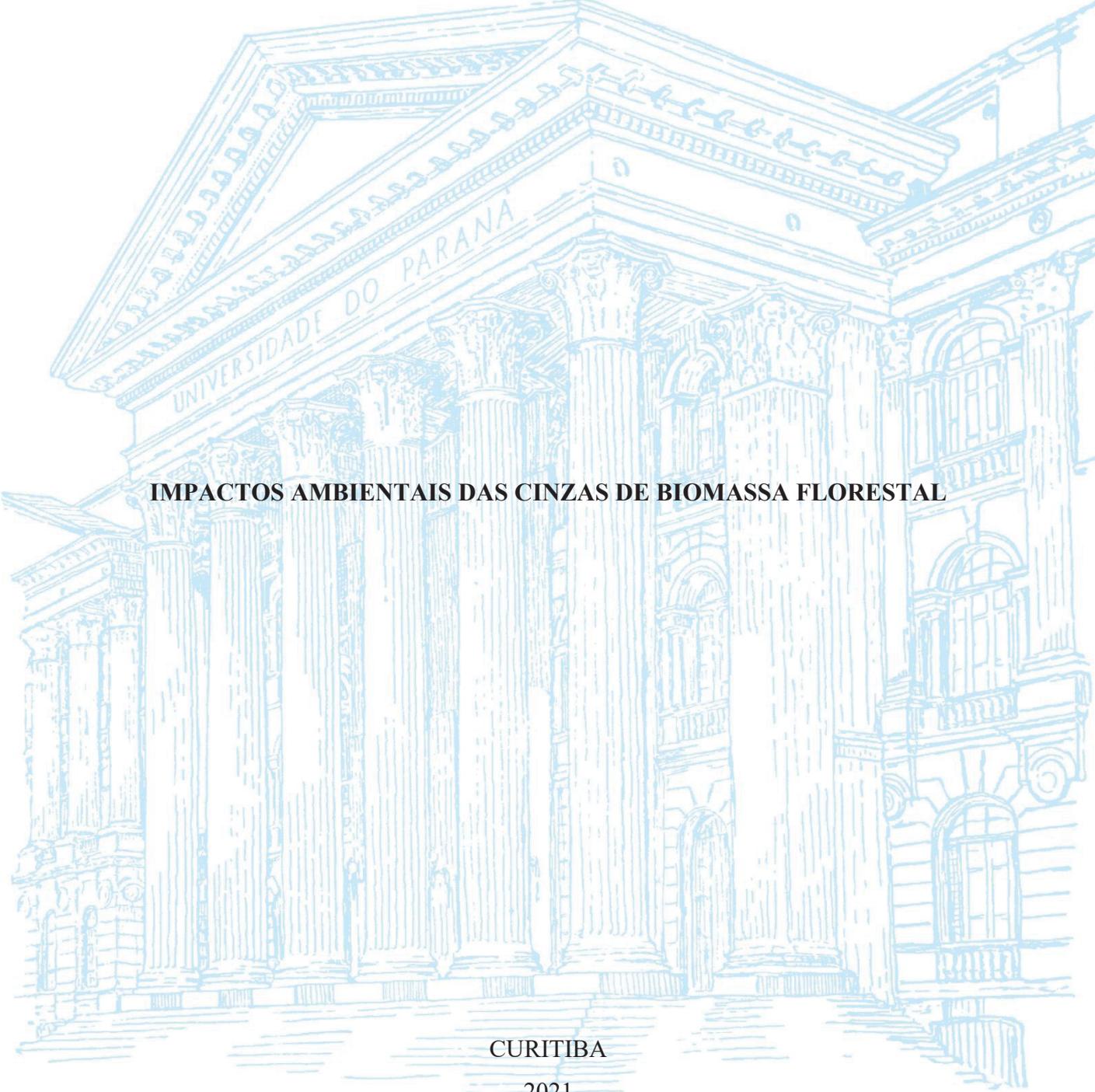


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

RAFAELA PROSDOCINI PARMEGGIANI



IMPACTOS AMBIENTAIS DAS CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL

CURITIBA

2021

RAFAELA PROSDOCINI PARMEGGIANI

IMPACTOS AMBIENTAIS DAS CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentada ao curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Langer

CURITIBA

2021

IMPACTOS AMBIENTAIS DA CINZA DE BIOMASSA FLORESTAL

Rafaela Prosdocini Parmeggiani

RESUMO

O objetivo desta revisão foi identificar quais os principais impactos ambientais relacionados ao uso da cinza de biomassa florestal no Brasil. Os objetivos específicos foram: caracterizar o cenário do qual a cinza de biomassa florestal é gerada no Brasil; conceituar o que é a cinza de biomassa florestal a partir da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); identificar quais impactos ambientais do uso da cinza de biomassa florestal de trabalhos feitos no Brasil; e, identificar quais os impactos ambientais da cinza de biomassa florestal caracterizados pela ACV. O Brasil apresenta um setor bioenergético fortemente influenciado pela indústria de florestas plantadas. Sendo a cinza um material tão heterogêneo, é imprescindível que seja estabelecida uma regulamentação específica para potencializar seu adequado uso na silvicultura brasileira. Existe uma lacuna no conhecimento científico sobre a interação dos metais pesados e outros minerais adicionados com as cinzas de biomassa florestal e os componentes do solo no Brasil. São necessários estudos que analisem a solubilidade, biodisponibilidade, mobilidade e processos de lixiviação de metais pesados e de elementos importantes como o P e N, presentes nas cinzas em solos brasileiros. Seria necessário que fossem determinados modelos ambientais, bem como os fatores de caracterização para norteamento da gestão das cinzas de biomassa florestal, uma vez a técnica da ACV aponta para possíveis impactos ambientais em categorias importantes e sensíveis à saúde humana como a eutrofização da água doce, a toxicidade humana carcinogênica, a toxicidade humana não carcinogênica e a ecotoxicidade da água doce.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Bioenergia. Resíduos florestais.

ABSTRACT

The objective of this review was to identify the main environmental impacts related to the use of forest biomass ash in Brazil. The goals of this review were to characterize the forest biomass scenario which generated the ash in Brazil; The goals of this review were to characterize the forest biomass scenario which generated the ash in Brazil, to conceptualize forest biomass ash on Life Cycle Assessment (LCA) technique; to identify environmental impacts of forest biomass ash use in Brazil's literature; and, to identify the forest biomass ash environmental impacts defined by the LCA. Brazil presents a bioenergy sector strongly influenced by the planted forest industry. Since ash is such a heterogeneous material, specific regulations must be established to enhance its appropriate use in Brazilian forestry. There is a gap in scientific knowledge about the interaction of heavy metals and other minerals added to forest biomass ash and soil components in Brazil. Studies are needed that analyze the solubility, bioavailability, mobility, and leaching processes of heavy metals and important elements such as P and N, present in ashes in Brazilian soils. It would be necessary that environmental models

were determined, as well as the characterization factors for guiding the management of forest biomass ash, once the LCA technique points to possible environmental impacts in important and sensitive categories to human health such as freshwater eutrophication, human carcinogenic toxicity, human non-carcinogenic toxicity, and freshwater ecotoxicity.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA). Bioenergy. Forest residues.

1 INTRODUÇÃO

A biomassa é uma fonte de energia renovável que pode ser utilizada na produção de energia térmica, elétrica ou biocombustíveis por distintos processos de conversão de energia (VERGARA et al., 2021).

A biomassa florestal pode ser definida como a madeira, casca, ramos e folhas de arbustos ou árvores, vivos ou mortos, acima ou abaixo do solo (GUERRA; EUFRADE-JUNIOR, 2019; HAKKILA, 1989), não fossilizados (ABNT, 2021), raízes, frutas, extratos, liteira, resíduos sólidos das indústrias de base florestal e licor negro das indústrias de papel e celulose (VERGARA et al., 2021).

Quando a biomassa florestal passa pelo processo de combustão são geradas as cinzas, uma substância alcalina composta pelos nutrientes da planta (HAKKILA; PARIKKA, 2002).

Maiores volumes de cinzas são gerados, a medida que a demanda pela produção de bioenergia aumenta, trazendo desafios relacionados ao armazenamento, destinação, uso, manejo, transporte e custos de aplicação (JAMES et al., 2012; MODOLO et al., 2014).

Como os nutrientes assimilados pelas árvores são exportados com a colheita florestal, é importante considerar estratégias para manutenção da produtividade e nutrição do solo, uma vez que o Brasil trabalha com curta rotação (BELLOTE; DEDECEK; SILVA, 2008). Considerando o valor agregado, devido a sua composição química (GIMENES, 2012), tornou-se uma prática comum dispor as cinzas em terrenos florestais ou agrícolas, incorporando-as ao solo como fertilizante ou corretivo (HENNE et al., 2020).

A aplicação de cinzas de biomassa em solos de plantios florestais pode ser encarada, portanto, como uma opção para a substituição ou complemento da adubação

mineral, desde que consideradas adequadamente a classe do solo e as necessidades da espécie plantada (SILVA et al., 2013).

Outro ponto importante, é que as cinzas de biomassa florestal possuem alguns elementos químicos que podem causar problemas ambientais, como metais pesados, embora as concentrações normalmente sejam baixas (RISSE; GASKIN, 2016), a possível poluição do uso das cinzas de biomassa florestal no ambiente deve ser determinada para que seja possível fazer o uso adequado (CLAPHAM; ZIBILSKÉ, 1992).

Alguns autores têm relatado o impacto da aplicação das cinzas de biomassa florestal tanto nas propriedades biológicas (BANG-ANDREASEN et al., 2021; ETHELBERG-FINDSEN; RØNN; EKELUND, 2021), como nas propriedades químicas (DEIGHTON et al., 2021) dos solos, ou em ambos os aspectos (GÖMÖRYOVÁ et al., 2016).

O objetivo dessa revisão foi identificar quais os principais impactos ambientais relacionados ao uso das cinzas de biomassa florestal no Brasil que tem sido considerados nas pesquisas. Para tanto, foi realizada uma revisão de literatura, pautada em pesquisa bibliográfica, na qual foi possível fazer a análise de conteúdos relacionados ao tema cinzas de biomassa florestal e impactos ambientais.

Segundo art. 1º da Resolução CONAMA 001/86, impacto ambiental pode ser definido como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais (BRASIL, 1986).

Os objetivos específicos foram de caracterizar o cenário do qual a cinza de biomassa florestal é gerada no Brasil; conceituar o que são as cinzas de biomassa florestal a partir da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e identificar quais os possíveis impactos ambientais caracterizados pela ACV; identificar quais impactos ambientais do uso da cinza de biomassa florestal de trabalhos realizados no Brasil.

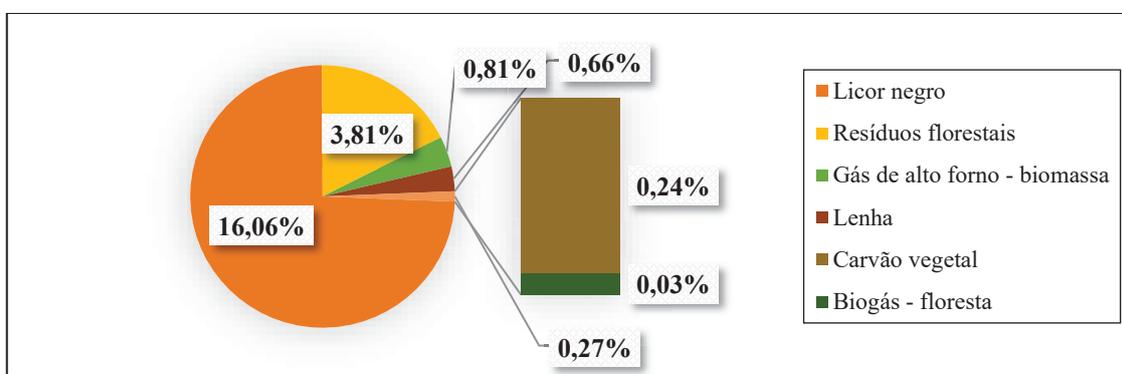
2 CENÁRIO DE GERAÇÃO DAS CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL

a) Biomassa florestal e bioenergia

Segundo definição da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), a biomassa destinada ao aproveitamento energético é uma fonte renovável, primária, não fóssil e química de energia.

Considerando a matriz elétrica nacional, a biomassa representa uma fatia de 8,75% do seu total outorgado, sendo que, desse montante, 76,92% são biomassas agroindustriais, cana-de-açúcar em quase sua totalidade, 21,61% são biomassas florestais (FIGURA 1), 1,39% são resíduos sólidos urbanos e 0,03% corresponde às frações tanto de resíduos animais quanto de biocombustíveis líquidos (ANEEL, 2021).

FIGURA 1 – PORCENTAGEM DA POTÊNCIA OUTORGADA DE BIOMASSAS FLORESTAIS UTILIZADAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL



FONTE: Adaptado de ANEEL (2021).

As florestas plantadas são importantes fontes de biomassa para a geração de energia no Brasil, devido a sua alta produtividade (VERGARA et al., 2021), tendo o setor de papel e celulose gerado 23.566 GWh em eletricidade no ano de 2020 (EPE, 2021). O licor negro é a biomassa florestal mais representativa no uso energético, 16,06%, que equivale a potência outorgada de 2.538.631,0 KW e possui uma quantidade de 18 usinas em atividade no território brasileiro (ANEEL, 2021).

Os resíduos florestais representam 3,81% da potência fiscalizada para energia, equivalente a 603.010,0 KW, com uma quantidade de 63 usinas em atividade (ANEEL, 2021). O uso de resíduos florestais pode colaborar com valores entre 20% e 30% da produção de energia, quando adequadamente manejado e planejado, considerando que não haja repetição de colheitas de resíduos para que a produtividade não seja reduzida (VERGARA et al., 2021).

Os resíduos florestais podem ter características diferentes das madeiras considerando as espécies plantadas, podendo existir variações também entre os próprios

resíduos, haja vista, eles vêm de diferentes compartimentos das árvores como cascas, galhos, copas e folhas (VERGARA et al., 2021).

O setor florestal brasileiro conta com 90% de fontes renováveis em sua matriz energética, sendo que das biomassas florestais geradas pela própria indústria, 66,6% são encaminhados para a geração de energia, valores que correspondem 69% ao licor negro e 20% às cascas, galhos, folhas, cavacos e serragem de árvores (IBÁ, 2020), resíduos da produção e indústria florestal.

No contexto da mitigação de mudanças climáticas e da economia circular, a utilização da biomassa florestal como biocombustível resulta em mais carbono sendo capturado (mais reflorestamento acontecendo), que teria caso se permanecesse apenas com as atividades pré-existentes do setor florestal, sendo isso caracterizado como um *driver* econômico importante, principalmente quando os resíduos florestais aproveitados para bioenergia são produzidos pela própria indústria geradora, ou seja, há uma conexão entre produtores florestais e geradores de energia (MILLWARD-HOPKINS; PURNELL, 2019).

O incentivo aos biocombustíveis é relevante no cenário de mudanças climáticas, pois pode aumentar os projetos de reflorestamento envolvidos ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), sendo que as usinas termelétricas movidas à biomassa florestal têm potencial de redução da emissão de gases de efeito estufa (RIBEIRO, 2018).

b) Geração das cinzas

Alguns fatores como o teor de umidade e o total de matéria inorgânica afetam a qualidade e as variações encontradas nos parâmetros qualitativos e quantitativos da biomassa, como por exemplo, o poder calorífico e a composição química. Fatores esses, que culminarão na qualidade da cinza gerada e no seu potencial de valorização (SILVA, 2016).

As cinzas geradas no processo de combustão são divididas em duas categorias: as cinzas volantes, que como são mais finas e sobem com a fumaça ficam retidas em sistemas de precipitação e as cinzas de fundo, que são mais espessas, depositando-se no fundo da caldeira (BONFIM-SILVA, 2020). As cinzas volantes costumam possuir teor mais elevado de metais (DEIGHTON et al., 2021; SILVA, 2016).

A cinza de fundo, também, chamada de cinza pesada ou escória, tem forma de pó, contudo, pode “empedrar” formando incrustações, quando não é dada a manutenção adequada à caldeira. As incrustações não devem ser dispostas no solo, apenas as escórias,

pois sua forma e estrutura podem atrapalhar a percolação de nutrientes e o plantio (GIMENES, 2012).

A falta de padronização na queima da biomassa é uma das causas da alta heterogeneidade encontrada nas cinzas, dificultando sua utilização pela indústria (CACURO; WALDMAN, 2015). As condições de operação da caldeira têm importante influência nas alterações da temperatura de fusão e agravamento dos problemas relacionados aos índices de deposição das cinzas (BRAND et al., 2021).

Fatores como o elevado teor de óxido de sódio (Na_2O) também contribuem para a formação de escória, incrustações e formação de álcali na caldeira (BRAND et al., 2021).

O cloro (Cl) presente nas folhas e cascas pode aumentar a corrosão em superfícies de transferência de calor de equipamentos de combustão, contudo, quando a biomassa é deixada no solo (32 dias) o seu teor decai, tornando-se fator positivo, no caso do material ser empregado para a geração de energia (VERGARA et al., 2021).

O nitrogênio (N) contido na biomassa florestal é volatilizado (REID; WATMOUGH, 2014) e oxidado no processo de combustão gerando emissões atmosféricas, que a longo prazo podem gerar acidificação do solo, água e ser nocivo à saúde (HAKKILA; PARIKKA, 2002).

Siegl, Laaber e Holubar (2011), destacam que entre 65% e 76% do potencial de acidificação gerado pelo impacto da combustão de biomassa florestal para energia é causado pelas emissões de NO_x , sendo a limpeza dos gases de combustão recomendada para a redução do potencial de acidificação e do potencial de eutrofização em 47-60% e do potencial de toxicidade humana em 2,1%.

c) Cinza de biomassa florestal e ACV

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é o compêndio e avaliação de entradas, saídas e potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um determinado produto. Ela é constituída de quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação (ABNT 2009a, b).

A terceira fase, ou seja, a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem por objetivo interpretar o inventário de possíveis impactos ambientais, contudo, não existem metodologias que englobem, de maneira precisa, dados de inventário de potencial impacto aos potenciais específicos (ABNT 2009a).

Os sistemas de produção de bioenergia à biomassa são considerados de múltipla função: seu substrato principal é resíduo de outro sistema de produção ¹ e concomitantemente ao produto principal que é a eletricidade, são gerados coprodutos adicionais (SIEGL; LAABER; HOLUBAR, 2012).

Em outras palavras, o coproduto pode ser definido como “qualquer um entre duas ou mais funções realizadas pelo mesmo processo ou sistema de unidade” (IBICT, 2014, pg. 48).

Considerando a visão da economia circular e da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), os coprodutos possuem funções cujos benefícios podem ser quantificados, como por exemplo, o calor e as cinzas, nesse sentido, as cinzas são classificadas como coprodutos do sistema bioenergético (FANTOZZI; BURATTI, 2010; SIEGL; LAABER; HOLUBAR, 2011, 2012).

3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL

De maneira geral, a composição química das cinzas (TABELA 1) depende da natureza do produto que a originou e dos processos de combustão e de armazenamento utilizados (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; PITMAN, 2006; SILVA, 2016).

As propriedades físico-químicas das cinzas podem variar significativamente de acordo com fatores como: espécie utilizada (conífera ou folhosa), a região da árvore queimada, como madeira, galhos, ramos, folhas (RISSE; GASKIN, 2016) ou tocos (LEONELLO et al., 2019), fatores geográficos e características intrínsecas ao próprio processamento industrial (RISSE; GASKIN, 2016).

O cálcio (Ca) é o principal elemento encontrado nas cinzas de biomassa florestal, bem como metais alcalinos como sódio (Na) e potássio (K), alcalino terrosos como o magnésio (Mg) e Ca, silício (Si), enxofre (S) e cloro (Cl), que é o elemento menos desejável nas cinzas pois pode causar corrosão dos equipamentos e contribuir com a maior formação de incrustações e escórias (VERGARA et al., 2021).

Como a cinza possui origem em diferentes compartimentos da árvore, o teor de nutrientes é de certa maneira balanceado, com exceção do nitrogênio (N) e do S, que são volatilizados durante a queima da biomassa (KARLTUN et al., 2008).

¹ Biomassa florestal da indústria de papel e celulose, p.ex.

A ordem geralmente reportada na concentração dos macroelementos na cinza é $Ca > K > Mg > P$ (ROMDHANE et al., 2021).

Brand et al. (2021), buscando determinar os problemas relacionados à geração das cinzas em caldeiras, avaliaram sua composição química elementar e como resultados obtiveram que os respectivos óxidos de Si, alumínio (Al), ferro (Fe), Ca, K e Mg, foram os compostos que apresentaram maior concentração nas cinzas de biomassa florestal.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL APRESENTADAS POR DIFERENTES AUTORES (g.Kg⁻¹)

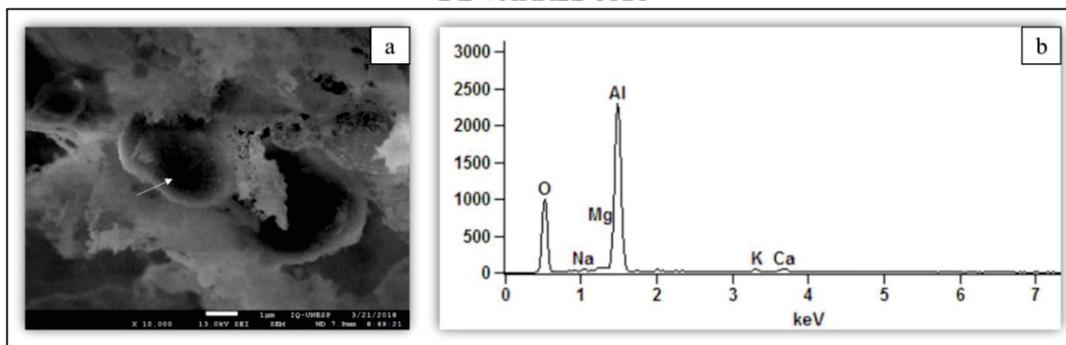
Elementos	Hanisch e Fonseca (2014)	Filho (2018)	Vargas (2018)	Naibo et al. (2018)
N	0,40	1,80	3,40	3,93
P	3,89	2,90	5,11	1,53
K	24,06	12,80	9,79	14,51
Ca	29,29	30,40	31,80	6,40
Mg	13,80	29,50	6,50	2,50
S	*	0,40	1,80	3,50
Al	*	48,70	*	*
Cu	0,04	0,06	0,11	0,09
Fe	*	13,00	70,48	50,66
Mn	*	2,27	3,00	2,90
Zn	0,25	0,03	3,95	3,36
Na	1,10	1,05	1,45	1,36
B	*	*	0,08	0,07
Ba	*	0,20	*	*
Ga	*	0,10	*	*
Sr	*	0,10	*	*
Co	*	0,05	*	*

NOTA: (*) não disponíveis.

FONTE: literatura citada.

O oxigênio é um dos elementos mais abundantes em cinzas de biomassa florestal, apresentando valores entre 35% e 45%, característica tida como indicadora da formação dos óxidos (LEONELLO et al., 2019). As cenosferas (FIGURA 2) são partículas formadas durante a combustão, constituída de óxidos metálicos (CACURO; WALDMAN, 2015), e como comentam Brand et al. (2021) a presença de elevados teores de Al, Fe e Si podem indicar a contaminação da biomassa florestal com terra, pedras e outras impurezas que afetam a composição química elementar das cinzas de biomassa florestal (BRAND et al., 2021) e são comuns aparecerem como.

FIGURA 2 - CINZAS DE TOCOS E RAÍZES DE EUCALIPTO EM MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA



FONTE: Leonello et al. (2019).

LEGENDA: (a): cenosfera (seta), óxido de alumínio, fotografada por microscopia eletrônica de alta resolução com feixe de elétrons secundários; (b) analisada e apresentada quimicamente no gráfico de EDS, indicando a presença de oxigênio e alumínio.

O maior desafio para utilização das cinzas em grande escala, segundo Cacuro e Waldman (2015), é sua heterogeneidade devido à falta de padronização na combustão, característica que impede que a indústria absorva a cinza como matéria-prima em diversos processos potenciais.

4 IMPACTOS AMBIENTAIS DAS CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL

a) Solubilidade, biodisponibilidade e mobilidade

Um possível cenário de valorização das cinzas é altamente dependente da biodisponibilidade de seus nutrientes (COSTA et al., 2020), sendo sua caracterização muito importante, porque fatores como a solubilidade e a biodisponibilidade também variam com a biomassa utilizada (ROMDHANE et al., 2021).

A aplicação de cinza de biomassa pode aumentar em 18%, 13% e 3% a biodisponibilidade de, respectivamente, K, Mg e cádmio (Cd), sendo a última considerada insignificante em função da baixa concentração apresentada (ROMDHANE et al., 2021).

Uma parte do P pode ser perdida na água devido à lixiviação de fosfato (PO_4) solúvel, escoamento superficial e erosão de partículas do solo que contém P (NEMECEK; SCHNETZER, 2011), sendo a emissão de P a causa da eutrofização de ambientes aquáticos e impactos resultados ao ambiente (UGAYA; NETO; FIGUEIREDO, 2019).

A capacidade de elevar o pH do solo que a cinza possui deve-se, em parte, aos óxidos de Ca e Mg presentes em sua composição, a medida que esses óxidos reagem com a água do solo são solubilizados (DALCHIAVON; LEMES; DONEGÁ, 2018).

Segundo Adams (1984), a aplicação apenas da cinza talvez não seja adequada para manter o pH do solo, sendo necessário fazer uma calagem suplementar para manutenção ao longo do tempo.

Experimentos com calagem mostram o efeito aumentado na taxa de degradação da matéria orgânica do solo, contudo, seria necessário mais estudos para entender o efeito da cinza de biomassa florestal na mineralização do C, uma vez que o aumento ou diminuição da taxa de mineralização de C e N é um indicador dos possíveis efeitos da degradação da matéria orgânica do solo (KARLTUN et al., 2008).

De maneira geral, a cinza possui liberação lenta de nutrientes para as plantas no solo (VOGEL et al., 2002). Silva et al. (2009), alertam ser importante considerar o tempo de mineralização da cinza no solo de acordo com a quantidade de elementos contidos nela, pois é possível que se desencadeie uma lenta disponibilização de nutrientes para solo e planta.

As cinzas soltas (não estabilizadas) são altamente reativas e alcalinas (OLSSON et al., 2017). Uma alta alcalinidade da cinza pode indicar grande taxa de complexação com cátions, principalmente de Ca e afetar a biodisponibilidade dos elementos (ROMDHANE et al., 2021).

No caso do N, como a cinza de biomassa florestal possui um valor virtual desse elemento, sua aplicação como fertilizante, depende criticamente do impacto que pode ser gerado na disponibilidade de nitrogênio inorgânico, principalmente, em solos com limitação de N (VESTERGARD et al., 2018).

A cinza de biomassa florestal possui capacidade intermediária de adsorção de íons NH_4^+ , com potencial para reduzir as perdas do nutriente, além de ser recomendada para solos ácidos e altamente intemperizados devido as propriedades de neutralização da acidez (HAMIDI et al., 2021).

A nitrificação autotrófica é bastante sensível ao pH, bem como a relação $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ é muito importante para o crescimento e produtividade de eucaliptos (SILVA, 2016). A amônia (NH_3) pode contribuir para a acidificação e eutrofização de alguns sistemas, com impactos locais (NEMECEK; SCHNETZER, 2011).

O nitrato (NO_3^-) possui alta solubilidade e pode ser lixiviado, principalmente nas estações chuvosas (NEMECEK; SCHNETZER, 2011). Deighton et al. (2021), realizaram uma simulação de seca e aplicaram cinza de biomassa florestal, como resultado obtiveram a diminuição do pH e das concentrações de C orgânico dissolvido, aumento de SO_4 e NO_3^- , tanto no controle quanto nos tratamentos com cinzas mostrando ser um padrão do solo.

b) Metais pesados

Os metais pesados ocorrem naturalmente na crosta terrestre em teores reduzidos, na ordem de mg.Kg^{-1} , sendo por isso chamados de elementos-traço, contudo, as ações antropogênicas são as principais causadoras dos danos ambientais relativos a esses elementos (TAVARES, 2013).

A cinza de biomassa florestal tem sido utilizada como fonte nutricional para solos e plantas, contudo, é importante ressaltar, quem em sua composição há metais pesados (ALVES et al., 2016), e os teores de Cr, Cd, mercúrio (Hg), Ni, Zn, cobre (Cu), p.ex., tem aumentado nos solos florestais, embora seja comum que não ultrapassem os valores críticos (ALVES et al., 2016; HANISCH; FONSECA, 2014; OZOLINCIUS et al., 2006).

Os metais pesados analisados em cinzas de biomassa florestal em trabalhos no Brasil mostraram uma maior concentração de Cr, chumbo (Pb) e níquel (Ni) (TABELA 2, 3).

Os fenômenos da adsorção/dessorção e da precipitação/dissolução influenciam o acúmulo de metais no solo em função da reversibilidade de suas reações, estas, por sua vez, determinam o teor do elemento disponível no solo e, posteriormente, aos sistemas biológicos (TAVARES, 2013).

TABELA 2 – METAIS PESADOS NAS CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL (g.Kg^{-1})

Elementos	Hanisch e Fonseca (2014)	Maeda, Silva e Cardoso (2008)	Moretti Neto (2020)	Sbruzzi (2017)	Silva (2013)
Cd	*	*	2,50	12,00	0,30
Cr	46,00	35,00	2,55	*	40,00
Pb	16,00	*	25,00	*	4,00
As	*	6,40	0,99	*	*
Hg	*	*	0,06	*	*

FONTE: dados da literatura.

Fatores como o pH, o potencial redox e a complexação (com ligantes orgânicos ou inorgânicos) são os mais relevantes no que diz respeito a reatividade dos metais, ou seja, afetam diretamente sua solubilidade, biodisponibilidade e mobilidade (TAVARES, 2013).

A concentração de metais pesados nos fertilizantes agrícolas costumam ser maiores que os das cinzas (PITMAN, 2006). Uma vez que os metais pesados contidos nas cinzas de biomassa florestal possuem valores baixos de mobilidade e biodisponibilidade, sua taxa de acumulação estará fortemente relacionada a intensidade de aplicação no ciclo produtivo florestal, sendo a ‘intensidade’ equivalente à

‘concentração de metais pesados’, multiplicadas pela ‘dose de cinza’ e pela ‘frequência de aplicação’ (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008).

Uma aplicação contínua de cinzas de biomassa florestal no solo pode resultar no acúmulo de alguns metais que permanecem indisponíveis em alto pH, mas que se tornam solúveis em pH mais baixos, sendo, neste caso, necessária a manutenção do pH para evitar tanto a absorção por parte das plantas, quanto a lixiviação desses metais no solo (CLAPHAM; ZIBILSKÉ, 1992).

Hanisch e Fonseca (2014), avaliaram as características químicas e o poder contaminante das cinzas de biomassa florestal aplicadas a um latossolo num período de dois anos (TABELA 3). Como resultados verificaram que após 20 meses houve aumento significativo para cromo (Cr) (43,67 mg/dm³) e Ni (17,33 mg/dm³) e redução do Pb.

TABELA 3 – TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO AOS 12 E 20 MESES APÓS A APLICAÇÃO DE CINZA DE BIOMASS FLORESTAL (mg/Kg⁻¹)

Dose de cinza (t/ha)	Hg	Pb	Ni	Cd	Cr	Mo
12 meses após a aplicação						
0	0,07	20	14	< 0,20	38	0,93
2,5	0,08	19,33	13,33	< 0,20	39,33	1,33
5	0,09	20	14,67	< 0,20	42	1,33
7,5	0,08	19,67	12,33	< 0,20	37,67	0,93
10	0,08	20,33	13,33	< 0,20	39	0,4
20 meses após a aplicação						
0	0,12	27,67	11,33	< 0,20	35	0,4
2,5	0,14	31,33	11,33	< 0,20	35	0,4
5	0,12	32	11,67	< 0,20	37	0,4
7,5	0,1	22	16,33	< 0,20	42,33	0,4
10	0,1	13,67	17,33	< 0,20	43,67	0,4

FONTE: Hanisch e Fonseca (2014).

Alves et al. (2016), avaliaram os teores de metais pesados em nitossolo após a aplicação da cinza de biomassa florestal, como resultados obtiveram que na aplicação das respectivas doses de cinza de biomassa florestal 18,91; 25,37; 17,78; 15,33 mg.ha⁻¹, os teores de cobalto (Co), chumbo (Pb), cromo (Cr), e níquel (Ni) apresentaram os seguintes valores em mg.Kg⁻¹, 27,3, 22,3, 59,9 e 56,0, respectivamente. Os dados ficaram abaixo do limite definido por CONAMA (2009). Contudo, o valor de Co ultrapassa os limites preventivos (TABELA 4).

Em Alves et al. (2017) os valores de Ni ultrapassam o limite máximo, apresentando valores de 71,94 mg.Kg⁻¹, contudo, não foi apresentada diferença significativa entre os teores de elementos traços nos solos com e sem a aplicação de cinza.

Elementos como o As e Cr contidos nas cinzas de biomassa florestal poderiam inviabilizar sua aplicação, pois possuem alta toxicidade ao homem, bem como ao solo e aos recursos hídricos (MAEDA; SILVA; CARDOSO, 2008). Segundo os mesmos autores, o valor estimado de As no solo com a aplicação de 80 t.ha⁻¹ de cinza, poderia corresponder a 0,24 mg.Kg⁻¹.

TABELA 4 – VALORES ORIENTADORES PARA SUBSTÂNCIAS NOS SOLOS (mg.Kg⁻¹)

Elementos	Agrícola APMáx	Prevenção
As	35,0	15,0
Cd	3,0	1,3
Cr	150,0	75,0
Co	35,0	25,0
Cu	200,0	60,0
Hg	12,0	0,5
Pb	180,0	72,0
Mo	50,0	30,0
Ni	70,0	30,0

FONTE: CONAMA (2009).

Os valores preventivos são definidos pela RESOLUÇÃO N° 420/2009 como a concentração limite de determinado elemento no solo, de maneira que ele seja capaz de sustentar suas funções principais e não causar alterações ao solo e águas subterrâneas CONAMA (2009). Segundo o Art. 3° da mesma resolução, o solo deve ser protegido de maneira preventiva, garantindo a manutenção de suas funções ou, de maneira corretiva, restaurando sua qualidade ou recuperando-a de forma compatível com os usos previstos.

A presença dos metais pesados nas cinzas não indicam, portanto, um aumento direto dos riscos ambientais, uma vez que a lixiviação desses elementos contaminantes dependem de sua biodisponibilidade no solo (COSTA et al., 2020), como mostrado por Deighton et al. (2021), em tratamentos que receberam cinzas volantes, após 4 anos da aplicação apresentaram altas concentrações de alguns metais como A, Cd, zinco (Zn) e Sr, na camada 0 – 30 cm do solo, como o pH também tendeu a aumentar, os metais tiveram sua mobilidade e biodisponibilidade limitados.

O cenário oposto também é verdadeiro, quando o pH abaixa, os elementos traço da cinza de biomassa florestal podem ganhar mobilidade e biodisponibilidade (DEMEYER; VOUNDI NKANA; VERLOO, 2001).

Contudo, deveriam minimamente ser levados em consideração a concentração de metais pesados e a frequência de aplicação (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008)

para se estabelecer padrões adequados na utilização da cinza de biomassa florestal e não se desencadeie uma contaminação de solo, biota e recursos hídricos.

Silva (2016) concluiu de seu experimento de 2 anos e aplicação de cinzas na dosagem de até 7,5 ton/ha que não houve perigo de fitotoxicidade por bioacumulação de metais pesados em plantio de eucalipto em Portugal.

Segundo Olsson et al. (2017), as doses de cinzas utilizadas não devem exceder os teores de nutrientes exportados na colheita da biomassa florestal para que não haja aumento da carga de metais pesados localmente.

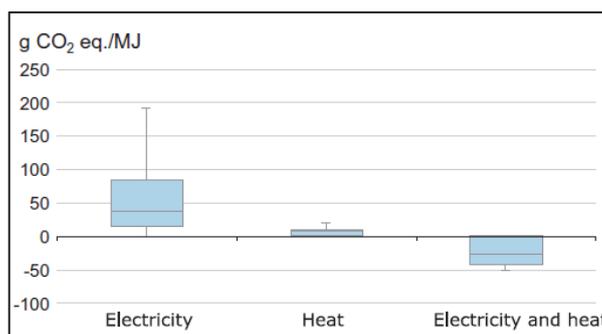
5 CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL E ACV

a) No processo de geração das cinzas

Muench e Guenther (2013), realizaram uma revisão sistemática sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em sistemas bioenergéticos e obtiveram os seguintes resultados quanto às emissões nas respectivas categorias de impacto:

- i. Potencial de aquecimento global (FIGURA 2): 116 cenários avaliados, geração elétrica apresentou uma média de 38.19 g CO₂ eq./MJ; geração de calor, média de 8.20 g CO₂ eq./MJ e a combinação de ambos gerou uma média de 25.18g CO₂ eq./MJ.

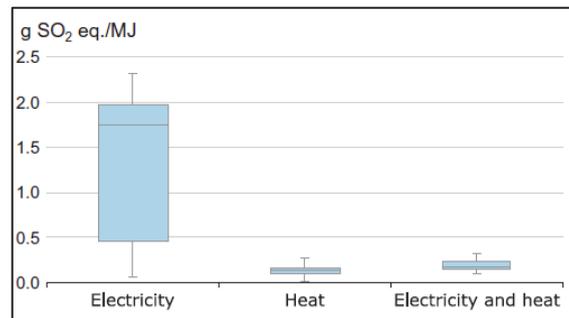
FIGURA 2 - POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL



FONTE: Muench e Guenther (2013).

- ii. Acidificação potencial (FIGURA 3): 60 cenários avaliados, geração elétrica apresentou uma média de 1,74 g SO₂ eq./MJ; geração de calor, média de 0,13 g SO₂ eq./MJ e a combinação de ambos gerou uma média de 0,18g SO₂ eq./MJ.

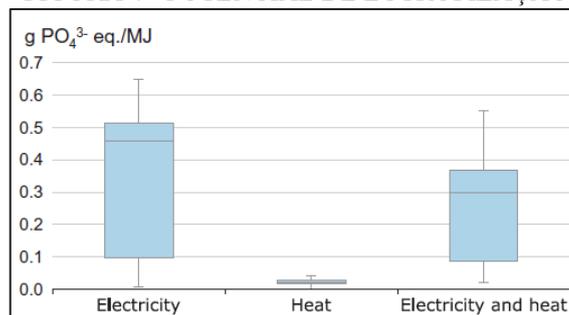
FIGURA 3 - POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO



FONTE: Muench e Guenther (2013).

- iii. Eutrofização potencial (FIGURA 4): 59 cenários avaliados, geração elétrica apresentou uma média de 0,46 g PO₄³⁻ eq./MJ; geração de calor, média de 0,02 g PO₄³⁻ eq./MJ e a combinação de ambos gerou uma média de 0,3 g PO₄³⁻ eq./MJ.

FIGURA 4 - POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO



FONTE: Muench e Guenther (2013).

Os autores concluíram que nas categorias de impacto mudanças climáticas, acidificação e eutrofização, as emissões diretas das plantas energéticas que cujo processo utilizado são a combustão e a gaseificação são menores do que da digestão anaeróbica, devido as diferenças na natureza dos coprodutos, respectivamente, o digestato e as cinzas (MUENCH; GUENTHER, 2013).

Também sugeriram que futuras ACVs sobre bioenergia deveriam incluir:

- i. Maior rigor na inclusão do efeito das mudanças de C no solo com o tempo em relação às emissões de gases de efeito estufa (GEE);
- ii. Uma harmonização mais rigorosa nas avaliações ambientais dos processos bioenergéticos sendo possível compará-los;

- iii. A aderência à estrutura ISO ser garantida e a informação sobre as escolhas tomadas, questões necessárias para tornar as ACVs de bioenergia mais transparentes.

b) Na substituição de fertilizantes e corretivos

Quando uma quantidade de coproduto calor é gerado e usado de maneira a evitar (substituir) a produção de calor por sistemas convencionais, é gerado um ‘crédito’, ou seja, a carga ambiental da produção convencional de calor evitada é subtraída das emissões do sistema bioenergético (SIEGL; LAABER; HOLUBAR, 2012).

Costa et al. (2020), considerando um cenário de valorização das cinzas como fertilizante e corretivo, avaliaram os impactos da substituição de calcário, cal viva, cal hidratada, cloreto de potássio, sulfato de potássio, nitrato de potássio, superfosfato simples e superfosfato triplo por cinzas de biomassa florestal, incluindo a produção dos materiais e as atividades relacionadas à extração, transporte e energia necessária para fabricar esses produtos.

Os resultados mostraram melhoria do desempenho ambiental quando a cinza substituiu: na calagem a cal hidratada, na fertilização com K o nitrato de potássio, e na fertilização com P o superfosfato simples (COSTA et al., 2020).

A aplicação da cinza de biomassa florestal pode gerar *tradeoffs* entre alguns indicadores ambientais, sendo o desempenho ambiental superior quando tanto os potenciais de fertilização quanto os de calagem são alcançados simultaneamente (GAUDREAULT; LAMA; SAIN, 2020).

c) Na gestão ambiental

Os metais pesados fazem parte da constituição das árvores, principalmente de cascas e ramos, e como grandes quantidades de cinzas são geradas da combustão da biomassa florestal, sua disposição em aterro sanitário leva a uma maior concentração desses elementos, resultando em altos valores de ecotoxicidade (MAIER; SOWLATI; SALAZAR, 2019).

Costa et al. (2020), utilizaram a metodologia da Avaliação de Ciclo Ambiental (ACV) para comparar cenários de valorização da cinza de biomassa florestal destinadas à reciclagem como fertilizante e corretivo em substituição ao aterramento.

Costa et al. (2020) concluíram que a aplicação da cinza de biomassa florestal no solo em detrimento do aterramento apresentou-se satisfatória para as categorias de impacto: mudança climática, formação de materiais particulados, formação de ozônio fotoquímico, acidificação e depleção de recursos fósseis.

Contudo, quando foram consideradas as categorias de impacto eutrofização da água doce, toxicidade humana carcinogênica, toxicidade humana não carcinogênica e ecotoxicidade da água doce os impactos ambientais do uso da cinza no solo excederam os do aterramento, justamente pelo fato da cinza conter metais pesados, sendo recomendado que futuras pesquisas avaliem a solubilidade desses elementos nos processos de lixiviação para resultados mais preciso quanto as categorias supracitadas (COSTA et al., 2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil apresenta um setor bioenergético fortemente influenciado pela indústria de florestas plantadas, quando considerada a geração de energia elétrica, fato importante, devido a possibilidade de melhor manejo e aproveitamento dos resíduos florestais e da proximidade entre fonte de biomassa com as fontes geradoras de energia.

Sendo a cinza um material tão heterogêneo, é imprescindível que seja estabelecida uma regulamentação específica para potencializar seu adequado uso na silvicultura brasileira.

Existe uma lacuna no conhecimento científico sobre a interação dos metais pesados e outros minerais adicionados com as cinzas de biomassa florestal e os componentes do solo no Brasil, sendo a maioria dos trabalhos da área pertencentes à literatura internacional. São necessários estudos que analisem a solubilidade, biodisponibilidade, mobilidade e processos de lixiviação de metais pesados e de elementos importantes como o P e N, presentes nas cinzas em solos brasileiros.

Seria necessário que fossem determinados modelos ambientais, bem como os fatores de caracterização para norteamento da gestão das cinzas de biomassa florestal, uma vez a técnica da ACV aponta para possíveis impactos ambientais em categorias importantes e sensíveis à saúde humana como a eutrofização da água doce, a toxicidade humana carcinogênica, a toxicidade humana não carcinogênica e a ecotoxicidade da água doce.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura: ABNT, 2009a.

_____. **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações**, Brasil: ABNT, 2009b.

_____. **NBR ISO 13065: Critérios de sustentabilidade em bioenergia**: ABNT, 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Sistema de Informações de Geração**. 2021. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 15 out. 2021.

ALVES, M. V.; CANDIDO, W. E.; CHAGAS, A.; FLORESTAL, B. Metais Pesados em Grãos de Milho e no Solo Após Aplicação de Cinza de. In: 2016, **Anais...** [s.l.: s.n.].

ALVES, M. V.; NESI, C. N.; NAIBO, G.; SPRICIGO, J. G.; BENDER, A. C.; ANTUNES DA CRUZ, D. C.; CHAGAS, A.; CURTI, G. L. Comportamento químico do solo e satisfação dos produtores rurais após o uso de cinza. **Scientia Agraria**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 76, 2017.

AUGUSTO, L.; BAKKER, M. R.; MEREDIEU, C. Wood ash applications to temperate forest ecosystems - Potential benefits and drawbacks. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 306, n. 1–2, p. 181–198, 2008.

BANG-ANDREASEN, T.; PELTRE, M.; ELLEGAARD-JENSEN, L.; HANSEN, L. H.; INGERSLEV, M.; RØNN, R.; JACOBSEN, C. S.; KJØLLER, R. Application of wood ash leads to strong vertical gradients in soil pH changing prokaryotic community structure in forest top soil. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 742, 2021.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D. Eucalyptus com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 31–41, 2008.

BONFIM-SILVA, E. M. **Cinza vegetal e biochar na agricultura**. Maringá, PR: Uniedusul, 2020.

BRAND, M. A.; HENNE, R. A.; SCHEIN, V. A. S.; PEREIRA, E. R. Problem mapping of the generation and treatment of forest biomass ashes in boiler. **Ciencia Florestal**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 1167–1192, 2021.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº1**. 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 18 out. 2021.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Fly-ash from biomass burning: Applications and potentialities. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 2154–2165, 2015.

CLAPHAM, W. M.; ZIBILSKA, L. M. Wood Ash as a Liming Amendment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 23, n. 11–12, p. 1209–1227, 1992.

COSTA, T. P. Da; QUINTEIRO, P.; TARELHO, L. A. C.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. **Waste Management**, [s. l.], v. 101, p. 126–140, 2020.

DALCHIAVON, F. C.; LEMES, A. P.; DONEGÁ, M. A. Utilization of Eucalyptus Ash and Limestone As Correctives of Soil. **Global Science and Technology**, [s. l.], n. April 2013, p. 291–303, 2018.

DEIGHTON, H. D.; WATMOUGH, S. A.; BASILIKO, N.; HAZLETT, P. W.; REID, C. R.; GORGOLEWSKI, A. Trace metal biogeochemical responses following wood ash addition in a northern hardwood forest. **Canadian Journal of Forest Research**, [s. l.], v. 51, n. 6, p. 817–833, 2021.

DEMEYER, A.; VOUNDI NKANA, J. C.; VERLOO, M. G. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: An overview. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 77, n. 3, p. 287–295, 2001.

EPE. **Balanco Energético Nacional - BEN**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

ETHELBERG-FINDSEN, D.; RØNN, R.; EKELUND, F. Wood ash application reduces bryophyte in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation. **Forests**, [s. l.], v. 12, n. 178, 2021.

FANTOZZI, F.; BURATTI, C. Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice using data measured on a real plant. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 1796–1804, 2010.

GAUDREAU, C.; LAMA, I.; SAIN, D. Is the beneficial use of wood ash

environmentally beneficial? A screening-level life cycle assessment and uncertainty analysis. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 1300–1309, 2020.

GIMENES, J. **Análise Da Geração, recuperação e destinação de cinzas em caldeiras – o caso de uma indústria**. 2012. Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2012. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/44381/R - E - JACQUES GIMENES.pdf?sequence=1>>.

GÖMÖRYOVÁ, E.; PICHLER, V.; TÓTHOVÁ, S.; GÖMÖRY, D. Changes of Chemical and Biological Properties of Distinct Forest Floor Layers after Wood Ash Application in a Norway Spruce Stand. **Forests**, [s. l.], v. 7, n. 108, p. 1–16, 2016.

GUERRA, S. P. S.; EUFRADE-JUNIOR, H. de J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. [s.l.] : FEPAF, 2019.

HAKKILA, P. **Utilization of Residual Forest Biomass**. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1989.

HAKKILA, P.; PARIKKA, M. Fuels resources from the forest. In: **Bioenergy from sustainable forestry - Guiding, principles and practice**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2002. p. 19–47.

HAMIDI, N. H.; AHMED, O. H.; LATIFAH, O.; CH'NG, H. Y. **Soil nitrogen sorption using charcoal and wood ash**, 2021.

HANISCH, A. L.; FONSECA, J. A. Da. Efeito da adubação com cinza de biomassa sobre uma pastagem de hemátria cv . Flórida cultivada em solo ácido. **Revista Agropecuária Catarinense**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 74–80, 2014.

HENNE, R. A.; BRAND, M. A.; SCHEIN, V. A. S.; PEREIRA, E. R.; SCHVEITZER, B. Characterization of ashes from forest biomass combustion in boilers: A systemic view of potential applications. **Floresta**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 1073–1082, 2020.

IBICT. Manual do sistema ILCD - Sistema internacional do ciclo de vida de produtos e processos. Brasília, Brasil, 2014. p. 319.

JAMES, A. K.; THRING, R. W.; HELLE, S.; GHUMAN, H. S. Ash management review-applications of biomass bottom ash. **Energies**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 3856–3873, 2012.

KARLTUN, E.; SAARSALMI, A.; INGERSLEV, M.; MANDRE, M.; ANDERSSON, S.; GAITNIEKS, T.; STATE, L. Chapter 4 WOOD ASH RECYCLING – POSSIBILITIES. **Media**, [s. l.], p. 79–108, 2008.

MAEDA, S.; SILVA, H. D. Da; CARDOSO, C. Resposta de Pinus taeda à aplicação de cinza de biomassa vegetal em Cambissolo Húmico, em vaso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 43–52, 2008.

MAIER, J. M.; SOWLATI, T.; SALAZAR, J. Life cycle assessment of forest-based biomass for bioenergy: A case study in British Columbia, Canada. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 146, n. January, p. 598–609, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.035>>.

MILLWARD-HOPKINS, J.; PURNELL, P. Circulating blame in the circular economy: The case of wood-waste biofuels and coal ash. **Energy Policy**, [s. l.], v. 129, n. February, p. 168–172, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.019>>.

MODOLO, R. C. E.; TARELHO, L. A. C.; TEIXEIRA, E. R.; FERREIRA, V. M.; LABRINCHA, J. A. Treatment and use of bottom bed waste in biomass fluidized bed combustors. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 125, p. 170–181, 2014. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.040>>.

MUENCH, S.; GUENTHER, E. A systematic review of bioenergy life cycle assessments. **Applied Energy**, [s. l.], v. 112, p. 257–273, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.001>>.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems** Agroscope Reckenholz-Tanikon Research station (ART). [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Freddy_Navarro-Pineda/post/How_to_easily_predict_the_leaching_of_heavy_metals_from_soils/attachment/59d61f9d79197b807797e0dc/AS:285638185242630@1445112858480/download/ART+2012+-+Methods+of+assessment+of+direct+field+em>.

OLSSON, B. A.; ÅKERBLUM, S.; BISHOP, K.; EKLÖF, K.; RING, E. Does the harvest of logging residues and wood ash application affect the mobilization and bioavailability of trace metals? **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 383, p. 61–72, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.017>>.

OZOLINCIUS, R.; ARMOLAITIS, K.; RAGUOTIS, A.; VARNAGIRYTE, I.;

ZENKOVAITE, J. Influence of wood ash recycling on chemical and biological condition of forest Arenosols. **Journal of Forest Science**, [s. l.], v. 52, n. SPEC. ISS., p. 79–86, 2006.

PITMAN, R. M. Wood ash use in forestry - A review of the environmental impacts. **Forestry**, [s. l.], v. 79, n. 5, p. 563–588, 2006.

REID, C.; WATMOUGH, S. A. Evaluating the effects of liming and wood-ash treatment on forest ecosystems through systematic meta-analysis. **Canadian Journal of Forest Research**, [s. l.], v. 44, n. 8, p. 867–885, 2014.

RIBEIRO, G. B. D. D. **Análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal**. 2018. Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/19709/1/texto_completo.pdf>.

RISSE, M.; GASKIN, J. Best management practices for wood ash as agricultural soil amendment. **UGA Cooperative Extension Bulletin**, [s. l.], v. 1142, p. 1–4, 2016.

ROMDHANE, L.; ELBIZENER, L. B.; PANOZZO, A.; BARION, G.; CORTIVO, C. D.; RADHOUANE, L.; VAMERALLI, T. **Effects of Soil Amendment With Wood Ash on Transpiration, Growth, and Metal Uptake in Two Contrasting Maize (*Zea mays* L.) Hybrids to Drought Tolerance**, 2021.

SIEGL, S.; LAABER, M.; HOLUBAR, P. Green electricity from biomass, Part I: Environmental impacts of direct life cycle emissions. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 267–284, 2011.

SIEGL, S.; LAABER, M.; HOLUBAR, P. Green electricity from biomass, part II: Environmental impacts considering avoided burdens from replacing the conventional provision of additional functions. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–21, 2012.

SILVA, D. F. R. **Valorização das cinzas de combustão de biomassa na calagem e reciclagem de nutrientes no solo**. 2016. Universidade de Aveiro, [s. l.], 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10773/16299>>.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; GATIBONI, L. C.; COSTA, A. Uso da cinza da combustão de biomassa florestal como corretivo de acidez e fertilidade de um Cambissolo Húmico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 304–313, 2013.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; GATIBONI, L. C.; MARANGONI, J. M. Cinza De Biomassa Florestal: Alterações Nos Atributos De Solos Ácidos Do Planalto Catarinense E Em Plantas De Eucalipto. **Scientia Agraria**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 475, 2009.

TAVARES, S. R. D. L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: Conceitos básicos e fundamentos**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

UGAYA, C. M. L.; NETO, J. A. de A.; FIGUEIREDO, M. C. B. De. **Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro**. [s.l: s.n.]. 2017.

VERGARA, G. P.; CASTRO, L. R.; GASPARETTO, C. A.; BIZZO, W. A. Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. **Energy**, [s. l.], v. 239, n. Part C, p. 122243, 2021.

VESTERGARD, M.; BANG-ANDREASEN, T.; BUSS, S. M.; CRUZ-PAREDES, C.; BENTZON-TILIA, S.; EKELUND, F.; KJØLLER, R.; MORTENSEN, L. H.; RØNN, R. The relative importance of the bacterial pathway and soil inorganic nitrogen increase across an extreme wood-ash application gradient. **GCB Bioenergy**, [s. l.], n. 10, p. 320–334, 2018.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; SILVA, J. V. M. Da; ROSS, G. P. D.; MOREIRA, E. S. **Utilização da cinza de caldeira de biomassa como fonte de nutrientes em *Acacia mearnsii* De Wild**. 2002. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/Voluntario_66.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.