg ⁻¹	8,4	3,7	4,1	9,9	8,2
Mg	g kg ⁻¹	0,3	1,8	1,7	2,9	2,6
S	g kg ⁻¹	0,64	1,4	1,5	2,4	2,2
Na	g kg ⁻¹	76,18	0,3	0,3	0,3	0,3
Al	g kg ⁻¹	113,5	0,3	0,2	1,4	2,1
Fe	g kg ⁻¹	177	1,2	0,8	9,7	7,6
Zn	mg kg ⁻¹	23,0	28,0	36,0	41,0	37,0
Cu	mg kg ⁻¹	<LD	14,2	14,7	29,6	19,7
Mn	mg kg ⁻¹	1196	40,0	55,0	144,0	68,0
Mo	mg kg ⁻¹	<LD	0,2	0,2	0,6	0,3
B	mg kg ⁻¹	<LD	10,0	20,0	20,0	20,0
As	mg kg ⁻¹	<LD	0,3	0,4	0,5	0,8
Cd	mg kg ⁻¹	<LD	0,06	0,03	0,06	0,04
Pb	mg kg ⁻¹	147	1,3	1,6	1,3	0,9
Cr	mg kg ⁻¹	196,5	21	21	33	24
Hg	mg kg ⁻¹	0,22	<LD	<LD	<LD	<LD
Ni	mg kg ⁻¹	<LD	9	9,9	13,6	7,5
Se	mg kg ⁻¹	<LD	0,3	0,3	0,6	0,8
C	%	-	47,5	45	35,7	40,4
N	%	-	1,12	1,41	1,95	2,27
C/N ^b	-	-	43	32	19	18

^aResíduo de bauxita; ^b Relação carbono-nitrogênio; <LD inferior ao limite de detecção.

Os principais elementos constituintes do RB foram o Fe (177 g kg⁻¹), Al (113,5 g kg⁻¹) e Na (76,18 g kg⁻¹). A concentração dos elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Pb, Cr, Hg, Ni e Se) ficou próximo ao limite de detecção nos materiais orgânicos.

Todos os materiais orgânicos quando comparado ao RB apresentaram os maiores valores de elementos considerados nutrientes para plantas como P, K, Ca, Mg, S, Zn e Cu, além da alta quantidade de carbono e relação C/N que é baixa em RB (DUNGANI et al., 2018). Apesar do teor de Mn ser inferior ao do RB, o material orgânico apresentou valor relevante ($40\text{-}144\text{ mg kg}^{-1}$) ao desenvolvimento de plantas, assim como o Boro ($10\text{-}20\text{ mg kg}^{-1}$).

2.3.2 pH, condutividade elétrica e temperatura dos tratamentos

Temperatura, pH, CE, relação C/N, oxigênio/aeração e umidade são indicadores fundamentais da evolução do processo de compostagem (AZIM et al., 2018). Os tratamentos do ensaio iniciaram o processo de compostagem com valores de pH entre 9,5 e 11,9 (Figura 4a).

O pH dos tratamentos alterados com as maiores taxas de RB (50-75%) apresentou valores mais elevados, devido à alcalinidade inerente do RB (POWER et al., 2011). Após noventa dias, os tratamentos com até 50% de RB com resíduos orgânicos em compostagem (T1 e T3), apresentaram pH menor que 10 e foram similares ao controle. Contudo, quando a concentração de RB se elevou nos tratamentos, o pH permaneceu superior a 10, devido ao tamponamento do resíduo. Sob compostagem convencional, espera-se uma acidificação inicial do pH através da geração de ácidos orgânicos, resultado da decomposição da matéria orgânica, seguido de um aumento do pH devido a amônia liberada pela hidrólise de proteínas e nitrogênio orgânico, e estabilização após a volatilização da amônia ($\text{pH} > 8,0$) atingindo a neutralidade na maturação do composto (AZIM et al., 2018).

O elevado pH dos tratamentos com maior presença de RB é devido ao processo Bayer que faz a digestão da bauxita em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), promovendo a alcalinidade característica ($\text{pH} > 10$), que permanece mesmo após o processo de filtragem que é realizado para remover o NaOH (Silva et al., 2020). Sendo assim, a natureza alcalina do RB e o tamponamento do pH é a base química para o uso proposto como condicionador de solo (HOLANDA et al., 2020).

A CE variou de $2\text{-}4\text{ mS cm}^{-1}$ respondendo as concentrações crescentes de RB (Figura 4b). Os tratamentos que continham RB acrescido de composto de resíduos orgânicos apresentaram CE superior aos tratamentos que possuíam resíduos orgânicos em compostagem. Em geral, a CE do RB varia de $0,7\text{ a }18,2\text{ mS cm}^{-1}$, dependendo da origem

da bauxita e dos processos industriais (SNARS; GILKES, 2009). Ao fim do ensaio, todos os tratamentos apresentaram CE próximas e inferiores a 4 mS cm^{-1} . Em experimentos com RB em colunas de lixiviação, observou-se uma redução nos valores de CE após a incorporação de biossólido, que foi atribuída à inibição da dissolução mineral pelos carboidratos e ácidos orgânicos gerados durante a decomposição de biossólidos (TIAN et al., 2019).

A dinâmica da temperatura durante o ensaio foi típica de um processo padrão de compostagem para alguns tratamentos (controle, T1 e T3) (Figura 4c). Houve um aumento da temperatura após os primeiros 12 dias, o que é muito semelhante ao relatado para o estágio termofílico tradicional de compostagem ($>40^\circ\text{C}$) (AZIM et al., 2018). No tratamento controle, a temperatura alcançou 47°C , enquanto nos demais, somente os tratamentos com 25 e 50% de RB e resíduos orgânicos em compostagem (T1 e T3) ultrapassaram os 40°C , sugerindo que não houve influência do RB sobre a atividade microbiana durante a decomposição da matéria orgânica.

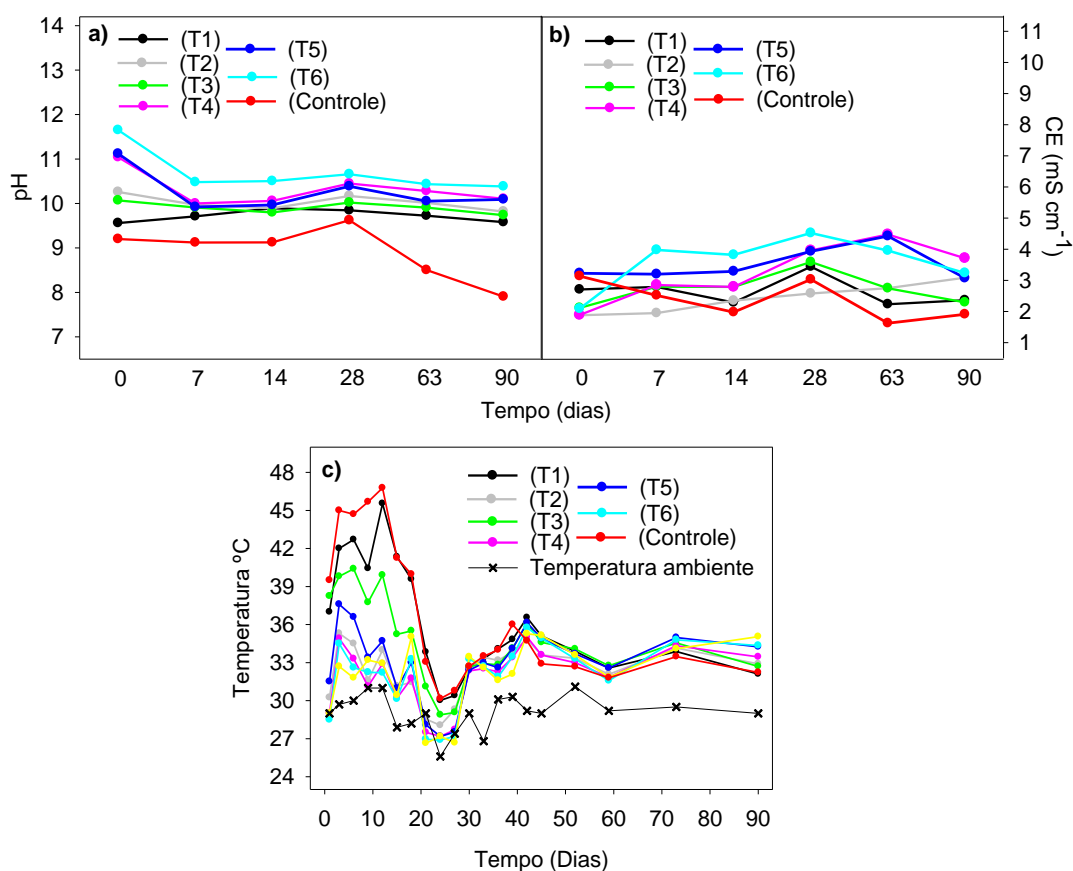


Figura 4. pH (a), condutividade elétrica (b) e temperatura (c) durante a condução do experimento de formulação de condicionador de solo. T1: 25% RB + 75% POMW; T2: 25% RB + 75% POC; T3: 50% RB + 50% POMW; T4: 50% RB + 50% POC; T5: 75% RB + 25% POMW; T6: 75% RB + 25% POC; controle: 100% POMW sem RB.

A temperatura em pilhas de compostagem aumenta a partir da fase mesófila (25-40°C) para a fase termófila (35-65°C) nos primeiros dias, como resultado da atividade microbiana na quebra das ligações de carbono, gerando calor, seguido de diminuição da temperatura após o consumo de carbono lábil (fase fria) até a maturação do composto (Azim et al., 2018). No estudo, curvas típicas de compostagem em relação a temperatura foram observadas no controle, T1 e T3 alterado com 25% de RB. Picos de temperatura semelhantes foram observados durante compostagem de Bucha e efluente (resíduos da palma de óleo), com temperatura máxima variando entre 40 e 45 °C (HAU et al., 2020).

Os tratamentos contendo composto de resíduos da palma de óleo (T2, T4 e T6) apresentaram uma redução geral na temperatura quando comparado com os resíduos POMW (T1, T3 e T5), provavelmente devido à decomposição da matéria orgânica durante a primeira compostagem dos resíduos, inibindo a atividade microbiana pela falta de açúcares e nutrientes prontamente disponíveis. No entanto, considerando estes tratamentos, a alteração na temperatura não trazia benefícios aos tratamentos, somente as alterações físico-químicas.

Após 25 dias, as curvas de temperatura foram muito semelhantes em todos os tratamentos e controle. Temperaturas internas mais altas podem ser alcançadas com o aumento das pilhas, evitando perdas de calor nas zonas externas e melhor ajuste da relação C/N, aumentando a atividade microbiana (INSAM; BERTOLDI, 2007; HAU et al., 2020).

2.3.3 Propriedades físico-químicas dos tratamentos

As normativas de produção e comercialização dos condicionadores de solo no Brasil são fornecidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2006). De acordo com a Seção V da instrução normativa número 35, de 4 de julho de 2006 (Brasil, 2006), os condicionadores de solo podem ser produzidos a partir de matérias-primas industriais ou agroindustriais, podendo conter sódio (Na^+) e elementos potencialmente tóxicos (EPTs), sendo classificados como "Classe B", tendo capacidade de retenção de água $\geq 60\%$ e capacidade de troca catiônica $\geq 200 \text{ mmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$, quando os produtos são destinados a melhorar as propriedades físicas e físico-químicas dos solos.

Nesse estudo, a CTC só foi satisfeita pelo tratamento controle ($275 \text{ mmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$) e no T2 ($243 \text{ mmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$) (Figura 5a), enquanto a CRA (Figura 5b) foi plenamente satisfeita

(100-130%) por todos os tratamentos propostos. Os tratamentos com 50% RB (T4) e 75% RB (T6) não apresentaram diferenças estatísticas na CTC ($p < 0,05$). Este resultado sugere que as formulações de condicionadores de solo com >25% RB podem ser potencialmente melhoradas com o aperfeiçoamento ou prolongamento do tempo, aumentando a CTC e atendendo os requisitos estabelecidos na legislação brasileira.

Aumento da CTC em RB neutralizado com ácido nitrohúmico, foi observado devido à associação de ácido húmico e fúlvico com cátions, que também foi responsável pela formação de partículas organominerais (REN et al., 2021). Provavelmente a maior presença de ácidos húmicos e fúlvicos nos compostos de resíduos da palma de óleo é a razão para a melhoria da CTC nestes tratamentos. No geral, não houve alterações significativas nas propriedades físico-químicas dos condicionadores comparando os resíduos orgânicos POMW e o POC associados ao RB.

Se houver interesse na declaração do teor de nutrientes, carbono orgânico e relação carbono nitrogênio, os condicionadores de solo devem apresentar as mesmas garantias que os fertilizantes orgânicos estabelecidos na instrução normativa número 61, de 8 de julho de 2020, mostrando relação $C/N \leq 20$; umidade $\leq 50\%$; carbono orgânico total $\geq 15\%$ e nitrogênio total $\geq 0,5\%$ (BRASIL, 2020; CHIARELOTTO et al., 2021).

Seguindo estes critérios, apenas T1, T2 e T6 mostraram relação carbono/nitrogênio abaixo de 20:1 (Figura 5c), embora não tenham sido observadas diferenças significativas ($p < 0,05$). Todos os tratamentos, com exceção do T1 e controle, apresentaram umidade $\leq 50\%$ (Figura 5d), embora não tenham sido observadas diferenças ($p < 0,05$) quando comparado com o T1. O controle e os tratamentos (T1, T2 e T3) atingiram o mínimo para a declaração do carbono orgânico (15%) (Figura 5e). E análogo ao carbono orgânico somente os tratamentos (controle, T1, T2 e T3) (Figura 5f) atingiram o nível mínimo de N total (0,5%).

O incremento de matéria orgânica ao RB aumenta o teor de carbono orgânico, diminui o pH, salinidade e aumenta o conteúdo de N total (JONES et al., 2011; COURTNEY et al., 2013; DONG et al., 2019). A matéria orgânica é essencial para a melhoria da qualidade do RB aplicado ao solo, contribuindo em muitas funções importantes tais como, aumento da capacidade de retenção de água; formação de uma estrutura estável; aumento da capacidade de troca de cátions; fornecimento de nutrientes através da mineralização e fonte de energia para microrganismos e fauna (DI CARLO et al., 2019b).

Muitos trabalhos têm reportado sobre o incremento de matéria orgânica para a reabilitação e remediação das áreas de disposição de resíduos (SANTINI; FEY, 2018; TIAN et al., 2019, 2020; REN et al., 2021; XUE et al., 2020). No entanto, nenhum dos trabalhos abordaram sobre o potencial do RB para uso como condicionador de solo após o incremento de resíduos orgânicos.

Devido aos benefícios expostos acima, os resultados demonstram que o uso de RB incorporado aos resíduos da indústria de óleo de palma (POMW ou POC) pode viabilizar produção de um condicionador de solo que atenda as exigências da legislação brasileira.

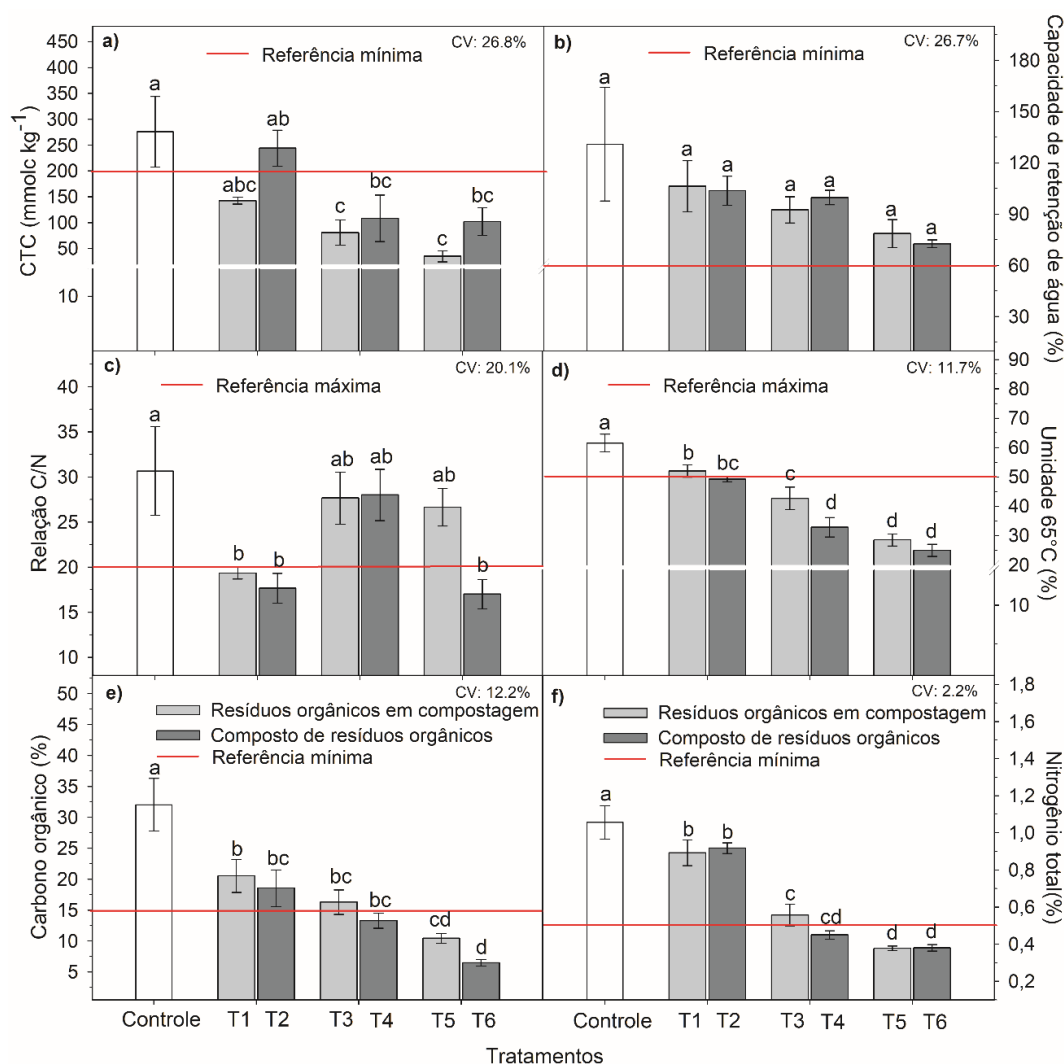


Figura 5. Parâmetros de qualidade de condicionador de solo e fertilizante orgânico composto para a formulação de condicionador de solo. T1: 25% RB + 75% POMW; T2: 25% RB + 75% POC; T3: 50% RB + 50% POMW; T4: 50% RB + 50% POC; T5: 75% RB + 25% POMW; T6: 75% RB + 25% POC; controle: 100% POMW sem RB. * a linha vermelha é a referência mínima e máxima relativa aos parâmetros estabelecidos pela Instrução normativa (IN) n° 35, de 04 de julho de 2006 para CRA e CTC e IN n° 61, de 8 de julho de 2020 para umidade, N total, carbono orgânico e relação C/N da secretaria de defesa agropecuária no Brasil. Letras iguais não diferem pelo teste de Student-Newman-Keuls SNK ($p < 0,05$).

Em relação aos macronutrientes e micronutrientes, a legislação brasileira não estabelece padrões de tolerância e registro para condicionadores de solo. Houve diferença ($p < 0,05$) entre os tratamentos para P, K, Ca, Mg, Na, Al, Fe e Zn (Tabela 3). Já os teores de S, Mn e Cu não diferiram ($p > 0,05$) entre os tratamentos aplicados. O T2 foi superior ($p < 0,05$) aos demais tratamentos quanto aos valores dos nutrientes P, Ca, Mg e Zn, porém quanto ao conteúdo de K, este foi inferior ($p < 0,05$) ao tratamento controle.

As concentrações de Fe, Al e Na foram mais elevadas nos condicionadores de solo contendo RB quando comparado com o controle, uma vez que estes elementos estão presentes no RB. Ao destacar apenas os tratamentos alterados com RB (T1-T6), o T1 apresentou valores inferiores ($p < 0,05$) de Fe, Al e Na. O tratamento T2 apresentou menor valor de Na e maior de Ca em relação aos demais tratamentos. A adição de Ca pela matéria orgânica desloca íons monovalentes como o Na a partir de sítios de troca. A razão para isso é que o Na é um cátion monovalente, logo não é fortemente mantido em locais de troca e é, portanto, facilmente lixiviado (JONES et al., 2012b). A matéria orgânica fornece a maior parte da superfície que retém os íons de Al (SNARS et al., 2004), como ocorrido para o T1 e T2 com menor concentração.

Além da maior presença de Ca e Mg da matéria orgânica, os ácidos produzidos pela matéria orgânica podem solubilizar minerais alcalinos presentes no RB como sodalita e calcita. A precipitação pluvial pode dissolver estes minerais e ocasionar perdas significativas dos elementos presentes, como Na e K (SANTINI; FEY, 2013; KONG et al., 2017). A melhoria do RB também pode estar relacionada com a ação da lixiviação, e ou a intervenção de ácidos orgânicos provenientes do material orgânico (BRAY et al., 2018).

A densidade dos tratamentos apresentou redução com o incremento de até 50% de material orgânico ao RB (T2, T3 e T4). O tratamento controle apresentou a menor densidade, característica de resíduo orgânico ($p < 0,05$) (tabela 3). Nesse sentido, o carbono orgânico pode agir como um importante agente ligante na formação de agregados, enquanto os metais presentes formam pontes entre os minerais e as moléculas orgânicas (XUE et al., 2019). Existe correlação da redução da densidade e o aumento do carbono orgânico e este efeito é mais marcado nas taxas mais altas de matéria orgânica (JONES et al., 2010).

A compostagem agregou pequenas partículas de RB, como mostra a figura 7. O tamanho médio das partículas de RB foi indicado pela variável $d(4;3)$, e houve um aumento de 71 μm no RB in natura para 241-268 μm nos tratamentos, independentemente

se era POMW ou POC. Mesmo nas concentrações mais elevadas de RB (75%), o tamanho médio das partículas passou para 196 μm e 171 μm em T5 e T6, respectivamente, devido ao acréscimo de material orgânico. Geralmente, o RB mostra uma estrutura segregada dominada por pequenas partículas (Ujaczki et al., 2018), e a alteração com matéria orgânica resultou na agregação dessas partículas e formação de macroporos, que podem aumentar o movimento de água.

Tabela 3. Concentração de elementos e densidade nas formulações de condicionador de solo obtidos após 90 dias de ensaio.

Propriedades	Tratamentos						
	Controle	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P (g kg^{-1})	2,9abc	4,2ab	5,0a	2,0bc	3,8ab	2,6bc	1,2c
K (g kg^{-1})	15,2a	10,1b	10,7b	6,4c	5,9c	3,5d	3,6d
Ca (g kg^{-1})	3,8c	3,8c	8,2a	3,8c	5,0b	3,7c	4,8b
Mg (g kg^{-1})	1,9ab	1,5bc	2,2a	1,0cd	1,2cd	0,7d	0,8d
S (g kg^{-1})	0,1a	0,12a	0,1a	0,32a	0,15a	0,25a	0,2a
Na (g kg^{-1})	0,2f	20,5e	32,3d	33,7d	46,8b	42,0c	55,3a
Al (g kg^{-1})	2,5f	31,0e	53,0d	58,0cd	66,9bc	75,1ab	83,1a
Fe (g kg^{-1})	4,0d	70,3c	111,1b	106,0b	139,0ab	129,0ab	152,0a
Mn (mg kg^{-1})	52,0b	59,2ab	87,5a	55,2ab	67,1ab	48,6b	70,9ab
Cu (mg kg^{-1})	34,5a	37,4a	35,0a	27,6a	28,6a	25,5a	30,1a
Zn (mg kg^{-1})	28,8ab	23,4ab	35,0a	21,1ab	22,7ab	17,3b	20,4ab
Densidade (g cm^{-3})	0,75b	0,95a	0,90a	0,91a	0,89a	0,99a	0,97a

T1: 25% RB + 75% POMW; T2: 25% RB + 75% POC; T3: 50% RB + 50% POMW; T4: 50% RB + 50% POC; T5: 75% RB + 25% POMW; T6: 75% RB + 25% POC; controle: 100% POMW sem RB. Letras iguais não diferem pelo teste de Student-Newman-Keuls SNK ($p < 0,05$).

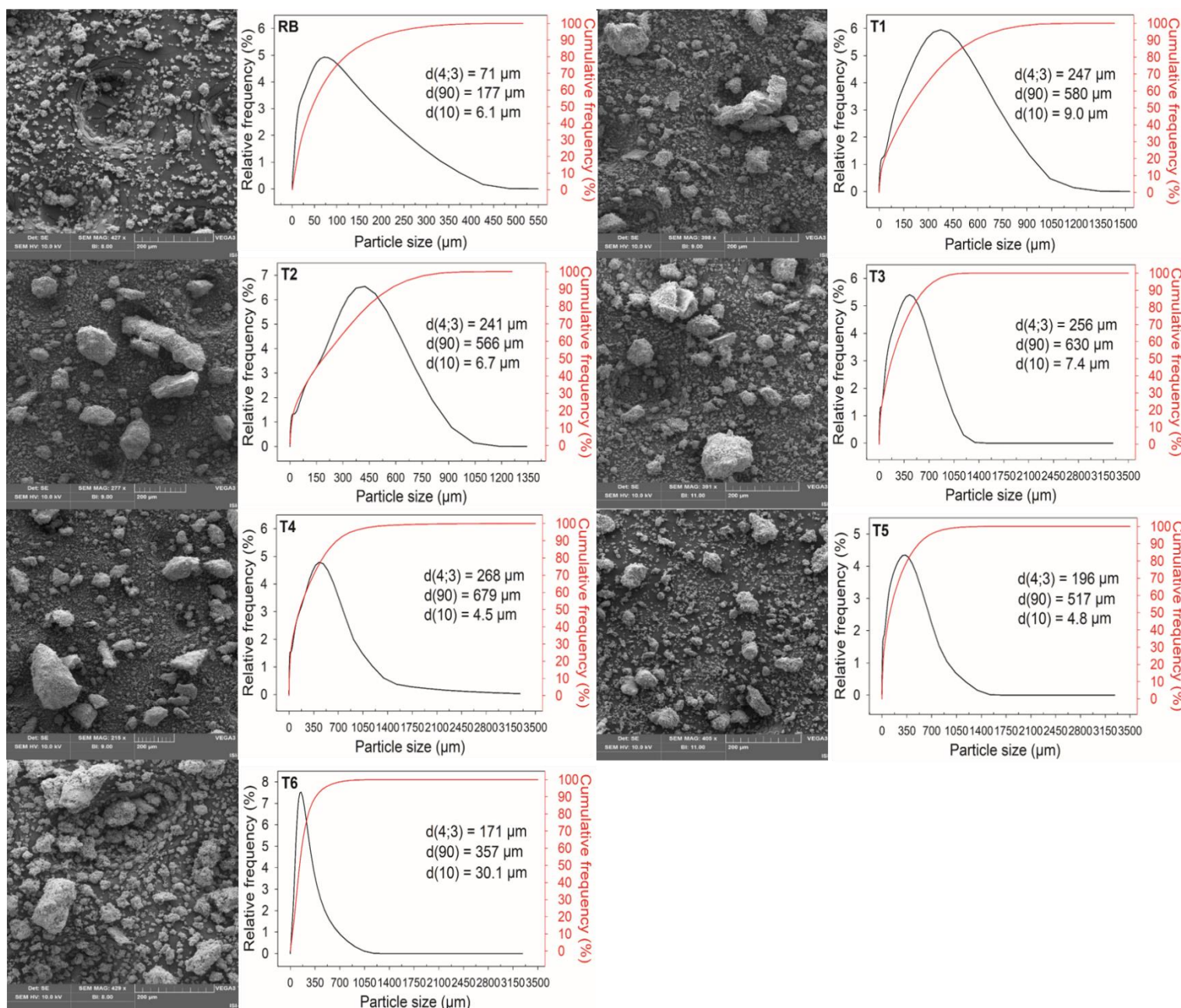


Figura 6. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise granulométrica a laser das partículas do resíduo de bauxita das formulações do condicionador de solo após 90 dias. RB: Resíduo de bauxita; T1: 25% RB + 75% POMW; T2: 25% RB + 75% POC; T3: 50% RB + 50% POMW; T4: 50% RB + 50% POC; T5: 75% RB + 25% POMW; T6: 75% RB + 25% POC.

Outro parâmetro crítico para a comercialização de condicionadores de solo no Brasil é a concentração permitida de EPTs, definida na instrução normativa número 7, de 12 de abril de 2016 (BRASIL, 2016). Mesmo as formulações testadas com 75% RB (T5 e T6) mostraram níveis seguros de EPTs (Tabela 4), muito abaixo das concentrações máximas admissíveis na normativa (BRASIL, 2016). A formulação com 25% de RB com

75% de POMW (T1) reduziu ($p < 0,05$) as concentrações de As e Pb, quando comparado com o POC (T2) nas mesmas condições.

Além da ação da diluição do RB no material orgânico, os ácidos favorecem a dissolução de minerais. A dissolução é promovida por prótons e pode ser aprimorada pela quelatção do metal liberado pelo excesso de ácidos orgânicos em solução, diminuindo assim a atividade do metal livre em solução (GRÄFE et al., 2011). A contaminação dos solos com EPTs é uma grande preocupação, devido ao efeito acumulativo (PENIDO et al., 2019). Sendo assim, torna-se importante a continuidade desse estudo com a aplicação dos tratamentos no solo, em condições controladas e avaliação da lixiviação para determinação da segurança ambiental dos tratamentos.

Tabela 4. Concentração de elementos potencialmente tóxicos e limites máximos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo para a formulação de condicionador de solo.

Propriedades (mg kg ⁻¹)	IN ¹	Tratamentos						
		Controle	T1	T2	T3	T4	T5	T6
As	20	<LD	2,17b	3,58a	3,08a	4,09a	3,58a	3,28a
Cd	3.0	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Pb	150	<LD	8,6c	17,2b	17,2b	23,4a	19,2ab	21,9ab
Ni	70	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Hg	1.0	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Se	80	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cr*	2,0	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

T1: 25% RB + 75% POMW; T2: 25% RB + 75% POC; T3: 50% RB + 50% POMW; T4: 50% RB + 50% POC; T5: 75% RB + 25% POMW; T6: 75% RB + 25% POC; controle: 100% POMW sem RB. IN¹: Instrução normativa n°7, de 12/04/2016 do MAPA (Anexo V limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo); < menor que o limite de quantificação; * Cromo hexavalente (Cr⁺⁶). Letras iguais nas linhas não diferem pelo teste Student-Newman-Keuls (SNK) ($p < 0,05$).

2.3.4 Análise de componentes principais

Uma análise de componentes principais (ACP) considerando os atributos físico-químicos mais importantes das formulações de condicionadores de solo (T1-T6), controle e do RB está representada na Figura 7a. A ACP foi realizada em 18 variáveis que juntas explicaram 73% da variabilidade total. A componente 1 foi responsável por 58,5% da variação dos dados, sendo esta componente governada pelas variáveis carbono orgânico, CTC, CRA, N, umidade, relação C/N, P, K e Mg, com os tratamentos T1, T2 e controle

os mais próximos. A segunda componente representou 14,5% da variabilidade total, sendo representada pelas variáveis Na, Fe, Al, Mn, Pb, Ca, pH, CE e densidade.

Os resultados da ACP comprovaram um padrão de gradiente na distribuição nos tratamentos, devido à concentração de RB nas formulações (25-75%), influenciando nos parâmetros de qualidade (DONG et al., 2019). E através da menor atuação da segunda componente, observou-se que a incorporação de RB aos resíduos orgânicos não diminuiu a qualidade do condicionador, em taxas de até 25% de RB.

A análise de agrupamento (distância Euclidiana quadrática, algoritmo do vizinho mais próximo) (Figura 7b) indicou a solução de três aglomerados principais, com T2 (25% RB + 75% POC) muito próximo do controle (100% POMW), sendo esperado diante dos resultados físico-químicos destes tratamentos. Um segundo grande aglomerado compreendeu os outros tratamentos em duas subclasses (T1, T3 e T4) e (T5, T6 e RB), confirmando que a concentração de RB foi o principal impulsionador nas formulações de condicionadores de solo.

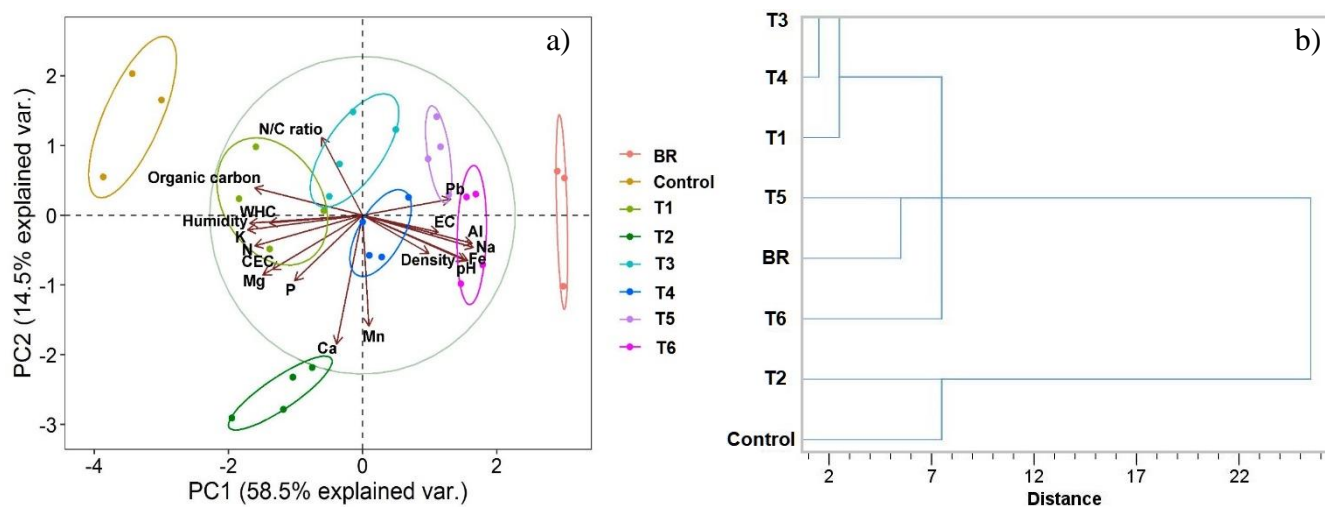


Figura 7. (a) Análise de componentes principais com a porcentagem de variação das componentes; (b) Dendrograma da associação dos tratamentos pela distância Euclidiana quadrática. RB: resíduo de bauxita; T1: 25% RB + 75% POMW; T2: 25% RB + 75% POC; T3: 50% RB + 50% POMW; T4: 50% RB + 50% POC; T5: 75% RB + 25% POMW; T6: 75% RB + 25% POC; controle: 100% POMW sem RB.

Diante dos resultados, uma definição mais ampla de economia circular pode ser adotada, no qual, inclui as indústrias de mineração, através da redução de resíduos e/ou desenvolvimento de novos produtos. Assim, estratégias sinérgicas, como a combinação com outros resíduos agroindustriais, podem ser usadas para a valorização dos resíduos de mineração e trazer ganhos ambientais. Aqui propomos a valorização do RB usando os

resíduos orgânicos disponíveis da cultura da palma de óleo, permitindo a criação de um novo produto ambientalmente correto e sem resíduos, que pode ser aplicado em alta escala na agricultura para melhorar a fertilidade do solo.

2.4 Conclusão

O uso do RB incorporado aos resíduos orgânicos da palma de óleo em compostagem ou composto de resíduos orgânicos da palma de óleo são uma fonte potencial para o condicionamento de solos ácidos. Os resultados obtidos sugerem que pelo menos 25% de RB acrescentado ao POC (T2) apresenta maior potencial para a produção de um condicionador de solo, atendendo a legislação brasileira. E o processo de compostagem com 25% de RB e POMW (T1) pode ser otimizado e assim atender os requisitos da legislação.

REFERÊNCIAS

Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium; United States Environmental Protection Agency, **Method 3060A**; United States EPA: Washington, DC, 1996.

AMB-ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO: **Principais Substâncias Metálicas**. Brasília, 2019. 34 p. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anoario-mineral/anoario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf.

ARAÚJO, P. de. F. M.; SILVA, P. M. P.; CARMO, A. L. V. do.; GOMES, F. G.; SANTOS, A. M. dos.; COSTA, R. V. da.; MELO, C. C. A. de.; LUCHETA, A. R.; MONTINI, M. Bayer process towards the circular economy metal recovery from bauxite residue. In: **Light metals 2020**. Ed. Tomsett A. The Minerals, Metals & Materials Series. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_14>.

AZIM, K., SOUDI, B., BOUKHARI, S., ET AL., 2018. Composting parameters and compost quality: a literature review. **Organic Agriculture**. 8, 141–158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>.

BANNING, N. C.; SAWADA, Y.; PHILLIPS, I. R.; MURPHY, D. V. Amendment of bauxite residue sand can alleviate constraints to plant establishment and nutrient cycling capacity in a water-limited environment. **Ecological Engineering**, v. 62, p. 179–187, jan. 2014. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.034>>.

BRAGA, P., LEMOS, F., DOS SANTOS, R., NASCIMENTO, C., FRANÇA, S., 2018. **Use of bauxite residue (red mud) as CO2 absorbent**. Available at: Paper presented at 5th International Seminar on Tailings Management, Santiago, Chile, 11–13. Available in: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2018/CAC0010-00-18.pdf>

BRAY, A. W.; STEWART, D. I.; COURTNEY, R.; ROUT, S. P.; HUMPHREYS, P. N.; MAYES, W. M.; BURKE, I. T. Sustained bauxite residue rehabilitation with gypsum and organic matter 16 years after initial treatment. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 1, p. 152–161, 2018. <<https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.7b03568>>.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006. **Instrução normativa n. 35 de 04 de julho de 2006**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumosagropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf>. Acesso em: 04 de agosto de 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007. Instrução normativa sda nº 17, de 21 de maio. **Manual de métodos analíticos oficiais para substratos e condicionadores de solo** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA, 240 p. ISBN 978-85-7991-109-5.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020. **Instrução Normativa nº 61**, 08 de julho de 2020 Brasília, DF.

CAMPOS, D. V. B. de.; TEIXEIRA, P. C. Enxofre. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, F.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 324-327.

CHIARELOTTO, M., RESTREPO, J. C. P. S., LORIN, H. E. F., DAMACENO, F. M., 2021. Composting organic waste from the broiler production chain: a perspective for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**. 329, 129717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129717>.

COURTNEY, R.; HARRINGTON, T. Growth and nutrition of *Holcus lanatus* in bauxite residue amended with combinations of spent mushroom compost and gypsum. **Land Degradation & Development**, v. 23, n. 2, p. 144–149, 2012. <<https://dx.doi.org/10.1002/ldr.1062>>.

COURTNEY, R.; HARRINGTON, T.; BYRNE, K. A. Indicators of soil formation in restored bauxite residues. **Ecological Engineering**, v. 58, p. 63–68, 2013. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.022>>.

COURTNEY, R.; DI CARLO, E.; SCHMIDT, O. Soil properties and earthworm populations associated with bauxite residue rehabilitation strategies. **Environmental Science and Pollution Research**, 2018. <<https://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-3973-z>>.

DANIEL, L.; LAIRD, D. W.; HEFTER, G. T. Sodium peroxide fusion for reliable determination of gold in ores and metallurgical samples. **International Journal of Mineral Processing**, v. 168, p-35-39, 2017.

<<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.09.001>>.

DEY, S. Microbial Resources of Alkaline Bauxite Residue and Their Possible Exploitation in Remediation and Rehabilitation. **Geomicrobiology Journal**, v. 39, 219-232, 2021. <<https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1977433>>.

DONG, Y.; SHAO, Y.; LIU, A.; LIU, X.; WU, M.; HU, X.; ZHANG, Q.; MENG, Z. Insight of soil amelioration process of bauxite residues amended with organic materials from different sources. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 28, p. 29379–29387, 2019. <<https://doi.org/10.1007/s11356-019-06007-y>>.

DI CARLO, E.; BOULLEMANT, A.; COURTNEY, R. A field assessment of bauxite residue rehabilitation strategies. **Science of The Total Environment**, v. 663, p. 915–926, 2019a. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.376>>.

DI CARLO, E.; CHEN, C. R.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R.; COURTNEY, R. Soil quality and vegetation performance indicators for sustainable rehabilitation of bauxite residue disposal areas: a review. **Soil Research**, v. 57, n. 5, p. 419-446, 2019b. <<https://dx.doi.org/10.1071/SR18348>>.

DI CARLO, E.; BOULLEMANT, A.; COURTNEY, R. Ecotoxicological risk assessment of revegetated bauxite residue: Implications for future rehabilitation programmes. **Science of The Total Environment**, v. 698, p. 134344, 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134344>>.

DUNGANI, R., ADITIAWATI, P., APRILIA, S., YUNIARTI, K., KARLIATI, T., SUWANDHI, I., SUMARDI, I., 2018. **Biomaterial from oil palm waste: properties, characterization and applications, palm oil, Viduranga waisundara**. Available at: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76412>.

ELEMENT, C. A. S. Method 3051A microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. **Zeitschrift Für Analytische Chemie**, v. 111, p. 362–366, 2007.

EVANS, K. The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue. **Journal sustainable metallurgy**, v. 2, p.316–331, 2016. <<https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>>.

FEIGL, V.; UJACZKI, É.; VASZITA, E.; MOLNÁR, M. Influence of red mud on soil microbial communities: Application and comprehensive evaluation of the Biolog EcoPlate approach as a tool in soil microbiological studies. **Science of The Total Environment**, v. 595, p. 903–911, 2017. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.266>>.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. de. Carbono orgânico. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, F.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 360-367.

GAUTAM, M.; PANDEY, B.; AGRAWAL, M. Identification of indicator species at abandoned red mud dumps in comparison to residential and forest sites, accredited to soil properties. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 88–102, 2018. <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.062>>.

GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 1–2, p. 60–79, 2011. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.004>>.

HAU, L.J., SHAMSUDDIN, R., MAY, A.K.A., et al., 2020. Mixed composting of palm oil empty fruit bunch (EFB) and palm oil mill effluent (POME) with various organics: an analysis on final macronutrient content and physical properties. **Waste Biomass Valorization**, 11, 5539–5548. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00993-8>.

HOLANDA, R. B.; SILVA, P. M. P.; CARMO, A. L. V. do.; CARDOSO, A. F.; COSTA, R. V. da.; MELO, C. C. A. de.; LUCHETA, A. R.; MONTINI, M. Bayer process towards the circular economy soil conditioners from bauxite residue. In: **Light metals 2020**. Ed. Tomsett A. The Minerals, Metals & Materials Series. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_15>.

INSAM, H., BERTOLDI, M. DE., 2007. Microbiology of composting process. In: Diaz, L.F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W., Stentiford, E. (Eds.), **Compost Science and Technology**, Waste Management Series. 26. Elsevier Science, Amsterdam.

JONES, B. E. H., HAYNES, R. J., PHILLIPS, I. R., 2010. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. **Journal of Environmental Management**, 91(11):2281–2288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.06.013>.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J. Bauxite Processing Residue: A Critical Review of Its Formation, Properties, Storage, and Revegetation. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 271–315, 2011. <<https://doi.org/10.1080/10643380902800000>>.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R. Influence of organic waste and residue mud additions on chemical, physical and microbial properties of bauxite residue sand. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 18, n. 2, p. 199–211, 2011. <<https://doi.org/10.1007/s11356-010-0364-5>>.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R. Cation and anion leaching and growth of *Acacia saligna* in bauxite residue sand amended with residue mud, poultry manure and phosphogypsum. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, n. 3, p. 835–846, 2012a. <<https://doi.org/10.1007/s11356-011-0630-1>>.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R. Addition of an organic amendment and/or residue mud to bauxite residue sand in order to improve its properties as a growth medium. **Journal of Environmental Management**, v. 95, n. 1, p. 29–38, 2012b. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.014>>.

- KLAUBER, C.; GRÄFE, M.; POWER, G. Bauxite residue issues: II. options for residue utilization. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 1–2, p. 11–32, 2011. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.007>>.
- KONG, X.; LI, M.; XUE, S.; HARTLEY, W.; CHEN, C.; WU, C.; LI, X.; LI, Y. Acid transformation of bauxite residue: Conversion of its alkaline characteristics. **Journal of Hazardous Materials**, v. 324, p. 382–390, 2017. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.073>>.
- KUSIN, F. M.; RAHMAN, M. S. A.; MADZIN, Z.; JUSOP, S.; MOHAMAT-YUSUFF, F.; ARIFFIN, M.; Z, M. S. M. The occurrence and potential ecological risk assessment of bauxite mine-impacted water and sediments in Kuantan, Pahang, Malaysia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 2, p. 1306–1321, 2017. <<https://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7814-7>>.
- MCGRATH, S.P. & CUNLIFFE, C.H. A simplified method for the extraction of the metals in sewage sludge on soils, microorganisms and plants. **Journal of Industrial Microbiology**, v. 14, p. 94-104, 1995. <<http://dx.doi.org/10.1007 / BF01569890>>.
- PENIDO, E. S.; MARTINS, G. C.; MENDES, T. B. M.; MELO, L. C. A.; DO ROSÁRIO GUIMARÃES, I.; GUILHERME, L. R. G. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 172, p. 326–333, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.110>>.
- POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, v.108, p. 33-45, 2011. <<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>>.
- RASHTI, M. R; ESFANDBOD, M.; PHILLIPS, I. R.; CHEN, C. Rhizosphere management by biochar and leaching improved plant performance in fresh bauxite residue sand. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 66–74, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.013>>.
- REN, J., REN, X., CHEN, J., GUO, W., YANG, B., DU, P., 2021. Humic-mineral interactions modulated by pH conditions in bauxite residues – implications in stable aggregate formation. **Geoderma**, 385, 114856. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114856>
- SANTINI, T. C.; FEY, M. V. Spontaneous vegetation encroachment upon bauxite residue (red mud) as an indicator and facilitator of in situ remediation processes. **Environmental science & technology**, v. 47, p. 12089- 12096, 2013. <<https://doi.org/10.1021/es402924g>>.
- SANTINI, T. C.; MALCOLM, L. I.; TYSON, G. W.; WARREN, L. A. pH and organic carbon dose rates control microbially driven bioremediation efficacy in alkaline bauxite residue. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 20, p. 11164–11173, 2016. <<https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b01973>>.

SANTINI, T. C.; FEY, M. V. From tailings to soil: long-term effects of amendments on progress and trajectory of soil formation and in situ remediation in bauxite residue. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, n. 5, p. 1935–1949, 2018. <<https://dx.doi.org/10.1007/s11368-017-1867-1>>.

SNARS, K. E., GILKES, R. J., WONG, M. T. F., The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils. **Soil Research**, v. 42, n. 3, p. 321, 2004. <<https://dx.doi.org/10.1071/SR03021>>.

SNARS, K. E., GILKES, R. J., 2009. Evaluation of bauxite residues (red muds) of different origins for environmental applications. **Applied Clay Science**, 46, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.06.014>.

TIAN, T.; ZHOU, J.; ZHU, F.; YE, Y.; GUO, Y.; HARTLEY, W.; XUE, S. Effect of amendments on the leaching behavior of alkaline anions and metal ions in bauxite residue. **Journal of Environmental Sciences**, v. 85, p. 74–81, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.05.005>>.

TIAN, T.; LIU, Z.; ZHU, F.; HARTLEY, W.; YE, Y.; XUE, S. Improvement of aggregate-associated organic carbon and its stability in bauxite residue by substrate amendment addition. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 16, p. 2405–2416, 2020. <<https://dx.doi.org/10.1002/ldr.3609>>.

UJACZKI, É.; FEIGL, V.; MOLNÁR, M.; VASZITA, E.; UZINGER, N.; ERDÉLYI, A.; GRUIZ, K. The potential application of red mud and soil mixture as additive to the surface layer of a landfill cover system. **Journal of Environmental Sciences**, v. 44, p. 189–196, 2016. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.014>>.

UJACZKI, É.; FEIGL, V.; MOLNÁR, M.; CUSACK, P.; CURTIN, T.; COURTNEY, R.; O'DONOGHUE, L.; DAVRIS, P.; HUGI, C.; EVANGELOU, M. W. H.; BALOMENOS, E.; LENZ, M. Re-using bauxite residues: benefits beyond (critical raw) material recovery. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 93, n. 9, p. 2498–2510, 2018. <<https://dx.doi.org/10.1002/jctb.5687>>.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, F.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 76-81.

XUE S. G., LI, M., JIANG, J., MILLAR, G. J., LI, C. X., KONG, X. F., 2018. Phosphogypsum stabilization of bauxite residue: conversion of its alkaline characteristics. **Journal Environmental Science-China**. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2018.05.016>.

XUE, S.; YE, Y.; ZHU, F.; WANG, Q.; JIANG, J.; HARTLEY, W. Changes in distribution and microstructure of bauxite residue aggregates following amendments addition. **Journal of Environmental Sciences**, v. 78, p. 276–286, 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.010>>.

XUE, S.; KE, W.; ZHU, F.; YE, Y.; LIU, Z.; FAN, J.; HARTLEY, W. Effect of phosphogypsum and poultry manure on aggregate-associated alkaline characteristics in bauxite residue. **Journal of Environmental Management**, v. 256, p. 109981, 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109981>>.

**3 SEGURANÇA AMBIENTAL E AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DE
CONDICIONADOR DE SOLO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUOS DE
BAUXITA E DA PALMA DE ÓLEO.**

RESUMO

A associação de resíduo de bauxita (RB) e resíduos orgânicos de palma de óleo pode se constituir estratégia inovadora para o condicionamento de solos ácidos. Entretanto, o RB associado possui elevado pH e pode conter elementos potencialmente tóxicos (EPTs) que afeta a qualidade do solo e das águas subterrâneas. Com isso, os objetivos foram avaliar a lixiviação de elementos químicos, estimar a contaminação do solo e águas subterrâneas, e determinar as características físico-químicas e eficiência agrônômica do RB associado ao resíduo de palma de óleo em solo cultivado com capim Sabiá. Os condicionadores foram formados por RB misturado com resíduos de palma de óleo decomposto (POC) e não decomposto (POMW), na proporção de 25% RB +75% de POC (T1) e 50% RB + 50% POMW (T2), além de tratamento com 100% POMW sem RB (T3) e calcário em uma dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0 (T4), com exceção desse último, todos foram aplicados no solo em doses de 40, 80 e 120 t ha⁻¹ para avaliar a lixiviação. As parcelas experimentais foram compostas por colunas de policloreto de vinila (PVC) preenchidas com 5 kg de solo, com garrafas adaptadas com mangueiras na parte inferior para facilitar a drenagem e a coleta dos lixiviados. A simulação de precipitação ocorreu através da aplicação de água deionizada durante 60 dias. Após esta etapa, as mangueiras e garrafas foram retiradas e as colunas passaram a ser utilizadas como vasos para o cultivo do capim Sabiá em um segundo experimento. As colunas receberam fertilização mineral, de acordo com a condição do solo e necessidade da cultura. Os tratamentos foram compostos pelas doses 40, 80 e 120 t ha⁻¹ dos tratamentos T1 (25% RB +75% de POC), T2 (50% RB + 50% POMW) e T3 (100% POMW sem RB), além do T4 (calcário em uma dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0) e T5 (solo de mata nativa sem alteração). O pH dos lixiviados tiveram alterações, mas o uso do RB associado ao POMW apresentou-se semelhante ao uso do calcário. Já no pH do solo, o calcário foi um pouco superior (6,6) aos tratamentos que possuíam RB (5,5). Não houve lixiviação de EPTs para as águas subterrâneas e nem contaminação do solo. Os tratamentos com RB neutralizaram o Al³⁺ nas maiores doses e também elevaram a saturação por bases (55,6%) em relação ao solo de mata nativa (10,8%), como ocorrido com o calcário (83%). A produção do capim Sabiá aumentou com o uso dos condicionadores em comparação ao solo de mata nativa, com valores equivalentes ao uso do calcário. Portanto, condicionadores contendo RB associado a POMW têm potencial para o condicionamento de solos ácidos, melhorando os parâmetros físico-químicos do solo e a produção do capim Sabiá.

Palavras-chave: *Elaeis guineensis* Jacq; Lixiviação de elementos; reutilização de resíduos; qualidade do solo; *Urochloa híbrida* cv. Sabiá.

ABSTRACT

The incorporation of bauxite residue (BR) to palm oil mill waste (POMW) is an innovative strategy for soil conditioning. However, BR contains potentially toxic elements (PTEs) that may affect soil and groundwater quality. With this, the objective of this study was to evaluate the leaching of chemical elements, estimation of soil and groundwater contamination, physicochemical characteristics and agronomic efficiency of Sabiá cultivated under soil with BR and POMW. BR was mixed with POMW, forming the conditioners selected through previous experiment. The doses of these conditioners were defined, being T2, T3 and control (40, 80 and 120 ton ha⁻¹), besides a treatment with application of limestone. The experimental plots were composed of polyvinyl chloride (PVC) columns filled with 5 kg of soil, with bottles adapted with hoses at the bottom to facilitate drainage and collection of leachates. The simulation of precipitation occurred through the application of deionized water. After 60 days, the used hoses and bottles were removed and the columns started to be used as pots for *Urochloa híbrida* cv. Sabiá cultivation. The pots received mineral fertilization, except for the treatment with native forest soil added at this stage. The pH of the leachates had changes, but the use of BR to POMW presented similar to the use of limestone. As for soil pH, limestone was slightly higher (6.6) than treatments that had BR (5.5). There was no leaching of EPTs into groundwater and no soil contamination. The treatments with BR neutralized Al³⁺ at the highest doses and also elevated V% (55.6%) relative to the control (10.8%), as occurred with limestone (83%). The production of the Sabiá cv. increased with the use of conditioners in relation to the native forest soil, with values equivalent to the use of lime. Therefore, conditioners containing BR associated into POMW have potential for soil conditioning, improving soil physicochemical parameters and grass production.

Keywords:: *Elaeis guineensis* Jacq; elemental leaching; waste reuse; soil quality; *Urochloa híbrida* cv. Sabiá.

3.1 Introdução

Em região tropical, o principal fator limitante dos solos é a baixa fertilidade natural, cujos fatores adversos são a alta acidez associada à toxidez por Al e as baixas reservas de nutrientes (SOUZA et al, 2018). O meio mais eficaz para melhoria da fertilidade do solo é a incorporação de insumos, como corretivos, condicionadores e fertilizantes (REETZ, 2017). Porém, diante da escassez de matéria prima, aumento do câmbio, por serem na maior parte importados e constituídos de fontes não renováveis, os fertilizantes minerais estão cada vez mais caros.

O desenvolvimento de tecnologias que assegurem a sustentabilidade ambiental se torna indispensável (CHOWDHARY; BHARAGAVA, 2020), principalmente a partir do aproveitamento de resíduos, que vai culminar na redução da contaminação ambiental e no reuso de recursos não renováveis.

Os resíduos de mineração e/ou agroindustriais são potenciais materiais que podem ser transformados e reutilizados para reduzir o uso dos insumos minerais. Nesse caso, a substituição do processo linear baseado na produção, consumo e eliminação concede lugar para a economia circular, na qual, os materiais são reincorporados em um novo processo de produção para a criação de novos produtos, trilhando o caminho da agricultura sustentável (ACEÑA HERAS et al., 2019). Conforme estima a Comissão Europeia (2016), cerca de 30% dos fertilizantes minerais podem ser substituídos por resíduos de qualquer origem.

Os resíduos de palma de óleo associado ao resíduo de bauxita (RB) constituem estratégia inovadora para a obtenção de insumo para o condicionamento de solos agrícolas (LEITE et al., 2022). No entanto, o RB além da elevada sodicidade e alcalinidade (GELENCSEK et al., 2011), pode conter elementos potencialmente tóxicos (EPTs), acima dos valores de referência de qualidade (FERNANDES et al., 2018) que pode limitar o uso nos solos agrícolas. Assim sendo, há necessidades de definição das quantidades que podem ser utilizadas sem causar riscos ambientais e ainda constituir em condicionador de solos.

Por outro lado, o potencial condicionador, resultado da associação de RB e resíduo de palma de óleo, deve ser avaliado quanto a capacidade de retenção e lixiviação dos elementos químicos no perfil do solo, a fim de evitar a poluição do solo e da água (ACEÑA-HERAS et al., 2019). Além disso, determinar a contribuição química, como fonte de nutrientes, carbono para o solo e correção da acidez e assim melhorar a

fertilidade, aumentar a produtividade e reduzir a necessidade de fertilizantes minerais. Com isso, os objetivos foram avaliar a lixiviação de elementos químicos, estimativa de contaminação do solo e águas subterrâneas, características físico-químicas e eficiência agrônômica de RB associado ao resíduo de palma de óleo, em solo cultivado com capim Sabiá.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Experimento 1: Lixiviação de elementos químicos

O experimento foi instalado em casa de vegetação da Universidade Federal Rural da Amazônia em Belém, Pará, Brasil. Foram utilizados RB proveniente de refinaria de Alumina e resíduos orgânicos da produção de óleo de palma, ambos gerados no estado do Pará. As características químicas do RB, dos resíduos orgânicos e dos condicionadores de solo foram definidos a partir das características físico-químicas estabelecidos por Leite et al. (2022), considerando a proporção de RB e resíduos de palma de óleo. Para a escolha dos condicionadores de solo, destinados à agricultura, considerou-se a legislação pela instrução normativa nº35 de 04 de julho de 2006 da secretaria de defesa agropecuária (BRASIL, 2006).

Foi utilizado um esquema fatorial em delineamento inteiramente casualizado (DIC) $(3 \times 3) + 1$, com quatro repetições. Os fatores foram: três condicionadores (Figura 1): T1- 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2 - 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3 - 100% POMW (resíduos de palma de óleo), foram aplicados no solo em três doses 40, 80 e 120 t ha⁻¹, além do T4 (calcário dolomítico em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0), totalizando dez tratamentos.



Figura 1. Aspecto dos condicionadores antes da aplicação nas colunas de lixiviação com solo. a) T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); b) T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); c) T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB).

Na Tabela 1 encontramos as propriedades químicas dos condicionadores estabelecidas por Leite et al. 2022, e do solo utilizado no experimento.

Tabela 1. Propriedades químicas dos condicionadores e do solo.

Propriedades químicas	T1	T2	T3	T4	Solo
pH H ₂ O (1:5)	9,8	9,7	7,9	-	4,2
CE (mS cm ⁻¹)	3,0	2,2	1,9	-	4,0
CTC (mmol _c kg ⁻¹)	244	80,94	276	-	4,8
Carbono orgânico (g kg ⁻¹)	186	163	325	-	4,4
N total (g kg ⁻¹)	9,1	5,5	10,5	-	2,4
Fósforo (g kg ⁻¹)	5,0	2,0	2,9	0,4	0,8
Potássio (g kg ⁻¹)	10,7	6,4	15,2	4,6	0,2
Cálcio (g kg ⁻¹)	8,2	3,8	3,8	79,1	0,1
Magnésio (g kg ⁻¹)	2,2	1,0	1,9	86	0,1
Enxofre (g kg ⁻¹)	0,1	0,32	0,1	0,3	0,2
Sódio (g kg ⁻¹)	32,3	33,7	0,2	4,5	0,08
Alumínio (g kg ⁻¹)	53,0	58,0	2,5	11,4	25,7
Ferro (g kg ⁻¹)	111	106	4,0	47,5	8,8
Manganês (mg kg ⁻¹)	87,5	55,2	52,0	1,0	-
Cobre (mg kg ⁻¹)	35,0	27,6	34,5	-	23,7
Zinco (mg kg ⁻¹)	35,0	21,1	28,8	-	5,1
Arsênio (mg kg ⁻¹)	3,58	3,08	<LD	-	<LD
Cádmio (mg kg ⁻¹)	<LD	<LD	<LD	-	<LD
Chumbo (mg kg ⁻¹)	17,2	17,2	<LD	-	1,2
Níquel (mg kg ⁻¹)	<LD	<LD	<LD	-	<LD
Mercúrio (mg kg ⁻¹)	<LD	<LD	<LD	-	<LD
Selênio (mg kg ⁻¹)	<LD	<LD	<LD	-	<LD
*Cromo (mg kg ⁻¹)	<LD	<LD	<LD	-	<LD

Fonte: Leite et al. (2022). * hexavalente (Cr⁺⁶). <LD: menor que o limite de detecção. T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0.

3.2.1.1 Preparação das colunas de lixiviação

As parcelas experimentais foram compostas por colunas de PVC (policloreto de vinila) de 150 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento com adaptações na parte inferior para facilitar a drenagem e a coleta dos lixiviados (Figura 2a).

Na face interior de cada coluna, foi feita a aplicação de parafina, visando evitar o fluxo preferencial da água de percolação pelas paredes da coluna durante o

processo de simulação da chuva (CAMPOS et al., 2019). Para a coleta das soluções lixiviadas, foram conectados recipientes de polietileno tereftalato (PET) às colunas por uma mangueira tipo cristal.

A extremidade inferior de cada coluna foi revestida com tecido de 100 mesh e lã de vidro para evitar perda de solo ou turvamento do material coletado. O solo que foi utilizado no experimento é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico com textura média, coletado de 0-40 cm (SANTOS, 2018). As colunas foram preenchidas com 5 kg de solo de textura média, previamente seco ao ar, peneirado e posteriormente misturado aos tratamentos em suas respectivas doses e umedecidos até a capacidade de campo (Figura 2b) para propiciar a posterior percolação da água nas colunas durante 60 dias (PIOVESAN et al., 2009; PENIDO et al., 2019).

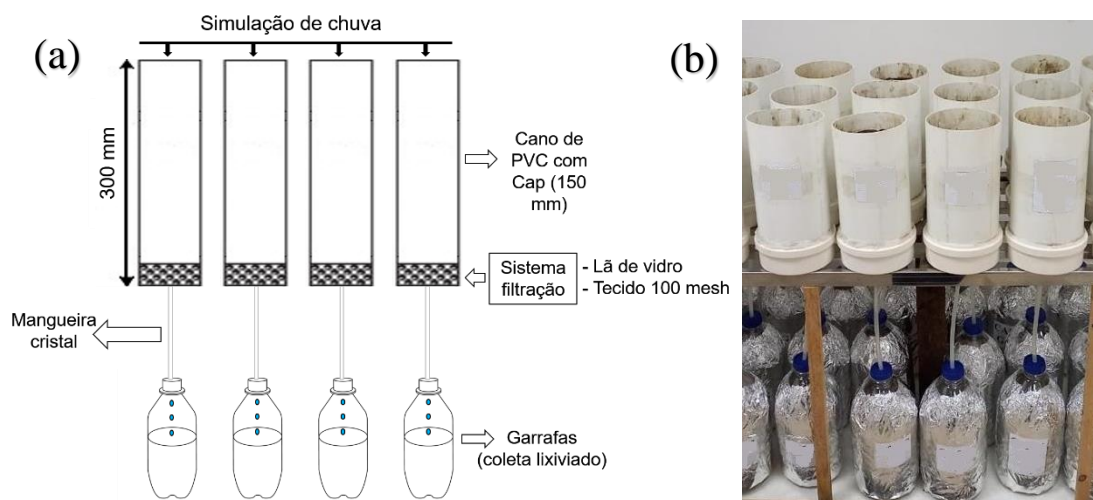


Figura 2. (a) Diagrama esquemático das colunas de lixiviação; (b) Colunas após montagem para o ensaio de lixiviação de elementos químicos de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.

A simulação de chuva foi realizada via aplicação de água deionizada cinco vezes por semana, no qual utilizou-se o segundo maior valor da média mensal (281-272 mm) de precipitação entre os anos de 2010 a 2020 referentes aos meses de condução do experimento (RASHTI et al., 2019). Este valor de precipitação foi dividido por quatro, valor que aproximou-se das máximas precipitações encontradas em um dia na média histórica, no qual, resultou em uma aplicação de 70,4 e 68 mm, ou seja, 1240 e 1201 ml semanais, respectivamente, considerando a área útil da coluna (GENTIL, 2016).

3.2.1.2 Propriedades químicas dos lixiviados

O lixiviado foi coletado a cada 20 dias, totalizando três coletas de lixiviados. No fim de cada coleta foi medido o pH e a condutividade elétrica (CE), logo depois preservados em HNO₃ (pH < 2) e armazenado em refrigerador até a medição das concentrações totais de elementos químicos, que foram extraídos de acordo com a metodologia descrita no método USEPA 3051a e determinados com espectrômetro de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) (ELEMENT, 2007).

3.2.1.3 Estimativa de risco de contaminação de águas subterrâneas

A estimativa de risco de contaminação de águas subterrâneas foi realizada pela aplicação dos tratamentos, concentração e volume do lixiviado, com base nos limites estabelecidos na resolução do CONAMA nº 420/2009. O volume de lixiviados recuperado das colunas foi convertido em mg ha⁻¹ para cada elemento, pela equação (1):

$$\text{Lixiviado (mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{10.000 \text{ m}^2 \times \text{lixiviado mg L}^{-1}(\text{soma coletas})}{0,129 \text{ m}^2(\text{área de projeção da coluna})} \quad (1)$$

Posteriormente, a estimativa da concentração de cada elemento em água subterrânea foi obtida pela equação (2) descrita por CAMPOS et al. (2019):

$$\text{Acúmulo em água subterrânea (}\mu\text{g L}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Lixiviado (mg ha}^{-1}\text{)} \times 1000}{\text{Vol. água percolado (L)}} \quad (2)$$

3.2.1.4 Estimativa do risco de contaminação do solo

A estimativa do risco de contaminação do solo foi diagnosticada pelos valores de referência de qualidade de EPTs para o Estado do Pará (FERNANDES et al., 2018). Para isso, foi considerado o que foi adicionado via aplicação dos condicionadores no solo e o total lixiviado durante o experimento de lixiviação.

A concentração por ha (CP) foi obtida pelo conteúdo total de cada elemento vezes a dose aplicada dos tratamentos em 1 ha. O acúmulo de EPT no solo foi determinado pela equação (3):

$$\text{Acúmulo no solo (mg kg}^{-1}\text{)} = (\text{CP} - \text{Lixiviado mg ha}^{-1}\text{)} / 2 \times 10^6 \quad (3)$$

Onde, CP é a concentração do elemento por ha; lixiviado (mg ha^{-1}) foi determinado na equação 1, anteriormente; 2×10^6 é a massa de solo (kg ha^{-1}) na camada de 0-20 cm.

3.2.2 Experimento 2: eficiência agrônômica dos condicionadores de solo

Após o experimento 1, as mangueiras e garrafas utilizadas para a coleta de lixiviados foram retiradas e as colunas com solo foram utilizadas como vasos para a estabelecimento de uma espécie gramínea (*Urochloa híbrida* cv. Sabiá), visando avaliar a produção, crescimento e desenvolvimento vegetal, assim como parâmetros de fertilidade do solo.

O experimento foi instalado em casa de vegetação da Universidade Federal Rural da Amazônia em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em fatorial $(3 \times 3) + 2$, com quatro repetições. Onde, três condicionadores: T1 (25% RB + 75% resíduos de palma de óleo decomposto); T2 (50% RB + 50% resíduos de palma de óleo); T3 (100% resíduos de palma de óleo sem RB), foram aplicados no solo em três doses 40, 80 e 120 t ha^{-1} , além do T4 (calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0) e T5 (solo de mata nativa sem alteração), totalizando 11 tratamentos.

Os vasos estavam preenchidos com solo classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (textura média) (Figura 3a) e através da análise de solo foi indicada a fertilização mineral, utilizando-se superfosfato simples, cloreto de potássio, sulfato de amônio e FTE como fonte de micronutrientes. Com exceção do tratamento T5, nos demais tratamentos foram aplicados doses equivalentes (em kg ha^{-1}) a 120 kg de P_2O_5 , 50 kg de K_2O , 40 kg de N e 60 kg de FTE na adubação de base, e para a cobertura (30 dias após a germinação) 90 kg de N e 50 kg de K_2O (LIMA; MARIA, 2020).

Na semeadura da forrageira cinco sementes de *Urochloa híbrida* cv. Sabiá foram semeadas por vaso a cerca de 1,0 cm de profundidade (Figura 3b). Após a germinação das plantas foi realizado o desbaste, deixando-se três plantas por vaso. Os vasos foram irrigados a cada três dias e mantidos a uma capacidade de campo próxima a 70% até o corte das plantas.

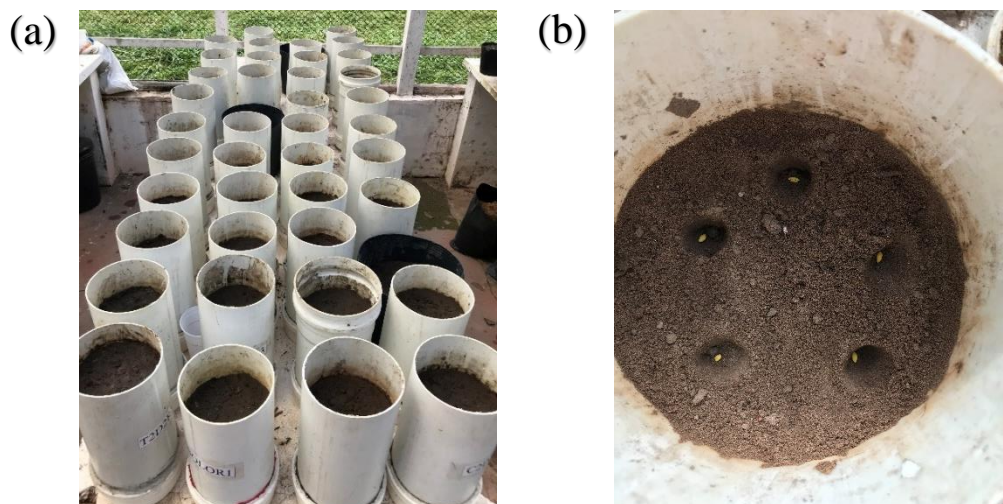


Figura 3. (a) Vasos utilizados para a avaliação da produção, crescimento do capim Sabiá e parâmetros físico-químicos de solos condicionados com formulações contendo resíduos de bauxita e da palma de óleo; (b) Sementes da forrageira semeada nos vasos.

3.2.2.1 Crescimento e desenvolvimento vegetal

Cinquenta dias após a semeadura (DAS) foram realizadas as coletas de dados para a avaliação do capim Sabiá. A altura de plantas foi medida do colo até a última folha expandida com o auxílio de uma régua graduada em centímetros. O diâmetro do colmo foi mensurado com auxílio de um paquímetro digital. O número de perfilhos foi contabilizado em cada vaso. A parte aérea das plantas foram cortadas rente à superfície do vaso, assim como as raízes que foram retiradas e lavadas. A massa seca da parte aérea e raízes foram determinadas após um período em estufa a 55 °C até peso constante.

O índice SPAD (Soil Plant Analysis Development) foi realizado na terceira folha totalmente expandida, contado a partir do ápice, assim foram feitas três medições por vaso para determinar o índice de clorofila, com o medidor SPAD 502 plus.

3.2.2.2 Parâmetros de fertilidade do solo

Após a coleta dos dados vegetais, o solo foi amostrado em todo o perfil do vaso para análise de fertilidade. O pH e a condutividade elétrica (CE) foram determinados em água na proporção 1:2.5 (m/v) em equipamento Thermo Scientific Orion Star A211 e condutivímetro Hanna, modelo HI 2030, respectivamente. Ca, Mg e Al foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017). A acidez potencial (H+Al) foi quantificada por meio da leitura do pH em solução tampão SMP pH 7,5 (RAIJ et al.,

2001). P, K e Na foram extraídos com solução Mehlich-1. A determinação do S foi realizada por turbidimetria, através da solução de extração de fosfato monobásico de cálcio $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$) (RAIJ et al., 2001).

Os micronutrientes como Cu, Fe, Mn e Zn, assim como, os elementos potencialmente tóxicos (EPTs) Ni, Cd, Cr e Pb foram extraídos por solução quelante DTPA. O B foi extraído a quente com solução de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,125% (RAIJ et al., 2001).

A capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinada pela soma de bases (SB) mais $\text{H}+\text{Al}$, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. A saturação por bases (V%) foi determinada pela equação (4), e a porcentagem de saturação por sódio (PST) foi determinada pela equação (5) (TEIXEIRA et al., 2017).

$$V\% = 100 \times \frac{SB}{CTC} \quad (4)$$

$$PST(\%) = 100 \times \frac{Na}{CTC} \quad (5)$$

3.2.2.3 Índice de qualidade do solo (IQS)

Os parâmetros físico-químicos do solo foram submetidos a análise fatorial que foi realizada usando a análise de componentes principais (ACP) como método de extração, no qual, selecionou-se autovalores >1 para a seleção das componentes (ARCOVERDE et al., 2015).

O modelo para o IQS foi determinado por estatística multivariada utilizando a matriz de escores fatoriais após a rotação ortogonal (F_i) da estrutura fatorial (SANTANA, 2007). Em cada fator, determinou-se o máximo e o mínimo e os escores foram padronizados (FP) para obtenção de valores positivos dos escores originais, seguindo a equação (6):

$$FP = (F_i - F_{min}) / (F_{max} - F_{min}) \quad (6)$$

Em que, F_i são os valores observados pelos escores fatoriais e F_{min} e F_{max} são os valores máximo e mínimo, respectivamente.

Os pesos de cada fator extraído (P_n) foram determinados pela equação (7) e o IQS foi determinado pela equação (8):

$$P_n = SR_n / \sum SR_n \quad (7)$$

$$IQS = \sum(Fp_1 \times P_{n1}) + (Fp_2 \times P_{n1}) \dots \quad (8)$$

Em que SR_n é a soma da rotação dos quadrados de cada fator extraído.

3.2.3 Caracterização do resíduo orgânico por FTIR

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi usada para identificar os grupos funcionais na superfície dos resíduos orgânicos utilizados nos tratamentos. As amostras de resíduos de palma de óleo (fibra, bucha, borra e composto) foram utilizadas na forma de pó, os espectros foram coletados com uma resolução de 4 cm^{-1} , com 32 varreduras, por ATR na região de $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$, no Espectrômetro Excalibur (Digilab).

3.2.4 Análise estatística

As condições de normalidade e homocedasticidade foram testadas para todos os parâmetros pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett ($p < 0,05$). Os valores foram reportados como médias e para avaliar diferenças entre os tratamentos utilizou-se dos Testes Scott-Knott e Tukey ($p < 0,05$). Técnicas de análise multivariada foram aplicadas nas variáveis que se ajustaram à estatística. A adequação da análise de componentes principais foi avaliada pelo teste de KMO e Bartlett no Rstudio v.4.2.0 (R core Team, 2019).

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Experimento 1: lixiviação de elementos químicos

3.3.1.1 pH e condutividade elétrica dos lixiviados

O pH e a condutividade elétrica (CE) dos lixiviados foram monitorados a cada 20 dias, como não houve diferenças ($p < 0,05$) foram apresentados a média dos resultados. O pH dos lixiviados aumentou nos tratamentos que tinham RB associado aos resíduos orgânicos de palma de óleo (T1 e T2), cujo valores foram semelhantes aos obtidos pelo

uso da calagem (Figura 4a). No entanto, o T3 não foi eficiente em aumentar o pH dos lixiviados ao nível do tratamento com calcário (T4) e também quando comparados com o T1 e T2. A alcalinidade do RB pode proporcionar aumento do pH dos lixiviados, especialmente em solos arenosos que apresentam menor poder tamponante (COSTA et al., 2012).

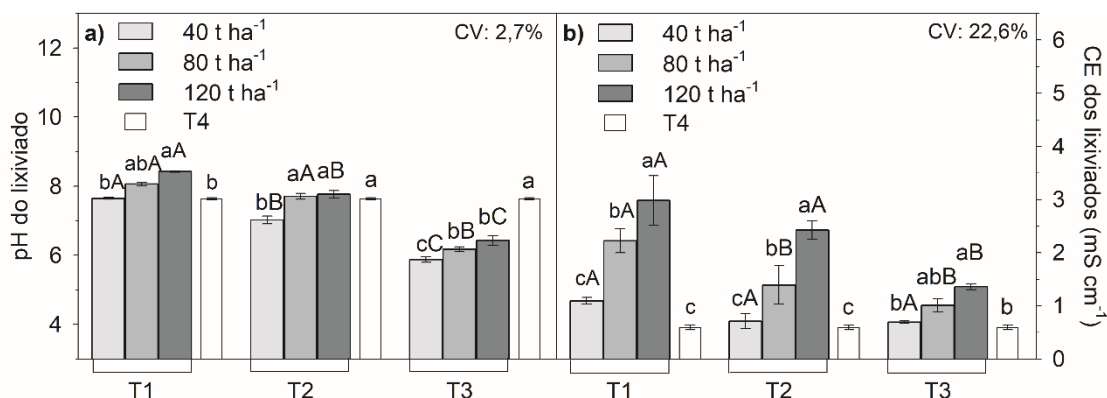


Figura 4. pH (a) e condutividade elétrica (b) dos lixiviados em ensaio de lixiviação em condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. As letras minúsculas comparam as doses com o T4 e as letras maiúsculas comparam a mesma dose pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0. As barras representam o erro padrão da média.

Os resultados sugerem que a alcalinidade do RB pode promover o aumento do pH do lixiviado, devido ao aumento do pH do solo, tendo um comportamento similar ao uso de calcário. Doses de RB foram avaliadas em solos contaminados com Cd e Pb, e observou-se que o pH dos lixiviados em solos contendo 1 e 2% de RB ficou em torno de 8,5, valor superior ao pH dos lixiviados dos solos que foram alterados com calcário, silicato e turfa (pH ~ 6,7) (COSTA et al., 2008). Assim, quanto maior a taxa de aplicação de RB e resíduo orgânico no solo maior é o incremento do pH e CE, ocasionado pela dissolução dos minerais presentes no RB, e liberação de íons alcalinos solúveis tais como OH⁻, CO₂³⁻, HCO₃³⁻ e Al(OH)⁴⁻ (GAUTAN; AGRAWAL, 2019; TIAN et al., 2019).

A CE dos lixiviados do T1 e T2 incrementou a partir da dose 80 t ha⁻¹ comparado ao calcário (Figura 4b). A presença de RB associado aos resíduos orgânicos de palma de óleo (T1 e T2), causou maior CE quando comparado ao T3. A CE do lixiviado pode ser acrescida pelo carreamento de íons de alta mobilidade, como por exemplo do Na presente em maior quantidade no RB e do K presente em maior quantidade no material orgânico, resultado da mineralização da matéria orgânica (HEIDARI; JALALI, 2016; TIAN et al., 2019).

Há, contudo, tendência de queda da CE ao longo do tempo, que é resultado dos íons livres que são lixiviados (AMARAL et al., 2004). A CE dos lixiviados diminuiu consistentemente com a constância da aplicação de água, devido ao fato de a solução do solo se tornar mais diluída com a maior parte dos íons sendo lixiviados (BAME et al., 2013). O aumento na CE do lixiviado com o aumento da concentração de RB no solo, já foi observado em outros trabalhos (COSTA et al., 2008), porém o alto pH do lixiviado contribui para a precipitação de íons, reduzindo posteriormente os valores de CE.

3.3.1.2 Elementos químicos lixiviados

Nos lixiviados foram avaliados 65 elementos, porém somente nove apresentaram resultados analíticos, sendo que a maioria dos EPTs apresentaram concentração abaixo do limite de detecção (<LD) (Tabela 2).

Tabela 2. Concentração de elementos químicos lixiviados em ensaio de lixiviação em condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.

Tratamentos	Elementos químicos lixiviados								
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	Mn	Si
t ha ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----								
40	21,6bA	26,3cA	17,4bA	75dB	5,3eB	495bA	2,3cA	0,2bA	70.6aA
T1 80	44,8aA	49,1bA	59,7aA	185cB	16,5cA	1104aA	3,1bA	0,3bA	71.5aA
120	51,1aA	54,6bA	67aB	363cB	22,7bA	1484aA	5,4aA	0,9aA	60bA
40	15,2cA	10,1dB	10,5bA	31,1eC	1,0fB	289cB	1,8cA	0,1bA	59.2bB
T2 80	36,7aA	24,5cB	51,9aA	68,3dC	3,5eB	695bB	2,2cA	0,2bA	59.3bB
120	47aA	49,6bA	85,5aA	68,3dC	8,5dB	1295aB	3,5bA	0,3bB	61.7bA
40	2,9eB	21,4cA	<LD	136dA	15,3cA	29,2dC	1,3cA	0,2bA	9.2dC
T3 80	5,2dB	23,1cB	4,5cB	471bA	18cA	33,2dC	1,9cA	0,1bA	9.5dC
120	6,6dB	24,9cB	3,7cC	698aA	23,3bA	31dC	2,3cA	0,1bB	11.2dB
T4	<LD	114a	<LD	6,6e	73,8a	28,5d	0,8c	0,1b	2,2e
CV (%)	10	9,7	21,7	24,8	10,6	14,1	13,6	6,5	5,0

As letras minúsculas comparam todos os tratamentos pelo teste Scott-Knott e as letras maiúsculas comparam as mesmas doses pelo teste SNK ($p < 0,05$). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0.

As repetidas simulações de precipitação ocasionaram a lixiviação de elementos químicos importantes para a fertilidade do solo e meio ambiente, sendo que o Na e K

foram os mais lixiviados. Um fator que predispõe maior lixiviação para estes elementos é a sua alta solubilidade, principalmente em região com elevada precipitação como na região Amazônica (RASHTI et al., 2019). O uso da biorremediação em RB com microorganismos também aumenta a lixiviação de Na, e inclusive Al, implicando em menor concentração destes elementos na solução do solo (SANTINI et al., 2017). A atuação dos microrganismos por meio da mineralização da matéria orgânica influencia na biodisponibilidade, transporte e migração de cátions (POLLI et al., 2002).

Os condicionadores com associação de RB e resíduo orgânico (T1 e T2) continham Al, Fe, Na, Mn, As e Pb (LEITE et al., 2022). Estes elementos foram lixiviados, com exceção do As e Pb que permaneceram indisponíveis e/ou imobilizados. Esses resultados podem sugerir que a matéria orgânica apresenta um potencial de reduzir e/ou complexar os elementos, reduzindo a concentração de EPTs no lixiviado, sendo que nestes tratamentos o As e Pb não foram detectados.

O aumento do pH relacionado à aplicação dos tratamentos contendo RB pode favorecer a existência de formas menos disponíveis de Al para as plantas, sendo um fator positivo devido a dissolução de minerais com Al (Gibbsita) oriundos do RB (TIAN et al., 2019). Sendo assim, a lixiviação de Al pode ser mais elevada na presença desses tratamentos contendo RB, mas sem consequência drástica ao solo.

De modo geral, quando EPTs são adicionados ao solo em baixa concentração *via* aplicação de doses de RB, parte dos metais permanecem retidos na camada superficial por processos de adsorção ou complexação, até que mudanças de pH, temperatura e concentração ocorram no sistema. A menor mobilidade desses metais também é consequência dos elevados valores de pH e aumento no teor de matéria orgânica (BERTONCINI; MATTIAZZO, 1999). Sendo assim, diversas reações químicas podem ocorrer no solo, tais como: oxirredução, ácido-base, precipitação, complexação, adsorção e troca iônica. Estas reações afetam o comportamento dos metais, interferindo na sua distribuição sob diferentes formas químicas. Portanto, elas regulam a concentração de metais presentes de forma livre na solução do solo (VELASCO MOLINA, 2004).

Os elementos foram lixiviados na seguinte ordem decrescente Na>K>Si>Ca>Fe>Al>Mg>P>Mn. A alta quantidade lixiviada de K dos tratamentos se deve a elevada concentração nos resíduos orgânicos da palma de óleo, enquanto a maior lixiviação de Na deve-se ao aumento das doses de RB associado aos resíduos orgânicos. Entretanto, a adição de resíduo orgânico provoca a diminuição da quantidade de OH⁻,

reduzindo a dissolução de minerais alcalinos no RB, diminuindo a liberação constante de elementos como o Na proveniente do mineral sodalita (TIAN et al., 2019).

3.3.1.3 Estimativa de risco de contaminação por EPTs

Para a possível utilização como insumo agrícola do RB associado aos resíduos orgânicos da palma de óleo deve ser avaliado dois quesitos importantes; os riscos relacionados à lixiviação de elementos para águas subterrâneas e a incorporação de EPTs ao solo, assim, garantindo segurança ambiental na utilização do novo insumo (KLAUBER; GRÄFE, 2011).

A estimativa de EPTs em águas subterrâneas foi calculada, sendo utilizado as maiores doses dos tratamentos e como parâmetro de comparação seguiu-se a normativa estabelecida pela Resolução do CONAMA 420/2009 que trata do limite de EPTs em águas subterrâneas (Tabela 3).

Tabela 3. Estimativa da concentração de elementos potencialmente tóxicos lixiviados para a água subterrânea, considerando a maior dose dos tratamentos.

Elementos	¹ VI em águas subterrâneas	Concentração em águas subterrâneas			
		T1	T2	T3	T4
		-----($\mu\text{g L}^{-1}$)-----			
Na	-	20805	18157	434	400
Al	3500	716	658	93	0,0
Sb	5	-	-	-	-
As	10	1,4	1,4	1,4	1,4
Ba	700	-	-	-	-
B	500	140,1	140,1	140,1	140,1
Cd	5	0,4	0,4	0,4	0,4
Pb	10	1,1	1,1	1,1	1,1
Co	70	-	-	-	-
Cu	2000	17,2	14,1	0,9	0,4
Cr	50	18,8	4,1	2,2	2,3
Fe	2450	940	1199	51	0,0
Mn	400	13,4	5,2	1,9	2,1
Hg	1	0,1	0,1	0,1	0,1
Mo	70	-	-	-	-
Ni	20	0,7	0,7	0,7	0,7
Ag	50	-	-	-	-
Se	10	1	1	1	1
Zn	1050	2,8	2,1	2,1	2,1

¹Valores de intervenção de EPTs em águas subterrâneas estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009. T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0.

De forma geral, nenhum elemento com potencial tóxico apresentou concentrações acima da normativa, de forma a causar dano para as águas subterrâneas. Entretanto, os tratamentos que possuem RB apresentaram valores elevados de Na em relação aos outros elementos. Porém, a resolução (CONAMA 420/2009) não define valores de intervenção para o Na, devendo ser responsabilidade de cada estado prever valores para este elemento. No estado do Pará não há definição de valores de investigação em águas subterrâneas para este elemento. Já no estado de São Paulo por exemplo, o valor de referência de qualidade identificado como o valor máximo permitido (VMP) é de 200.000 $\mu\text{g Na L}^{-1}$ (CETESB, 2016).

A estimativa do risco de contaminação do solo (Tabela 4) também foi calculada usando as maiores doses dos tratamentos e considerou o que foi adicionado via aplicação dos tratamentos no solo e o total lixiviado durante o experimento de lixiviação. Esses valores foram comparados aos valores de referência de qualidade (QRVs) para EPTs no Estado do Pará (FERNANDES et al., 2018).

Tabela 4. Estimativa da concentração de elementos potencialmente tóxicos no solo, considerando a maior dose dos tratamentos.

Elementos	¹ Valores de referência para EPTs no solo	Estimativa da concentração no solo			
		T1	T2	T3	T4
------(mg kg ⁻¹)-----					
Al	8700	3178	3478	149,7	0,1
Sb	-	-	-	-	-
As	2,6	0,2	0,17	0,05	1
Ba	33,4	-	-	-	-
B	-	5,61	0,3	81,5	-
Cd	0,9	0,04	0,04	0,04	0,09
Pb	7,5	1,02	1,02	1,02	1,12
Co	-	-	-	-	-
Cu	18,2	2,05	1,61	2,06	23,7
Cr	35,5	0,02	0,02	0,02	0,6
Fe	9000	6663	6353	2390	8850
Mn	180	5,21	3,28	3,11	-
Hg	0,45	0,05	0,05	0,05	0,1
Mo	0,09	-	-	-	-
Ni	6,1	0,07	0,07	0,07	0,15

Ag	-	-	-	-	-
Se	-	0,02	0,02	0,02	1
Zn	21	2,09	1,26	2,72	5,11

¹Valores de referência de qualidade (QRVs) para EPTs em solos do estado do Pará (Fernandes et al., 2018). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0.

Não foi encontrado nenhum elemento com valor acima da referência de qualidade de solos (QRVs). Mesmo utilizando a dose mais alta dos tratamentos (120 t ha⁻¹) não houve risco de contaminação do solo. Seguindo o estimado, Al e Fe foram os elementos com maiores concentrações no solo, especialmente nos tratamentos que continham RB, sobretudo não tiveram impacto negativo sobre o desenvolvimento do capim Sabiá.

O balanço elementar indicou que os elementos P, K, Ca, Mg, Cu, Zn e Mn tiveram saldo positivo no solo por meio da aplicação dos tratamentos, com exceção do K no tratamento T1 e Cu no tratamento T3 (120 t ha⁻¹), os quais, deixaram um balanço negativo. Os tratamentos com RB e ou resíduos de palma de óleo (T1, T2 e T3) deixaram um balanço positivo de P e K nas colunas de solo, quando comparado com o tratamento T4, demonstrando melhoria na eficiência do uso desses nutrientes. A alta quantidade aportada de K é proveniente dos resíduos orgânicos, no entanto, sem a associação com RB aos resíduos orgânicos esse nutriente é perdido, além da quantidade aplicada ao solo (Apêndice A1).

3.3.2 Experimento 2: eficiência agrônômica dos condicionadores de solo

3.3.2.1 Avaliação do capim Sabiá

Entre os parâmetros avaliados somente número de perfilhos (NP) e massa seca total (MST) sofreram influência ($p < 0,05$) dos tratamentos (Figura 5). A altura de plantas (AP), massa seca da raiz (MSR) e índice de clorofila (SPAD) não apresentaram diferenças entre as doses e os condicionadores (dados não apresentados).

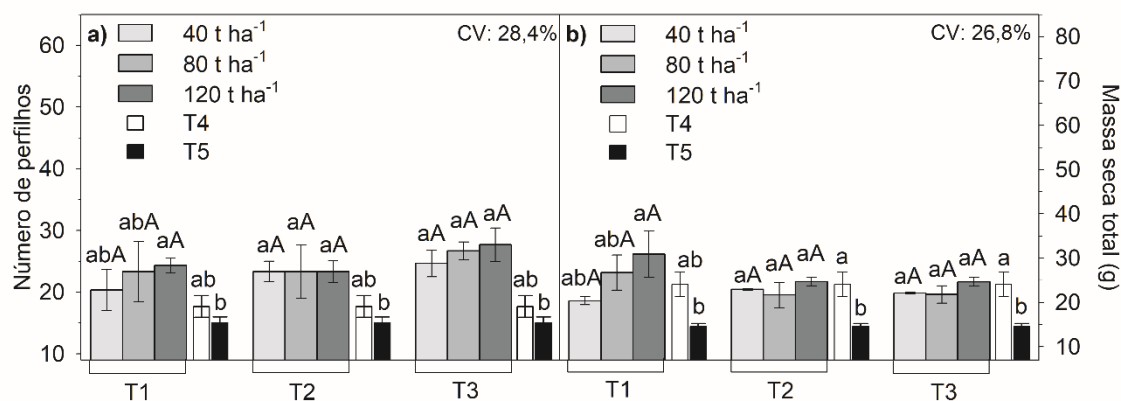


Figura 5. Número de perfilhos (a) e massa seca total (b) de capim Sabiá sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. As letras minúsculas comparam as doses com o T4 e T5 e as letras maiúsculas comparam a mesma dose pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração. As barras de erro representam o erro padrão.

A AP oscilou entre 86,6-104 cm e não apresentou diferença ($p > 0,05$). E esse resultado está relacionado à capacidade que as gramíneas do gênero *Urochloa* possuem em relação à adaptação do crescimento, mesmo em condições extremas de solos ácidos e baixa fertilidade (PEREIRA et al., 2009). Da mesma maneira, em cultivo de mostarda com solo alterado com lodo de esgoto e até 30% de RB, não houve influência sobre a altura das plantas, demonstrando que até determinada dose o RB não impacta no crescimento das plantas (BERTA et al., 2021).

O NP aumentou ($p < 0,05$) com a aplicação da associação de RB e resíduo da palma de óleo, como somente na aplicação do resíduo orgânico e do T4, comparado ao T5. As doses do T1, T2 e T3 não tiveram influência sobre o perfilhamento. Os tratamentos T1, T2, T3 e T4 produziram em média 9,4 perfilhos a mais que o T5 (Figura 5a). A nutrição vegetal é um dos principais fatores que interfere sobre o perfilhamento das gramíneas (LANGER, 1972). Sendo assim, a baixa fertilidade do solo afetou o perfilhamento das plantas.

Os condicionadores (T1, T2 e T3), independente da dose apresentaram o mesmo potencial em produção de MST quando comparado ao solo que recebeu calagem (T4) (Figura 5b). A média dos tratamentos e doses produziu cerca de 64% de incremento em MST relacionada ao T5. O T1 foi o único que as doses tiveram interferência, no qual, 120 t ha⁻¹ apresentou maior MST. Logo, pode-se inferir que o uso do RB associado não diminui a produção de biomassa das plantas, principalmente pela inferioridade do T5 em

relação aos outros tratamentos. Em solo contaminado por metais e cultivado com gramíneas, a aplicação de 5% de RB (p/p) produziu maior rendimento ($p < 0,05$) que o uso do calcário (GRAY et al., 2006). A associação de RB e lodo de esgoto em área de revegetação propiciou maior nível de matéria orgânica e melhor fertilidade para o crescimento de capim Vetiver (GAUTAM et al., 2018).

A adequada nutrição vegetal é requisito para uma boa produção vegetal das plantas, e os nutrientes mais importantes, com exceção do Ca, apresentaram valores adequados para uma boa produção das gramíneas sob a aplicação de T1 e T2 (Apêndice B1). Essas descobertas sugerem que a aplicação de RB alterado com resíduo orgânico não inibi a absorção de nutrientes nas gramíneas e indica o potencial para maior eficiência desses elementos no solo (CUSACK et al., 2022).

Não houve diferenças ($p > 0,05$) nos tratamentos para a MSR e índice Spad, indicando que os tratamentos e suas respectivas doses não interferiram nesses parâmetros. O efeito combinado de RB e fontes de resíduos orgânicos aplicado no solo, causou maior densidade das raízes de *Sinapis Alba* (BERTA et al., 2021). O índice Spad apresenta alta correlação com as concentrações de clorofila e nitrogênio foliar, e indica também o estado nutricional e fisiológico da planta (SILVA JR., 2013). Sendo assim, a aplicação dos condicionadores à base de RB e resíduos da palma de óleo não afetaram o desenvolvimento do capim Sabiá. Assim como, a aplicação direta de 10% de RB ao solo não teve efeito negativo sobre o crescimento e desenvolvimento da forrageira *Cynodon dactylon* (WANG; GASTON, 2014).

O aspecto visual das plantas de capim Sabiá após 50 dias de cultivo corrobora com os resultados da altura de plantas, sem distinção entre os tratamentos. Porém, na biomassa total das plantas é possível observar incremento com os tratamentos (T1, T2, T3 e T4), independentemente da dose aplicada, quando comparado com o solo que não recebeu nenhum tipo de incremento para a melhoria da fertilidade (T5). As formulações de condicionador de solos contendo RB e resíduos orgânicos da palma de óleo apresentaram resultados similares à aplicação do calcário (T4), demonstrando que o RB não causou impacto negativo no acúmulo de biomassa vegetal do capim Sabiá. Do mesmo modo, também é possível observar maior NP das plantas em todos os tratamentos comparado à testemunha (Apêndice C1).

3.3.2.2 Parâmetros de fertilidade do solo

Após o cultivo do capim Sabiá foi avaliado às condições físico-químicas do solo. Com exceção da capacidade de troca catiônica (CTC), o pH em água, a acidez trocável (Al^{3+}), a saturação por bases (V%) e a porcentagem de sódio trocável (PST) apresentaram diferenças ($p < 0,05$) entre os tratamentos (Figura 6).

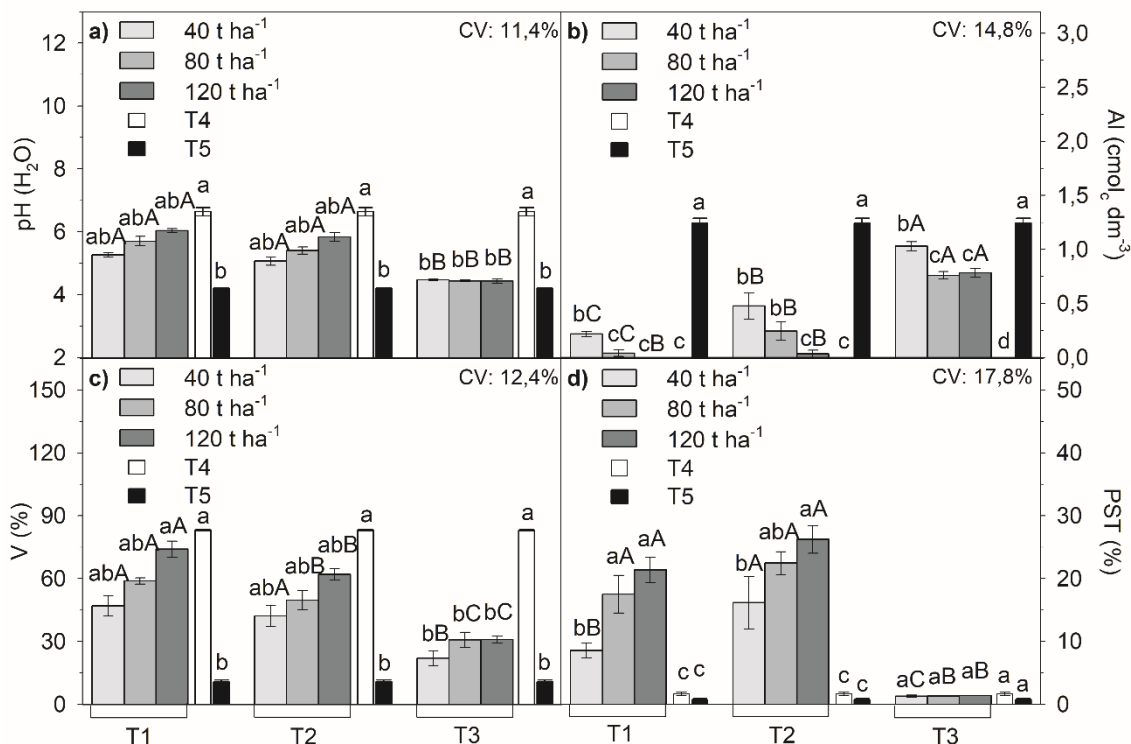


Figura 6. pH em água (a), alumínio trocável (b), saturação por bases (c) e porcentagem de sódio trocável (d) do solo após a condução de experimento sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. As letras minúsculas comparam as doses com o T4 e T5 e as letras maiúsculas comparam a mesma dose pelo teste SNK ($p < 0,05$). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração. As barras de erro representam o erro padrão.

O pH do solo nativo sem alteração (T5) apresentou valor de 4,2, enquanto o tratamento que recebeu calcário apresentou o maior valor (6,6) comparado aos outros tratamentos ($p < 0,05$) em todas as doses (Figura 6a). As doses não alteraram o pH dos condicionadores (T1, T2 e T3), entretanto o pH do T4 sempre foi superior ($p < 0,05$). A aplicação de T1 e T2 aumentou significativamente ($p < 0,05$) o pH do solo quando comparado ao T3, variando em média de 5,4 a 5,65 em todas as doses. A aplicação da das doses do T3 apresentou pH (4,3) similar ao da mata nativa (T5). O aumento do pH do solo com a adição de RB também foi observado em outros trabalhos (BERTA et al., 2021). Por exemplo, após 3 semanas de cultivo de cevada com adição de uma taxa de

16,5% de RB, observou-se aumento do pH do solo de 6,8 para 8,3 (RUYTERS et al., 2011).

A concentração do alumínio trocável (Al^{3+}) é correlacionada negativamente com o pH. Logo, no tratamento com aplicação de calcário (T4) o Al^{3+} foi neutralizado, indicando a eficiência do calcário em corrigir o Al^{3+} tóxico (Figura 6b). Em contrapartida o T5 apresentou valores de Al^{3+} superiores a $1,24 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ oriundos da mineralogia do solo com predominância de caulinita ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) e quartzo (SiO_2). O T1 e T2 apresentaram valores inferiores a $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e quanto maior a dose menor era a concentração de Al^{3+} , denotando o potencial para a neutralização dos níveis de Al^{3+} . Ao adicionar resíduo alcalino como o RB a solos ácidos e com alta toxidez por Al^{3+} , a mobilidade dos íons Al^{3+} pode ser reduzida através do aumento do pH (BERTA et al., 2021). O T3 também foi eficiente em diminuir a toxidez do Al^{3+} , mas não com a mesma eficiência que o T1, T2 e T4.

Em virtude da maior quantidade de Ca e Mg em sua composição, o tratamento T4 foi o que proporcionou o maior aumento ($p < 0,05$) da saturação por bases (V%) no solo, para 83% (Figura 6c). A V% dos tratamentos T1 e T2 independentemente da dose apresentaram valor semelhante ($p > 0,05$) ao T4, com V% variando entre 50-80%, entretanto foram superiores ao T5 (10,8%). Na aplicação do T3, as doses não diferiram com V% entre 21-30% ($p > 0,05$), sendo bem inferiores ao T1, T2 e T4 e semelhante ao T5.

Quanto a porcentagem de sódio trocável (PST), os tratamentos que continham RB (T1 e T2), especialmente nas duas maiores doses 80 e 120 t ha^{-1} apresentaram os maiores ($p < 0,05$) valores de PST (Figura 6d). As doses do T1 e T2 sempre foram superiores ao T3, que apresentou PST inferior a 2%, juntamente com o T4 e T5. A PST é o percentual de Na^+ em relação à CTC, sendo assim, já era esperado que tratamentos contendo RB tivessem maiores valores de PST no solo, devido à presença de Na^+ (LEITE et al., 2022). Para que um solo seja considerado sódico, a PST tem que ser maior ou igual a 15% (RIBEIRO et al., 2009). Nessa perspectiva a aplicação de 40 t ha^{-1} de T1 (Figura 6d) não causou impacto ao ponto de mudar a categoria de classificação do solo quanto ao nível de PST. No entanto, esse parâmetro deve ser avaliado ao longo das aplicações dos tratamentos contendo RB.

O clima tropical e os altos volumes pluviométricos da região são responsáveis diretos pela lixiviação do Na^+ , devido a sua alta mobilidade, sendo estes fatores mitigadores de Na^+ no solo. Apesar da maior sodicidade nos tratamentos T1 e T2, o

crescimento e desenvolvimento da gramínea não foi comprometido mesmo nas maiores concentrações de Na^+ , sendo possível observar a alta capacidade de remoção de Na^+ pelo capim Sabiá (Apêndice B2), intensificado pela presença de resíduo orgânico da palma de óleo aplicado no solo (OLIVEIRA et al., 2021).

Os teores trocáveis para os macronutrientes Ca, Mg, P, K e S foram avaliados (Tabela 5). Ca e Mg apresentaram maiores valores no tratamento T4, no entanto, os resíduos orgânicos incrementaram esses elementos no solo comparado ao T5 ($p < 0,05$). Da mesma maneira ocorreu para o P e K, onde o T5 apresentou menores teores, entretanto, até mesmo o T4 adubado com P e K apresentou baixos teores em comparação com os outros tratamentos contendo resíduo orgânico e RB.

Tabela 5. Teores trocáveis dos elementos Ca, Mg, P, K e S no solo em experimento sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.

Tratamentos	Teor trocável					
	Ca	Mg	P	K	S	
	t ha ⁻¹	cmolc dm ⁻³	-----mg dm ⁻³ -----			
T1	40	1,89bA	0,23dA	47,8aA	16,63cA	228,8aA
	80	1,63cA	0,35cA	45,6aA	60,17bA	226,0aA
	120	2,33bA	0,53bA	56,9aA	162,3aA	230,1aA
T2	40	1,19cA	0,07eA	32,9bA	11,03cA	266,2aA
	80	1,02cA	0,10eA	25,7bB	45,57bA	250,0aA
	120	1,47cB	0,14eB	37,0bA	77,80aA	231,2aA
T3	40	1,09cA	0,08eA	50,3aA	11,20cA	258,9aA
	80	1,25cA	0,21dA	54,7aA	13,13cB	299,8aA
	120	1,25cB	0,32cA	43,6aA	14,83cB	252,1aA
T4		3,35a	1,96a	29,0b	8,30c	177,5b
T5		0,53d	0,05e	22,2b	8,63c	129,6b
CV (%)		12,4	12,0	23,7	14,0	21,2

As letras minúsculas comparam todos os tratamentos pelo teste Scott-Knott e as letras maiúsculas comparam as mesmas doses pelo teste SNK ($p < 0,05$). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração.

A maior parte do S (~90%) é liberado no solo pela mineralização da matéria orgânica e, por isso, os teores de S disponível foram baixos no T4 e T5 e maiores nos tratamentos com associação de RB e resíduo orgânico. A utilização de compostos ricos

em matéria orgânica fornece P, K, S e micronutrientes necessários para o solo, assim, construindo a fertilidade ao longo do tempo (OLSEN et al., 2015).

Os micronutrientes, juntamente com os EPTs também foram determinados na base trocável no solo (Tabela 6). O T5, como esperado, apresentou menores níveis de micronutrientes no solo, com exceção do Fe que apresentou maiores teores relacionados aos outros tratamentos e doses.

Tabela 6. Teores trocáveis dos elementos B, Cu, Fe, Mn, Zn e Pb no experimento sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.

Tratamentos		Elementos					
		B	Cu	Fe	Mn	Zn	Pb
	t ha ⁻¹	-----mg dm ⁻³ -----					
T1	40	0,72bA	0,60bA	132,6cB	1,63bA	3,47bB	0,39cA
	80	0,65bA	0,47cB	116,6cB	0,57dB	2,37bB	0,20dA
	120	0,90aA	0,50cA	107,3cB	0,53dB	2,60bB	0,11dB
T2	40	0,87aA	0,47cA	131,0cB	0,67cA	2,80bB	0,44bA
	80	0,62bA	0,23dB	129,0cB	0,33dB	1,10bB	0,28cA
	120	0,77bA	0,40cA	90,6dB	0,27dB	2,10bB	0,13dB
T3	40	0,67bA	0,70bA	301,3bA	0,97cA	4,27aA	0,53bA
	80	0,68bA	0,90aA	258,3bA	2,33aA	5,37aA	0,67aA
	120	0,78bA	0,57bA	249,3bA	2,77aA	4,90aA	0,60aA
T4		1,11a	0,23d	57,6e	1,17c	2,50b	0,16d
T5		0,27c	0,40c	522,6a	0,50d	2,47b	0,75a
CV (%)		9,5	23,9	16,7	26	14,5	24,5

As letras minúsculas comparam todos os tratamentos pelo teste Scott-Knott e as letras maiúsculas comparam as mesmas doses pelo teste SNK ($p < 0,05$). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração.

O resíduo de palma de óleo é fonte de micronutrientes para o solo. Logo a sua aplicação no solo associado ao RB resultou em maiores teores para B, Cu, Mn e Zn comparado ao T5 (solo nativo). Porém, somente a aplicação dos resíduos orgânicos (T3) apresentou maiores teores de Fe, Zn e Mn quando comparado ao T1 e T2.

Entre Ni, Cd, Cr e Pb, o único que apresentou resultados acima do limite de detecção foi o Pb, porém com concentração irrelevante e menor nos tratamentos

associados com RB quando comparado ao solo nativo (T5) ($p < 0,05$). O RB nesse caso não contaminou o solo, como o encontrado em aplicações de até 15% de RB, onde o conteúdo de Pb não aproximou-se dos valores limites para a poluição do solo na Hungria (BERTA et al., 2021).

Os parâmetros agronômicos do capim Sabiá e os de fertilidade do solo foram submetidos a uma análise de agrupamentos. Independentemente da dose aplicada, os tratamentos mostraram similaridade entre si. O T1 e T2 apresentaram a maior similaridade, os quais agruparam, embora com menor similaridade, ao T3. Além disso, estes tratamentos se agruparam ao T4 em uma menor similaridade, porém o T5 foi o que apresentou a maior distância entre os tratamentos (Apêndice D1). Sendo assim, pode-se equiparar os tratamentos contendo RB ao tratamento padrão da agricultura com o uso do calcário (T4), tendo em consideração a produção vegetal e a nutrição do solo. Com base nos resultados, o RB adicionado a resíduos orgânicos como os da palma de óleo pode ser benéfico em aplicações agrícolas, especialmente em solos arenosos, ácidos e com baixo conteúdo de nutrientes (BANNING et al., 2014; UJACZKI et al., 2016).

3.3.2.3 Índice de qualidade do solo (IQS)

A avaliação das propriedades individuais do solo pode não ser uma medida apropriada para a qualidade do solo (MASTO et al., 2008). O IQS é uma ferramenta que pode ser usada para avaliar os efeitos no solo em função das práticas de manejo e fertilidade, no qual, enfatiza as diretrizes para a avaliação da qualidade do solo, tendo estreita relação com a produtividade das culturas (ANDREWS et al., 2002a; MUKHERJEE; LAL, 2014). O IQS já vem sendo aplicado em diversas simulações para avaliar a qualidade dos solos, sendo este um produto de algumas propriedades do solo avaliadas em modelos multifatoriais (ANDREWS et al., 2002b; MASTO et al., 2008; MUKHERJEE; LAL, 2014; RAHMANIPOUR et al., 2014; LI et al., 2018;).

Para a aplicação do IQS podem ser selecionadas propriedades químicas, físicas ou biológicas do solo e até parâmetros de produção das plantas (FRIEDMAN et al., 2001). Nesta pesquisa, um conjunto de treze parâmetros físico-químicos foram analisados pela análise fatorial com extração por componente principal (ACP): pH em água, V%, Al^{3+} , $H+Al$, PST, P, K, Na^+ , S, B, Cu, Zn e Pb). A CTC, Ca e Mg não se adequaram a análise fatorial exploratória e foram retirados do modelo. A ACP conseguiu extrair quatro componentes que explicaram 85% da variação total.

Os parâmetros selecionados foram pontuados com base no desempenho e funções e por fim integrados em um índice categorizado de qualidade de solo (Figura 7), podendo variar entre 0,0 – 1,0 (ANDREWS et al., 2002a; RAHMANIPOUR et al., 2014). Os valores do IQS ficaram na faixa de 0,3-0,68, os resultados do teste de média mostraram que o manejo do solo com incorporação de resíduo orgânico, RB, calcário e adubação afetaram o IQS ($p < 0,05$). Os valores mais elevados foram encontrados no solo que recebeu a aplicação de resíduos de palma de óleo (T3), classificado na categoria médio (0,68). O incremento de matéria orgânica no solo aumenta a qualidade do solo, melhorando o estado nutricional e a atividade microbiana (MASTO et al., 2008). O solo que representava a mata nativa (T5) também foi classificado com IQS médio (0,6), porém menor ($p < 0,05$) que o T3.

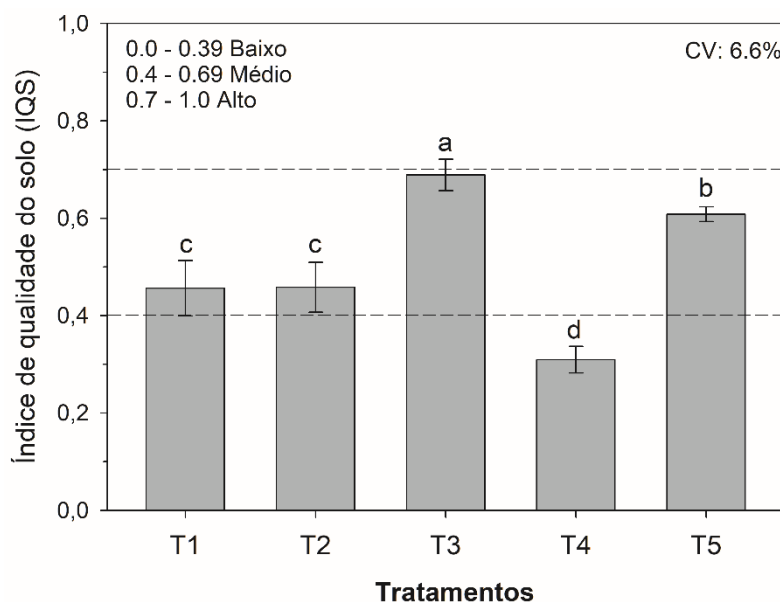


Figura 7. Índice de qualidade do solo em experimento de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. Letras minúsculas comparam os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), independentemente da dose. T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração. Categorias (baixo, médio e alto) indicadas por Rahmanipour et al. (2014).

A aplicação de calcário juntamente com as atividades que envolvem esse manejo (revolvimento do solo e rápida mineralização da matéria orgânica) diminuiu a qualidade do solo para um nível baixo (0,3), comparado ao T5. O uso dos tratamentos T1 e T2 também diminuíram (0,45) a qualidade do solo, porém o incremento de resíduo orgânico amenizou o impacto. Determinadas práticas de manejo têm efeitos negativos na qualidade

do solo e outras, como plantas de cobertura e incremento de matéria orgânica tem efeito positivo (FRIEDMAN et al., 2001).

3.3.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A análise qualitativa por FTIR realizada nos resíduos orgânicos utilizados na composição dos tratamentos (fibra, bucha, borra e composto de resíduos de palma de óleo) pode ser interpretada para os resultados dos elementos lixiviados na água como para os do solo.

As principais bandas foram observadas em torno de 1040 a 3270 cm^{-1} (Figura 8). Estiramento em torno de 3270 cm^{-1} (3100 – 3500 cm^{-1}), sendo característica da vibração do alongamento da hidroxila (-OH), referente aos grupos carboxílicos, fenólicos, álcoois e água. Em muitos casos também correspondem à vibração de estiramento de compostos de amina (N-H) (CARNEIRO et al., 2018). Grupos funcionais reativos, como as carboxilas (RCOOH), hidroxilas fenólicas e moléculas nitrogenadas, atuam diretamente na sorção de metais. A contribuição da MO na sorção de EPTs, é advinda dessa carga negativa originada da dissociação dos grupos COOH (carboxila) e OH (fenólica), formada pela decomposição da MO (DICK et al., 2009).

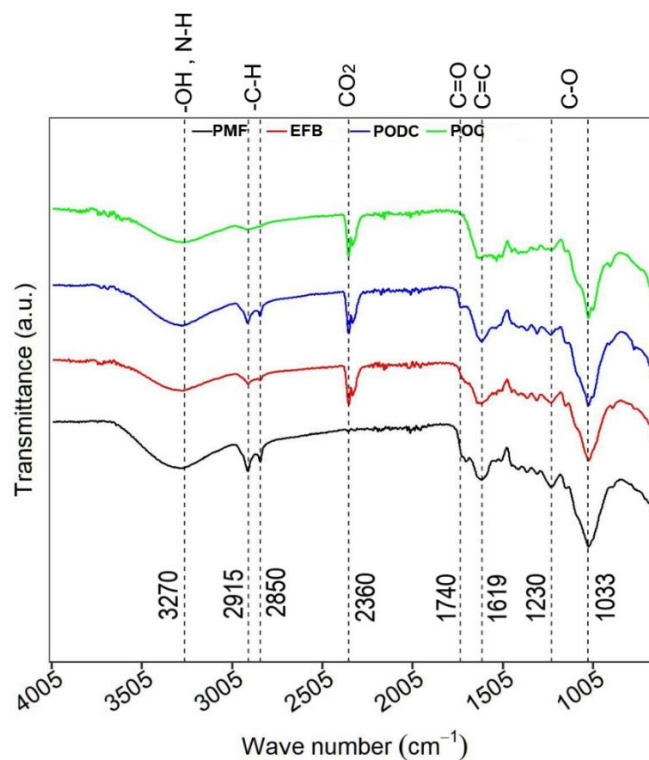


Figura 8. FTIR spectra de resíduos orgânicos utilizados em ensaio de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. Fibras do cacho-PMF, bucha do cacho-

EFB e borra-PODC fazem parte dos resíduos orgânicos (POMW), já o POC é o composto proveniente dos resíduos orgânicos misturados.

Os estiramentos identificados entre a faixa de 2850 – 2915 cm^{-1} , possivelmente indicam a presença de grupos alifáticos como os alcanos (C-H). A faixa 2360 cm^{-1} pode ser associada ao movimento de vibração das moléculas de CO_2 ou associada a ruídos do equipamento, uma vez que esta banda não foi detectada na amostra de fibra (TAHERYMOOSAVI et al., 2017; LIANG et al., 2018).

O estiramento encontrado em 1740 e 1620 cm^{-1} é característico dos grupos éster (C=O) e grupos alcenos (C=C), respectivamente. A vibração de 1230 e 1040 cm^{-1} referem-se aos grupamentos de álcoois e ácidos carboxílicos (C-O) (MOVASAGHI et al., 2008; TAHERYMOOSAVI et al., 2017).

A presença de diferentes grupos funcionais presentes na matéria orgânica, é um fator que pode apresentar efeito positivo na estabilização de EPTs, diminuindo sua biodisponibilidade (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013; MORENO-BARRIGA et al., 2017). Além disso, a presença de compostos orgânicos como éster, álcoois, alcanos, alcenos e ácidos carboxílicos podem influenciar diretamente a adsorção de Cd, Pb, e Zn por complexação de metais (KHAN et al., 2017).

A matéria orgânica utilizada nos condicionadores é rica em grupos funcionais orgânicos que podem aumentar o potencial de adsorção de EPTs, assim como, atuar como sítios de adsorção de nutrientes.

3.4 Conclusão

De acordo com os resultados das colunas de lixiviação durante o período de avaliação, os EPTs apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Na estimativa para contaminação das águas subterrâneas, considerando a maior dose aplicada, nenhum EPT foi detectado, seguindo a normativa estabelecida pelo CONAMA. Da mesma maneira ocorreu para a estimativa da contaminação do solo, onde nenhum EPT apresentou valor acima dos valores de referência para a qualidade do solo no estado do Pará.

A associação de RB e resíduos da palma de óleo quando aplicado no solo aumenta a produção vegetal da *Urochloa híbrida*, equiparando ao resultado da aplicação de calcário. Os parâmetros de fertilidade do solo (pH, V%, macronutrientes e micronutrientes) foram incrementados com a utilização de RB + resíduos da palma de óleo, assim como, quanto maior a dose menor a toxidez por Al^{3+} . Entretanto, doses

maiores que 40 t ha⁻¹ torna o solo sódico. Todavia, o IQS independentemente da dose permaneceu médio nos tratamentos T1, T2, T3 e T5.

Novas abordagens com a utilização de plantas leguminosas devem ser consideradas, além da incorporação de novas doses e análise de regressão, o efeito dos condicionadores na comunidade microbiana do solo.

REFERÊNCIAS

- ACEÑA-HERAS, S., NOVAK, J., PEÑALOSA, J. M., MORENO-JIM, E., 2019. Influence of pyrolyzed grape-seeds / sewage sludge blends on the availability of P, Fe, Cu, As and Cd to maize. **Agronomy**, 9, 406. p. 1–18. <https://dx.doi.org/10.3390/agronomy9070406>.
- AMARAL, A. S., ANGHINONI, I., HEINRICHS, R., BERTOL, I., 2004. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28, 359-367.
- ANDREWS, S. S., MITCHELL, J. P., MANCINELLI, R., KARLEN, D. L., HARTZ, T. K., HORWATH, W. R., PETTYGROVE, G. S., SCOW, K. M., MUNK, D. S., 2002a. On-Farm Assessment of Soil Quality in California's Central Valley. **Agronomy Journal**, 94, 12–23. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.1200>.
- ANDREWS, S. S., KARLEN, D. L., MITCHELL, J. P. A., 2002b. Comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agric. Ecosystem Environmental**, 90, 1, 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8).
- ARCOVERDE, N. S., SALVIANO, A. M., OLSZEWSKI, N., DE MELO, S. B., CUNHA, T. J. F., GIONGO, V., PEREIRA, J. de S., 2015. Qualidade física de solos em uso agrícola na região semiárida do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39, 5, 1473–1482. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140282>.
- BAME, I. B., HUGHES, J. C., TITSHALL, L. W., BUCKLEY, C. A., 2013. Leachate characteristics as influenced by application of anaerobic baffled reactor effluent to three soils: A soil column study. **Chemosphere**, 93, 9, 2171–2179. <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.080>.
- BANNING, N. C., SAWADA, Y., PHILLIPS, I. R., MURPHY, D. V., 2014. Amendment of bauxite residue sand can alleviate constraints to plant establishment and nutrient cycling capacity in a water-limited environment. **Ecological Engineering**, 62, 179–187. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.034>.
- BERTA, K. M., KURDI, R., LUKÁCS, P., PENK, M., SOMOGYI, V., 2021. Red mud with other waste materials as artificial soil substitute and its effect on *Sinapis alba*. J. **Environmental Management**, 287, 112311, 2021. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112311>.

BERTONCINI, E. I., MATTIAZZO, M. E., 1999. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23. 3, 737-744.

BIEDERMAN, L. A., HARPOLE, W. S., 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **Global Change Biology Bioenergy**, 5. 2. 202–214. <https://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12037>.

BRASIL - **Resolução CONAMA n. 420 de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, 30 dez. 2009.

BRASIL - Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply, 2006a. **Instrução Normativa n° 35**, 04 de julho de 2006a Brasília, DF.

CAMPOS, T., CHAER, G., DOS SANTOS LELES, P., SILVA, M., SANTOS, F., 2019. Leaching of heavy metals in soils conditioned with biosolids from sewage sludge. **Floresta e Ambiente**, 26. 1, 1–10. <https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.039918>.

CARNEIRO, J. S. da. S., LUSTOSA FILHO, J. F., NARDIS, B. O., RIBEIRO SOARES, J., ZINN, Y. L., MELO, L. C. A., 2018. Carbon stability of engineered biochar-based phosphate fertilizers. **ACS Sustainability Chemistry e Engineering**, 6. 14203-14212. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02841>.

CETESB. **Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2013-2015**. Modesto, R. P. et al. CETESB, 2016, 308 p. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103). Available at: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/Cetesb_QualidadeAguasSubterraneas2015_Web_20-07.pdf.

CHOWDHARY, P., BHARAGAVA, R. N., 2020. Green technologies and environmental sustainability. **Environment Development Sustainability**, 22, 2699–2701. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-00304-1>.

COSTA, E. T. de S., GUILHERME, L. R. G., CURI, N., OLIVEIRA, L. C. A. de., VISIOLI, E. L., LOPES, G., 2008. Subproduto da indústria de alumínio como amenizante de solos contaminados com cádmio e chumbo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32. 6, 2533–2546. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600030>.

COSTA, E. T. de S., GUILHERME, L. R. G., LOPES, G., LIMA, J. M., CURI, N., 2012. Competitive sorption of arsenate and phosphate on aluminum mining by-product. **Water air soil pollution**, 223. 8, 5433–5444. <https://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1291-5>.

CUSACK, P. B., HEALY, M. G., CALLERY, O., DI CARLO, E., UJACZKI, É., COURTNEY, R., 2022. An Investigation into the Growth of *Lolium perenne* L. and Soil Properties Following Soil Amendment with Phosphorus-Saturated Bauxite

Residue. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, 5, 13-19.
<https://doi.org/10.1007/s00128-022-03514-6>.

DICK, D. P., NOVOTNY, E. H., DIECKOW, J., BAYER, C., 2009. Química da Matéria Orgânica do Solo. In: MELO, V. F., ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo, Parte II - Aplicações**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2v. Viçosa, MG. 2009. Cap. XI, p. 1-28.

EUROPEAN COMMISSION. **Circular economy: New Regulation to boost the use of organic and waste-based fertilisers, 2016**. Available at:
http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-826_en.htm (access 14 February 2022).

ELEMENT, C. A. S., 2007. Method 3051A microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. **Zeitschrift für Analytische Chemie**, 111, 362–366.

FERNANDES, A. R., SOUZA, E. S. DE., BRAZ, A. M. DE. S., BIRANIB, S. M., ALLEONI, L. R. F., 2018. Quality reference values and background concentrations of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, 190, 453-463.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.04.012>.

FRIEDMAN, D., HUBBS, M., TUGEL, A., SEYBOLD, C., SUCIK, M., 2001. **Guidelines for soil quality assessment in conservation planning**. Washington, DC: United States Department of Agriculture. Available at:
<http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/sq_assessment_cp.pdf>.

GAUTAM, M., PANDEY, B., AGRAWAL, M., 2018. Identification of indicator species at abandoned red mud dumps in comparison to residential and forest sites, accredited to soil properties. **Ecological Indicators**, 88, 88–102.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.062>.

GAUTAM, M., AGRAWAL, M., 2019. Effects of Red Mud Addition in Soil Fertilized with Cowdung Manure on Growth Performance and Metal Accumulations in Brassica juncea Cultivars Kranti and Pusa Bold. **Communications in Soil Science and Plant Analyses**, 50, 10, 1214–1231. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2019.1614599>.

GELENCSE, A., KOVATS, N., TUROCZI, B., ROSTASI, A., HOFFER, A., IMRE, K., et al., 2011. The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust. **Environmental Science Technology**, 45, 1608–1615.
<https://dx.doi.org/10.1021/es104005r>.

GENTIL, F. H., 2016. **Lixiviação de nutrientes e alteração de propriedades químicas do solo submetido à aplicação de água residuária de graxaria**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, Minas Gerais.

GRAY, C. W., DUNHAM, S. J., DENNIS, P. G., ZHAO, F. J., MCGRATH, S. P., 2006. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using

lime and red-mud. **Environmental Pollution**, 142. 3, 530–539.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.017>.

HEIDARI, S., JALALI, M., 2016. Effect of some cations, anions, and organic residues on potassium leaching and fractionation in calcareous sandy loam soil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 62. 1, 19–35.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1040397>.

KHAN, K.Y., ALI, B., CUI, X., FENG, Y., YANG, X., STOFFELLA, P.J., 2017. Impact of different feedstocks derived biochar amendment with cadmium low uptake affinity cultivar of pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis* L.) on phytoavoidance of Cd to reduce potential dietary toxicity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 141, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.020>.

LANGER, R. H. M., 1972. **How grasses grow**. London. 60p (Studies in Biology, v.34).

LEITE, R. DA. C., LUCHETA, A. R., HOLANDA, R. B., SILVA, P. M. P., CARMO, A. L. V. DO., LEITE, R. DA. C., MELO, C. C. A. DE., COSTA, R. V. DA., MONTINI, M., FERNANDES, A. R., 2022. Bauxite residue valorization - Soil conditioners production through composting with palm oil mill residual biomass. **Science of the Total Environment**, 835, 155413.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155413>.

LI, X., LI, H., YANG, L., REN, Y., 2018. Assessment of soil quality of croplands in the Corn Belt of Northeast China. **Sustainability**, 10. 1, 1–16.
<https://doi.org/10.3390/su10010248>.

LIANG, F., WANG, R., HONGZHONG, X., YANG, X., ZHANG, T., HU, W., MI, B., LIU, Z., 2018. Investigating pyrolysis characteristics of moso bamboo through TG-FTIR and PyGC/MS. **Bioresour. Technol.**, 256, 53–60.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.140>.

LIMA, E. do. V., MARIA, B. G. de. 2020. Pastagem cultivada. In: BRASIL, E. C., CRAVO, M. da. S., VIÉGAS, I. de. J. M. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado do Pará**, 2ª ed. Embrapa, Brasília, DF. p.383-390.

LOPES, A. S. P., GUILHERME, L. R. G., 2007. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 1-64.

MASTO, R. E., CHHONKAR, P. K., SINGH, D., PATRA, A. K., 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. **Environmental Monitoring e Assessment**, 136. 1–3, 419–435. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9697-z>.

MORENO-BARRIGA, F., DÍAZ, V., ACOSTA, J. A., MUÑOZ, M. Á., FAZ, Á., ZORNOZA, R., 2017. Creation of technosols to decrease metal availability in pyritic

tailings with addition of biochar and marble waste. **Land Degradation e Development**, 28. 7, 1943–1951, 2017. <https://doi.org/10.1002/ldr.2714>.

MOVASAGHI, Z., REHMAN, S., REHMAN, I. U., 2008. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of biological tissues. **Applied Spectroscopy Reviews**, 43. 2, 134–179. <https://doi.org/10.1080/05704920701829043>.

MUKHERJEE, A., LAL, R., 2014. Comparison of soil quality index using three methods. **PLoS ONE**, 9. 8, 105981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>.

OLIVEIRA, J. F., FIA, R., GOMES, A. C. C., BIGOGNO, V. S., DE SOUZA ANTÔNIO, T., ALVES, M. R. S., DA CRUZ, T. C., 2021. Multivariate criteria applied in the performance of Tifton 85 grass in a constructed wetland: effects of organic, nutritional, and sodium loads from swine wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**, 28. 17, 21314–21325. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11391-x>.

OLSEN, D. J. R., ENDELMAN, J. B., JACOBSON, A. R., REEVE, J. R., 2015. Compost carryover: nitrogen, phosphorus and FT-IR analysis of soil organic matter. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 101. 3, 317–331. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9680-y>.

PENIDO, E. S., MARTINS, G. C., MENDES, T. B. M., MELO, L. C. A., DO ROSÁRIO GUIMARÃES, I., GUILHERME, L. R. G., 2019. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 172, 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.110>.

PEREIRA, A. L. P., CAMPOS, M. C. C., SOUZA, Z. M. DE., CAVALCANTE, I. H. L., SILVA, V. A. DA., MARTINS FILHO, M. V., 2009. Atributos do solo sob pastagens em sistema de sequeiro e irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**. 33. 2, 377-384. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000200003>.

PIOVESAN, R. P. **Perdas de nutrientes via subsuperfície em colunas de solo sob adubação mineral e orgânica**. 2006. 73f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Departamento de ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

POLLI, V. R. G., VENDRAME, Z. B., SANTOS, M. A. S., GOMES, F. P., 2002. Electrochemical Study of the interaction Between humic acids extracted from soil and Pb²⁺ ion in aqueous solution. **ECS Transactions**, 43,313-317.

R Core Team., 2019. **R: A language and environment for statistical computing**. R Found. Stat. Comput.

RAHMANIPOUR, F., MARZAIOLI, R., BAHRAMI, H. A., FEREDOUNI, Z., BANDARABADI, S. R., 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. **Ecological Indicators**, 40, 19–26. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003>.

RAIJ B. VAN., ANDRADEJ. C., CANTARELA, H., QUAGGIO, J., 2001. **Análise Química para fertilidade de solos tropicais**. INSTITUTO AGRONÓMICO–FUNDAÇÃO IAC, 2001, 285p.

RASHTI, M. R., ESFANDBOD, M., PHILLIPS, I. R., CHEN, C., 2019. Rhizosphere management by biochar and leaching improved plant performance in fresh bauxite residue sand. **Journal of Cleaner Production**, 219, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.013>.

REETZ, Harold F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**/ Harold F. Reetz, Jr; tradução: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: ANDA, 2017. 178p.il.; ISBN 979-10-92366-04-4.

RIBEIRO, M. R., BARROS, M. de. F. C., FREIRE, M. B. G. dos. S., 2009. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, V. de. F., ALLEONI, L. R. F. (Eds). **Química e mineralogia do solo, parte II**. Viçosa: Sociedade brasileira de ciência do solo, 2009. p. 449-484.

RUYTERS, S., MERTENS, J., VASSILIEVA, E., DEHANDSCHUTTER, B., POFFIJN, A., SMOLDERS, E., 2011. The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil. **Environmental Science & Technology**, 45. 4, 1616–1622. <https://doi.org/10.1021/es104000m>.

SANTANA, A. C. de., 2007. Índice de desempenho competitivo das empresas de polpa de frutas do Estado do Pará. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 45. 3. 749-775. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032007000300009>.

SANTINI, T. C., PENG, Y. G., 2017. Microbial Fermentation of Organic Carbon Substrates Drives Rapid pH Neutralization and Element Removal in Bauxite Residue Leachate. **Environmental Science & Technology**, 51. 21, 12592–12601. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.7b02844>.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., OLIVEIRA, J. B., COELHO, M. R., LUMBRERAS, J. F., CUNHA, T. J. F., 2018. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília-DF: Embrapa, 356 p. 2018.

SOUZA, E. S. DE., FERNANDES, A. R., BRAZ, A. M. DE. S., OLIVEIRA, F. B. DE., ALLEONI, L. R. F., CAMPOS, M. C. C. Physical, chemical, and mineralogical attributes of a representative group of soils from the eastern Amazon region in Brazil. **Soil**, 4, 195-212. <https://doi.org/10.5194/soil-4-195-2018>.

TAHERYMOOSAVI, S., VERHEYEN, V., MUNROE, P., JOSEPH, S., REYNOLDS, A., 2017. Characterization of organic compounds in biochars derived from municipal solid waste. **Waste Management**, 67, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.052>.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G., 2017. **Manual de métodos de análise de solo**, 3ª ed., Brasília: Embrapa, 573 p. 2017.

TIAN, T., ZHOU, J., ZHU, F., YE, Y., GUO, Y., HARTLEY, W., XUE, S., 2019. Effect of amendments on the leaching behavior of alkaline anions and metal ions in

bauxite residue. **Journal of Environmental Sciences**, 85, 74–81.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.05.005>.

UJACZKI, É., FEIGL, V., MOLNÁR, M., VASZITA, E., UZINGER, N., ERDÉLYI, A., GRUIZ, K., 2016. The potential application of red mud and soil mixture as additive to the surface layer of a landfill cover system. **Journal of Environmental Sciences**, 44, 189–196. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.014>.

VELASCO MOLINA, M. **Nitrogênio e metais pesados em Latossolo e eucalipto cinquenta e cinco meses após a aplicação de biossólidos**. 2004. 66 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

WANG, J. J., GASTON, L. A., 2014. Nutrient chemistry of manure and manure-impacted soils as influenced by application of bauxite residue. In: HE, Z., ZHANG, H (eds.). **Applied Manure and Nutrient Chemistry for Sustainable Agriculture and Environment**. Springer. 2014. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8807-6_12.

CONCLUSÃO GERAL

O RB associado aos resíduos orgânicos da palma de óleo em processo de compostagem ou ao composto dos resíduos misturados apresentou características importantes para o uso como condicionador de solos. No entanto, a proporção de RB associada aos resíduos orgânicos é importante para a qualidade do condicionador de solos. A aplicação das formulações contendo RB nas maiores concentrações não lixiviou EPTs acima dos parâmetros de qualidade da água subterrânea, além de não agravar os EPTs acima dos parâmetros de qualidade do solo. As formulações foram eficientes em aumentar o pH do solo, V%, nível de nutrientes do solo, assim como diminuir o Al^{3+} . A produção de massa seca total do capim Sabiá aumentou em comparação ao solo que não recebeu nenhum tipo de alteração e equiparou aos resultados do solo com correção tradicional (calagem e adubação). Aqui conseguimos definir uma nova abordagem para a reutilização de resíduos de bauxita e da palma de óleo em associação, atribuindo um possível produto para o incremento da produção vegetal e para a correção e nutrição do solo. Novos estudos devem surgir, testando novas proporções de RB associado a diferentes resíduos orgânicos regionalizados, como também novos testes com dosagens em nível de campo, testando parâmetros físico-químicos-biológicos.

APÊNDICES

Apêndice A - Balanço elementar

O balanço elementar foi calculado pela concentração dos elementos nos condicionadores e a taxa de aplicação dos mesmos nas colunas, subtraído da concentração dos elementos e volume nos lixiviados.

Tabela A1. Balanço de P, K, Ca, Mg, Cu, Zn e Mn após a simulação de lixiviação em colunas com aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.

Tratamentos	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn
	-----Total de perda ou ganho (kg ha ⁻¹) -----						
T1 (40 t ha ⁻¹)	189,3eA	81,4cB	206,4eA	63,5eA	-1,7bA	0,7cA	2,5cA
T1 (80 t ha ⁻¹)	385,6bA	-0,3dB	429,1cA	99,7dA	-1,9bA	1,9bA	5,6bA
T1 (120 t ha ⁻¹)	575,0aA	-0,5dB	731,7bA	159,1bA	-1,4bA	3,2aA	6,3bA
T2 (40 t ha ⁻¹)	71,6hB	148,1bA	105,3fB	35,3fB	-0,02cA	0,1cB	1,7dA
T2 (80 t ha ⁻¹)	149,8fC	244bA	190,7eB	63,8eB	-1,2bA	0,7cA	3,4cA
T2 (120 t ha ⁻¹)	223,8dC	476,9aA	226,8eC	80,7dC	-1,3bA	1,8bB	5,2bA
T3 (40 t ha ⁻¹)	109,9gAB	-21,9dC	53,1fC	5,3gC	1,0bA	0,4cB	1,1dA
T3 (80 t ha ⁻¹)	223,2dB	-960,3eC	197,2eB	68,8eB	2,5aA	1,6bA	3,6cA
T3 (120 t ha ⁻¹)	337,3cB	-1401eC	340,9dB	120,3cB	3,8aA	2,7aA	5,7bA
T4	0,7i	7,10d	1,641a	237,3a	-0,1c	-0,6c	11,6a
CV (%)	2,05	>100	6,8	18,5	7,5	5,4	23,3

As letras minúsculas comparam todos os tratamentos pelo teste Scott-Knott e as letras maiúsculas comparam as mesmas doses pelo teste SNK ($p < 0,05$). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0.

Apêndice B - Análise nutricional do capim Sabiá

Ao fim dos 50 dias de cultivo do capim Sabiá procedeu-se com a coleta das folhas que foram lavadas em água corrente. Posteriormente foram secas (55° C) em estufa até peso constante e moídas em moinho estacionário do tipo Willey para análise dos teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Si e Co (NOGUEIRA et al., 2005).

Tabela B1. Teor foliar de macronutrientes em *Urochloa hybrida* cv. Sabiá em função da aplicação de doses de condicionador de solos a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.

Tratamentos	Doses	Nutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
	t ha ⁻¹	----- g kg ⁻¹ -----					
T1	40	23,0aA	1,73bA	30,9aA	2,17bA	2,87dA	1,51bA
	80	24,4aA	1,96aA	32,7aA	2,69bA	3,24cA	1,65bA
	120	24,5aA	1,54bA	28,8aA	2,35bA	2,76dA	1,46bA
T2	40	25,0aA	1,37b	24,3bA	1,90cA	2,37eA	1,46bA
	80	23,5aA	1,45bA	29,8aA	2,38bA	2,29eA	1,56bA
	120	20,4aA	1,53bA	29,2aA	2,25bA	2,14eA	1,41bA
T3	40	28,4aA	1,80bA	23,8bA	1,60cA	2,70dA	1,89aA
	80	27,9aA	2,18aA	33,2aA	1,69cA	3,25cA	2,15aA
	120	29,1aA	2,47aA	35,8aA	2,01cA	4,16bA	2,16aA
T4		23,3a	1,44b	15,8c	3,26a	11,1a	1,44b
T5		32,1a	1,65b	15,6c	1,43c	2,68d	1,97a
Teor adequado*		13	0,8	12	3,0	1,5	0,8
CV (%)		13,6	9,1	13,6	12,3	5,0	9,7

As letras minúsculas comparam todos os tratamentos pelo teste Scott-Knott e as letras maiúsculas comparam as mesmas doses pelo teste SNK ($p < 0,05$). *Gênero *Urochloa*, Sousa; Lobato, 2004. T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração.

Tabela B2. Teor foliar de micronutrientes em *Urochloa hybrida* cv. Sabiá em função da aplicação de doses de condicionador de solos a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo.

Tratamentos	Doses	Nutrientes							
		B	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo	Si	Na
	t ha ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----							
T1	40	34,8bA	5,56bA	218,9aB	135,0aA	62,0bA	1,60bA	1477,8bB	2345,6aB
	80	33,1bA	5,83bA	255,6aB	134,3aA	57,4bA	1,69bB	1769,1aA	4682,1aA
	120	29,8bA	6,04bA	252,3aB	121,3aA	42,8cB	2,78aA	1886,1aA	4447,8aB
T2	40	33,4bA	5,76bA	271,3aA	138,2aA	75,7aA	1,77bA	1848,4aA	3694,5aA
	80	33,9bA	4,75bA	286,2aB	130,9aA	64,6bA	3,19aA	1924,2aA	4518,8aA
	120	27,9bA	4,09bA	207,4aB	100,9aA	43,1cB	2,37aAB	1891,0aA	4899,0aA
T3	40	37,6bA	6,31bA	257,6aAB	114,8aA	83,0aA	1,54bA	1312,7bB	334,4cC
	80	49,9aA	6,66aA	343,1aA	137,1aA	85,6aA	1,18bB	1388,2bB	305,9cB
	120	49,3aA	7,54aA	318,2aA	143,3aA	74,0aA	1,58bB	1380,4bB	245,5cC
T4		37,6b	5,14b	210,1a	18,9b	21,8d	2,90a	934,5c	653,1b
T5		15,2c	7,44a	195,5a	117,4a	90,7a	1,66b	1229,8b	503,6b
Teor adequado*	10	4,0	50	40	20	0,5	-	-	-
CV (%)		14,9	12,1	6,9	6,8	15,2	18,5	5,9	4,5

As letras minúsculas comparam todos os tratamentos pelo teste Scott-Knott e as letras maiúsculas comparam as mesmas doses pelo teste SNK ($p < 0,05$). *Gênero *Urochloa*, Sousa; Lobato, 2004. T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração.

Apêndice C - Avaliação visual do capim Sabiá

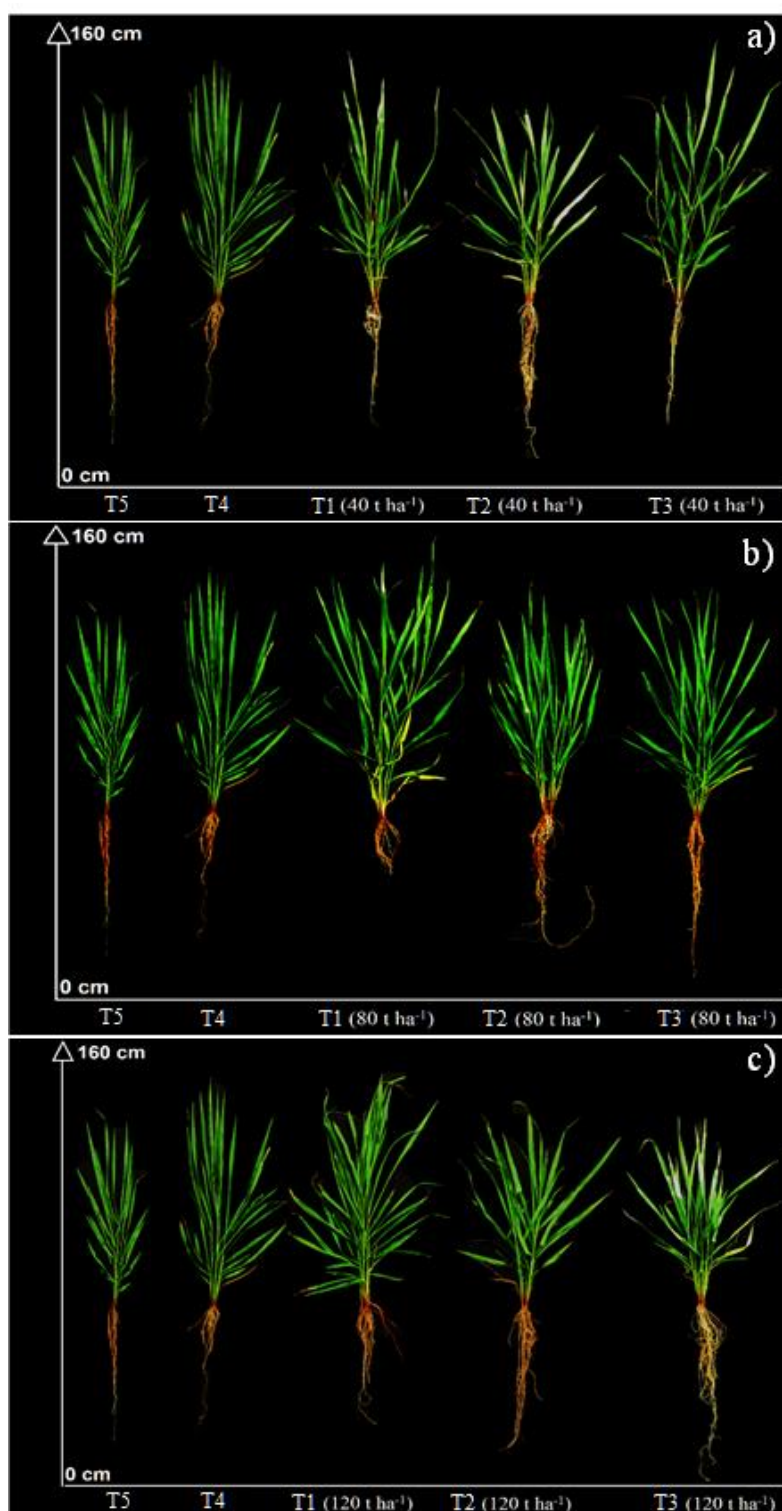


Figura C1. Capim Sabiá cultivado sob aplicação de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. T4 e T5 comparada aos tratamentos T1, T2 e T3 na dose de 40 t ha⁻¹ (a), 80 t ha⁻¹ (b) e 120 t ha⁻¹ (c). T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração.

Apêndice D - Análise de agrupamentos

Para explorar a relação dos tratamentos com os parâmetros avaliados aplicou-se uma análise de agrupamento de Cluster pela distância Euclidiana quadrática pelo vizinho mais próximo. O heatmap foi confeccionado utilizando o programa R versão v.4.2.0 (R core Team, 2019).

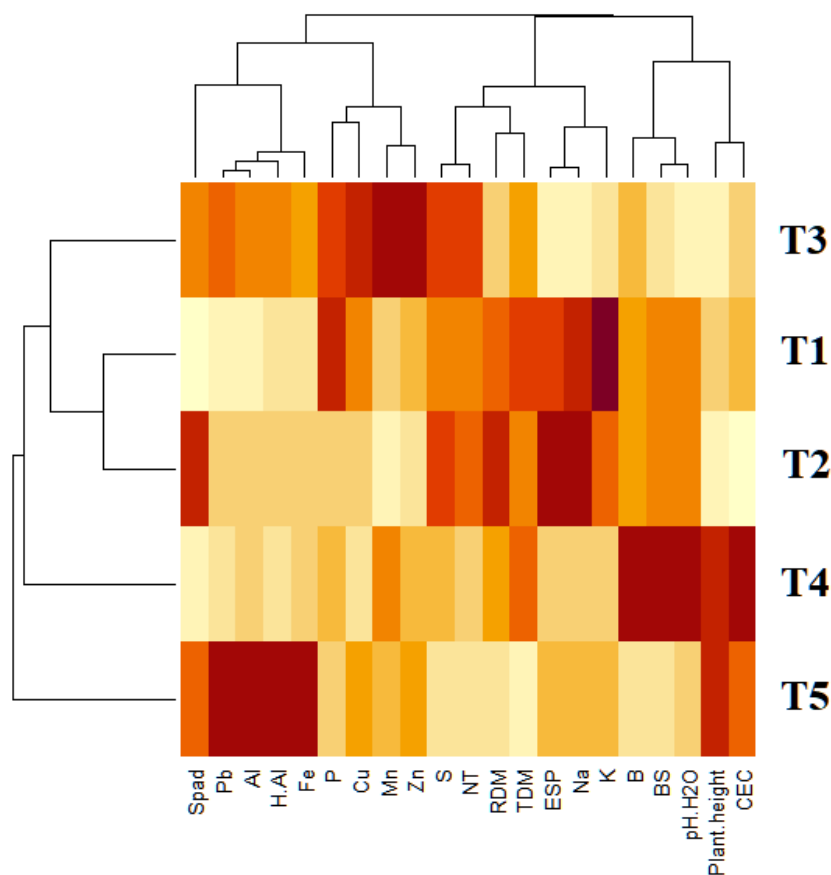


Figura D1. Análise de agrupamentos (Cluster) com os parâmetros biométricos do capim Sabiá e de fertilidade do solo em experimento de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. Plant height: altura de plantas; NT: número de perfilhos; RDM: massa seca da raiz; TDM: massa seca total; ESP: porcentagem de sódio trocável; BS: saturação por bases; CEC: capacidade de troca catiônica. T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração.

Apêndice E – Correlação de Pearson dos parâmetros do solo

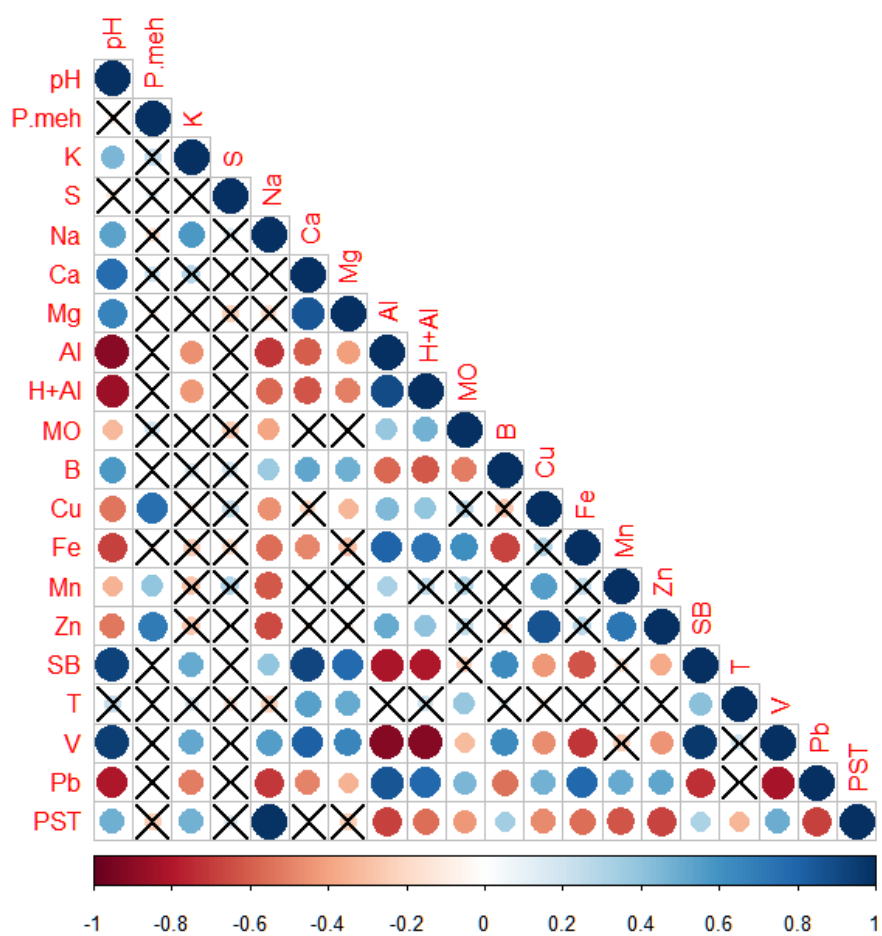


Figura E1. Correlação de Pearson dos parâmetros do solo em experimento de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. X indica ($p > 0,05$).

Apêndice F – Análise de componentes principais dos parâmetros do solo e do capim Sabiá.

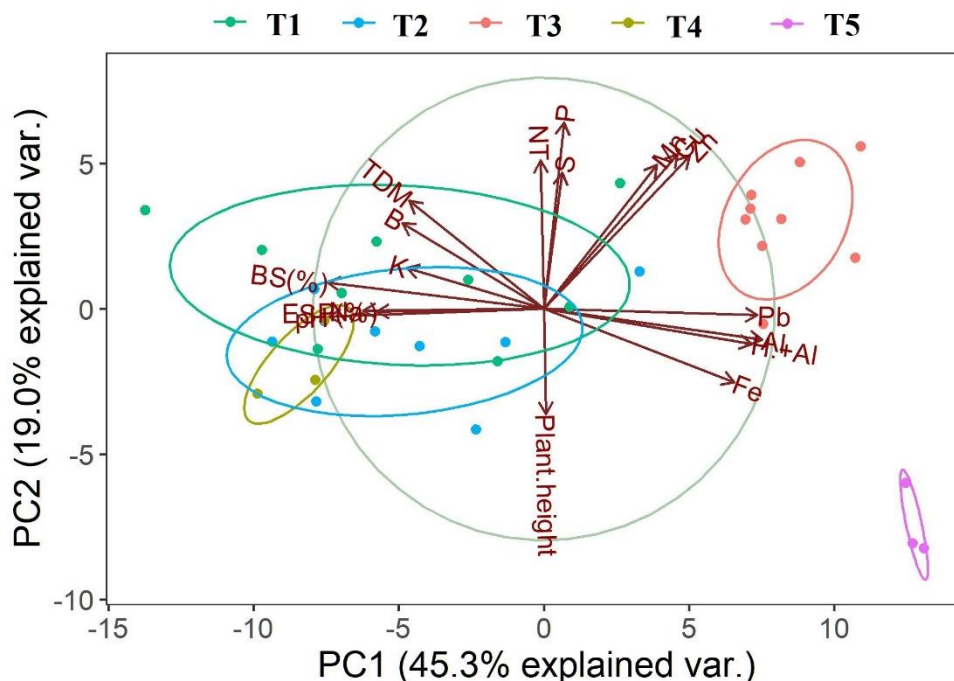


Figura F1. Análise de componentes principais dos parâmetros do solo e do capim Sabiá em experimento de condicionadores de solo a base de resíduos de bauxita e da palma de óleo. T1: 25% RB + 75% POC (resíduos de palma de óleo decomposto); T2: 50% RB + 50% POMW (resíduos de palma de óleo); T3: 100% POMW (resíduos de palma de óleo sem RB); T4: calcário em dose calculada para elevação do pH do solo a 6,0; T5: solo de mata nativa sem alteração. Plant height: altura de plantas; NT: número de perfilhos; TDM: massa seca total; ESP: porcentagem de sódio trocável; BS: saturação por bases.

Referências

NOGUEIRA, A. R. A., MATOS, A. O., CARMO, C. A. F. S., SILVA, D. J., MONTEIRO, F. L., SOUZA, G. B., PITA, G. V. E., CARLOS, G. M., OLIVEIRA, H., COMASTRI FILHO, J. A., MIYAZAWA, M., OLIVEIRA NETO, W. Tecido vegetal. In: NOGUEIRA, A. R. A., SOUZA, G. B. (Eds.). **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. p. 145-199.

R CORE TEAM, 2019. **R: A language and environment for statistical computing**. R Found. Stat. Comput.

SOUSA, D. M. G., LOBATO, E., **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.