

## Artigos

# Cinzas de *Pinus spp.* e o mecanismo de desenvolvimento limpo: reduções certificadas de emissões e créditos de carbono

Ashes of *Pinus spp.* and the clean development mechanism: certified emissions reductions and carbon credits

José Roberto Winckler<sup>I</sup>   
Marco Aurélio da Silva Carvalho Filho<sup>II</sup>   
Eliane Carvalho de Vasconcelos<sup>II</sup>   
Matheus Perotti Martines<sup>II</sup> 

<sup>I</sup>Instituto Federal do Paraná, Palmas, PR, Brasil

<sup>II</sup>Universidade Positivo, Curitiba, PR, Brasil

## RESUMO

A utilização das cinzas de *Pinus spp.* como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland pode proporcionar a mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> e a obtenção de créditos de carbono, através do mecanismo de desenvolvimento limpo. Este trabalho pretendeu avaliar o potencial de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, através de duas abordagens. A primeira abordagem utilizou a metodologia ACM 0005 UNFCCC, em um cenário para avaliar a viabilidade de implementação de um projeto do mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL, com abrangência para o Estado do Paraná, utilizando as cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao clínquer, na produção do cimento Portland. A segunda abordagem analisou o potencial de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, com abrangência para o território brasileiro, utilizando as cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao cimento Portland na mixagem de concretos, argamassa e pastas. Foram observadas elevações nas emissões de CO<sub>2</sub>, pelo aumento nas distâncias médias no transporte das cinzas, nas duas abordagens (128 km e 100 km, respectivamente). Mesmo assim, nos balanços gerais das emissões, foram observados potenciais de redução (10.800 t e 20.546 t de CO<sub>2</sub>, respectivamente). Os resultados obtidos permitiram inferir pela viabilidade da implementação de projetos de MDL e da obtenção de créditos de carbono através da redução certificada de emissões - RCEs.

**Palavras-chave:** Redução de emissões de CO<sub>2</sub>; Mitigação de impactos ambientais; Adição mineral pozolânica

## ABSTRACT

---

The use of *Pinus spp.* as mineral addition or partial replacement of Portland cement, can provide the mitigation of CO<sub>2</sub> emissions and the obtaining of carbon credits, through the clean development mechanism. This work assessed the potential for reducing CO<sub>2</sub> emissions, through two approaches. The first approach used the ACM 0005 UNFCCC methodology, in a scenario to assess the feasibility of implementing a clean development mechanism project - CDM, covering the State of Paraná, using the ashes of *Pinus spp.* in partial replacement of clinker, in the production of Portland cement. The second approach analyzed the potential for reducing CO<sub>2</sub> emissions, covering the Brazilian territory, using the ashes of *Pinus spp.* in partial replacement of Portland cement in the mixing of concrete, mortar and pastes. Elevations in CO<sub>2</sub> emissions were observed due to the increase in the average distances in the transport of ash, in both approaches (128 km and 100 km, respectively). Even so, in the overall emission balances, reduction potentials were observed (10,800 t and 20,546 t of CO<sub>2</sub>, respectively). The results obtained allowed inferring the feasibility of implementing CDM projects and obtaining carbon credits through certified emission reductions - CERs.

**Keywords:** Reduction of CO<sub>2</sub> emissions; Mitigation of environmental impacts; Pozzolanic mineral addition

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as florestas de *Pinus spp.* representam aproximadamente 22,5% das florestas plantadas, com um volume de produção de 49,7 milhões de m<sup>3</sup> (IBÁ, 2019). Para cada m<sup>3</sup> de *Pinus spp.* industrializado, são gerados aproximadamente 0,26 t de resíduos de biomassa (WIECHETECK, 2009). Indústrias utilizam resíduos de biomassa na alimentação de caldeiras para a produção de vapor e a cogeração de energia. Seu uso apresenta vantagens em comparação ao uso de outros combustíveis, como os hidrocarbonetos, pois apresentam menor custo, são recursos renováveis e têm a capacidade de realizar o “sequestro do carbono” durante o processo de produção florestal (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2017). O processo de queima da biomassa em caldeiras apresenta a geração de cinzas como resíduos. O percentual de cinzas de *Pinus spp.* gerado varia entre 0,20% e 0,42% do volume da biomassa (SOUZA *et al.*, 2012). Assim, conforme apresentado na Tabela 1, pode-se estimar, no Brasil, a produção de aproximadamente 38.766 t de cinzas de *Pinus spp.* anualmente. O elevado volume de cinzas se associado ao transporte e a disposição inadequada podem causar importantes impactos ambientais.

Tabela 1 – Produção anual de subprodutos de *Pinus spp.*

<b>Abrangência</b>	<b>Toras (m<sub>3</sub>)</b>	<b>Fração de resíduos gerados na industrialização (t.m<sub>3</sub><sup>-1</sup>)</b>	<b>Resíduos de biomassa (t.a<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>Cinzas (t.a<sup>-1</sup>)</b>
Paraná	23.200.000	0,26	6.032.000	0,3	18.096
Brasil	49.700.000	0,26	12.922.000	0,3	38.766

Fonte: Autores (2021)

As indústrias cimenteiras, devido à queima de combustíveis e a calcinação do calcário, são responsáveis por emitir cerca de 7% do total CO<sub>2</sub> antropogênico (POSSAN, 2019). São responsáveis também pelo consumo de 2 a 3% da energia global (MONTEIRO *et al.*, 2017). No Brasil, o teor de clínquer contido no cimento pode variar de 25 a 100% (ABNT - NBR 16697, 2018). Assim, as emissões de CO<sub>2</sub> podem apresentar uma variação entre 173 kg de CO<sub>2</sub>.t<sup>-1</sup> e 823 kg CO<sub>2</sub>.t<sup>-1</sup>, proporcionalmente ao teor de clínquer (POSSAN, 2019). Do volume total de emissões, 70% advêm da produção de clínquer e os 30% restantes da obtenção de matéria prima, transporte e preparo de adições (FAIRBAIRN *et al.*, 2012). Na produção do clínquer, 63% das emissões de CO<sub>2</sub> ocorrem devido à calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio, 36% na queima de combustíveis fósseis e 1% devido ao uso de eletricidade (SNIC, 2019b). Na Tabela 2, são apresentadas as estimativas dos volumes anuais de produção de cimento Portland e de emissões de CO<sub>2</sub> no Estado do Paraná e no Brasil (SNIC, 2019b).

Tabela 2 – Produção anual de cimento Portland e volume de emissões de CO<sub>2</sub>

<b>Abrangência</b>	<b>Produção de cimento Portland (t.a<sup>-1</sup>)</b>	<b>Emissões de CO<sub>2</sub> na produção do cimento Portland (t.t<sup>-1</sup>)</b>	<b>Emissões de CO<sub>2</sub> (t.a<sup>-1</sup>)</b>
Paraná	6.150.000	0,53	3.259.500
Brasil	72.000.000	0,53	38.160.000

Fonte: Autores (2021)

As cinzas de *Pinus spp.*, com elevado grau de calcinação, apresentaram viabilidade técnica de uso como matéria-prima na produção do cimento Portland, ao atender aos parâmetros normativos da ABNT - NBR 16697 (2018) (WINCKLER, 2021).

Da mesma forma, argamassas produzidas com substituição de 10,0% do cimento Portland por cinzas de *Pinus spp.* com elevado grau de calcinação apresentaram resultados superiores à referência, nos ensaios de resistência mecânica à tração na flexão, resistência à compressão e de absorção de água (WINCKLER, 2021). A utilização de produtos alternativos ao clínquer, na produção do cimento Portland, proporciona uma diversificação nas possibilidades de aplicações e também nas características específicas de cada cimento. Benefícios como a maior durabilidade e vida útil de estruturas de concreto (pela baixa permeabilidade e pela resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, além da prevenção das reações álcali-agregado e da elevada resistência à compressão em idades mais avançadas), já foram observados (SNIC, 2019a). A utilização de materiais residuais pode proporcionar também a redução do consumo de energia e das emissões de CO<sub>2</sub>, em comparação ao processamento de estoques virgens, diminuindo também as demandas por transporte e suas influências associadas (UMAR *et al.*, 2020). Além disso, o uso de materiais residuais, em substituição aos recursos naturais, proporciona a preservação de jazidas (REZENDE, 2016).

A Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (CQNUAC) criou o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que objetiva possibilitar o cumprimento das metas do Protocolo de Quioto. O MDL consiste na implementação de projetos que objetivem a redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEEs) e contribuam para o desenvolvimento sustentável local em países em desenvolvimento. Nesses projetos, cada t de CO<sub>2</sub> equivalente que deixa de ser emitida ou que é retirada da atmosfera, passa a ser caracterizada como uma unidade de crédito de carbono, também chamada de Redução Certificada de Emissão (RCE) (REZENDE, 2016). Uma RCE representa 1,0 t métrica equivalente de dióxido de carbono, calculada com o uso dos potenciais de aquecimento global (UNFCCC, 2006). As RCEs podem ser comercializadas no mercado internacional, geralmente

através de bolsas de valores (REZENDE, 2016). O valor pago por t de CO<sub>2</sub> tem variado historicamente entre € 15 e € 35 (FAIRBAIRN *et al.*, 2012).

A Metodologia de Linha de Base Aprovada e Consolidada para Aumentar a Mistura na Produção do Cimento (ACM 0005), UNFCCC (2012), pode ser utilizada no desenvolvimento de qualquer projeto que proporcione o aumento da quantidade de adições na produção do cimento Portland, ou seja, possibilite a redução da quantidade de clínquer na mistura (UNFCCC, 2012). Outros pré-requisitos também são obrigatórios, como: a inexistência de escassez da adição a ser usada; inexistência de uma destinação alternativa adequada para a adição; a produção do cimento Portland deverá ser voltada apenas para o mercado interno (FAIRBAIRN *et al.*, 2012).

A aplicação da metodologia ACM 0005 UNFCCC (2012), em estudos que avaliaram a utilização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), em diferentes proporções, em substituição parcial ao clínquer, é apresentada na literatura. Fairbairn *et al.* (2012) e Rezende (2016) avaliaram o potencial de redução da emissão de CO<sub>2</sub> em função do percentual de substituição parcial do clínquer por CBCA e das distâncias de transporte até as indústrias cimenteiras. Os resultados demonstraram que, mesmo para longas distâncias de transporte das cinzas, os percentuais de redução de emissões de CO<sub>2</sub> se apresentaram diretamente proporcionais aos percentuais de cinzas utilizados.

Sendo assim, o presente estudo buscou determinar a viabilidade ambiental da utilização das cinzas de *Pinus spp.* em matrizes cimentícias, através de duas abordagens distintas: a primeira pela avaliação da viabilidade da implementação de projetos de MDL, visando a obtenção de RCEs, através da destinação das cinzas de *Pinus spp.* para o uso em substituição parcial ao clínquer na produção do cimento Portland. A segunda abordagem avaliou o potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> com o uso das cinzas *Pinus spp.* em substituição parcial ao cimento Portland na mixagem de concretos, argamassas e pastas.

## 2 METODOLOGIA

A primeira abordagem, com abrangência do Estado do Paraná, teve como objetivo analisar a viabilidade de implantação de projetos de MDL com a obtenção de RCEs. Para a análise, foi utilizada a metodologia ACM 0005 (UNFCCC, 2012). Foram determinados dois cenários distintos para o cálculo das emissões. O primeiro cenário denominado de “Cenário de Linha de Base” (*Baseline Scenario*) apresenta as emissões potenciais que tenderão a ocorrer em um período futuro no caso de manutenção dos atuais processos de produção. O cenário futuro denominado “Cenário do Projeto” (*Project Scenario*) representa as emissões que tendem a ocorrer caso efetive-se a implantação do projeto. O cálculo das emissões envolveu quatro etapas principais: Emissões de linha de base (*Baseline emissions*); Emissões fugitivas (*Leakage*); Emissões do projeto (*Project emissions*); e Redução de emissões (*Emissions reduction*). Para o “Cenário da Linha de base” (*Baseline*), considerou-se a adoção do sistema produtivo onde ocorram os menores níveis de emissões, objetivando conservadorismo no cálculo de redução de emissões CO<sub>2</sub>. As emissões do cenário da linha de base (*Baseline emissions*) foram calculadas pela Equação (1).

$$BE_{BC} = (BE_{clínquer} \cdot BE_{blend}) + BE_{ele\_ADD\_BC} \quad (1)$$

Em que:  $BE_{BC}$  = emissão total de CO<sub>2</sub> na produção de cimento; (t.t<sup>-1</sup>);  $BE_{clínquer}$  = emissões totais de CO<sub>2</sub> na produção de clínquer (t.t<sup>-1</sup>);  $BE_{blend}$  = fração de clínquer utilizada na produção do cimento (t.t<sup>-1</sup>);  $BE_{ele\_ADD\_BC}$  = emissões de CO<sub>2</sub> na produção do cimento, sem considerar as emissões relativas à produção do clínquer (t.t<sup>-1</sup>).

Para o cálculo das emissões na produção de clínquer, foi utilizada a Equação (2):

$$BE_{clínquer} = BE_{calcin} + BE_{fossil\_fuel} + BE_{ele\_grid\_CLNK} + BE_{ele\_sg\_CLNK} \quad (2)$$

Em que:  $BE_{calcin}$  = quantidade de emissões advindas da calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio (t.t<sup>-1</sup>);  $BE_{fossil\_fuel}$  = quantidade de emissões ocasionadas pela queima de combustíveis fósseis, utilizados como fonte de energia, na produção de clínquer (t.t<sup>-1</sup>);  $BE_{ele\_grid\_CLNK}$  = quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> pelo uso de energia elétrica obtida junto à rede de transmissão e utilizada na produção de clínquer. (t.t<sup>-1</sup>);  $BE_{ele\_sg\_CLNK}$  = quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> ocasionadas pela autogeração de energia elétrica que é utilizada na produção de clínquer (t.t<sup>-1</sup>).

Para a aplicação das Equações 1 e 2, foram admitidos os seguintes aspectos: para as emissões de CO<sub>2</sub> foram utilizados os percentuais reportados como 70,0% advindos da produção de clínquer e 30,0% da obtenção das matérias-primas, transporte e preparo das adições (SNIC, 2019b; POSSAN, 2019); para as emissões na produção do clínquer, 63,0% advindas da calcinação dos carbonatos de cálcio e magnésio, 36,0% da queima de combustíveis fósseis e 1,0% do uso da eletricidade da rede (SNIC 2019b); a metodologia ACM 0005 determina que as emissões de CO<sub>2</sub> relativas à rede elétrica devem ser calculadas com a metodologia denominada “Ferramenta para calcular o fator de emissão para um sistema elétrico” (*Tool to calculate the emission factor for an electricity system*) da UNFCCC, ou utilizados valores locais pré-determinados se forem precisos e confiáveis, sendo utilizado neste estudo o valor correspondendo a 1,0% do total de emissões na produção de clínquer (GNR PROJECT REPORTING CO<sub>2</sub>, 2020; SNIC 2019b); para os volumes totais médios de emissões de CO<sub>2</sub> na produção de cimento, foi utilizado o valor de 0,530 t de CO<sub>2</sub> por t de cimento, de acordo com o estimado para o ano de 2020 (SNIC 2019b); foram consideradas as emissões na autogeração da eletricidade utilizadas na produção de clínquer igual a zero, por não terem sido encontrados registros de autogeração e uso dessa energia pelas indústrias cimenteiras do Estado do Paraná.

As “Emissões Fugitivas” (*Leakage*) são aquelas que ocorrem fora do processo produtivo de uma indústria de cimento Portland. São caracterizadas pela queima de combustíveis fósseis durante o transporte de insumos para a indústria e correspondem à segunda etapa do cálculo das emissões. Para seu cálculo foi utilizada a Equação (3):

$$L = L_{add\_trans} (A_{blend} - P_{blend}) \cdot B_c \quad (3)$$

Em que: L= total de emissões de CO<sub>2</sub> fugitivas relacionadas ao transporte de adições (neste caso as cinzas de *Pinus spp.*), para a produção do cimento (t); L<sub>add\_trans</sub> = emissões de CO<sub>2</sub> obtidas pelo sistema de transporte de adições até as indústrias cimenteiras (t.t<sup>-1</sup>); A<sub>blend</sub> = fração de adição mineral ao cimento no cenário da linha de base (t.t<sup>-1</sup>); P<sub>blend</sub> = fração da adição mineral ao cimento no cenário do projeto de emissões (t.t<sup>-1</sup>); B<sub>c</sub> = produção anual de cimento no cenário do projeto de emissões (t.a<sup>-1</sup>).



Para a aplicação da Equação 3, foram admitidos os seguintes aspectos: no cálculo das emissões fugitivas, foram consideradas àquelas relacionadas aos sistemas de transporte das cinzas, seja no cenário da linha de base ou no cenário do projeto de emissões; o cálculo das emissões foi realizado somente para o transporte das cinzas, mesmo sabendo que as emissões no transporte de outras possíveis adições, presentes no cenário da linha de base, tendem a diminuir com a redução da fração de clínquer no cimento Portland, no cenário do projeto de emissões; no cenário da linha de base, a destinação final das cinzas refere-se ao encaminhamento das cinzas como resíduos para a disposição final, que ocorrem geralmente em aterros industriais ou em solos de cultivos florestais; para o cenário da linha de base, foi admitida uma distância média de 100 km para o transporte das cinzas até o local da disposição final, considerando nesta distância os trajetos de ida e volta; para o cenário do projeto de emissões, foi alterado o destino do transporte, passando as cinzas a serem transportadas até as indústrias cimenteiras, a uma distância média de 228 km (trajetos de ida e volta); como o transporte das cinzas para a disposição final, presente no cenário da linha de base, deixa de existir, a distância de transporte adotada foi obtida pela diferença entre a distância do cenário do projeto de emissões (228 km) e a distância no cenário da linha de base (100 km), resultando em 128 km (trajetos de ida e volta); para a estimativa das emissões no transporte, foi utilizado o valor unitário médio de  $7,456 \cdot 10^{-5} \text{ t CO}_2 \cdot \text{t cinza}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (FAIRBAIRN *et al.*, 2012).

Na terceira etapa da metodologia, que corresponde ao cálculo das emissões do projeto, foram calculadas emissões de  $\text{CO}_2$ , na produção do cimento Portland, de acordo com o cenário do projeto de emissões. Foram utilizadas equações idênticas às da primeira etapa ou do cenário da linha de base, com a alteração dos termos de BE para PE. Isso é possível, porque somente ocorrerá diminuição na fração de clínquer utilizada. Assim, os termos  $BE_{\text{clinker}}$  e  $PE_{\text{clinker}}$  são iguais, pois o clínquer a ser utilizado no cenário do projeto de emissões terá as mesmas características do clínquer produzido no cenário da linha de base (FAIRBAIRN *et al.*, 2012). Da mesma forma, os termos  $BE_{\text{ele\_ADD\_BC}}$  e  $PE_{\text{ele\_ADD\_BC}}$  são também idênticos, pois não foram consideradas ocorrências de emissões de  $\text{CO}_2$ , relacionadas ao preparo das cinzas para seu uso como adição. O cálculo da fração de cinzas em substituição parcial ao clínquer foi obtido através da



quantidade de cinzas de *Pinus spp.* e de cimento Portland, produzidos anualmente no Estado do Paraná. Para o cálculo, foi utilizada a Equação 6. Além disso, o resultado obtido na Equação 2 foi utilizado no cálculo de emissões, no cenário do projeto de emissões, pela aplicação das Equações (4), (5) e (6):

$$PE_{BC} = (PE_{clínquer} \cdot PE_{blend}) + PE_{ele\_ADD\_BC} \quad (4)$$

$$PE_{blend} = BE_{blend} - CINZAS_{BLEND} \quad (5)$$

$$CINZAS_{BLEND} = CINZAS_{PA} / BC \quad (6)$$

Em que:  $PE_{BC}$  = emissão total de  $CO_2$  na produção de cimento, no cenário do projeto de emissões ( $t.t^{-1}$ );  $PE_{clínquer} = BE_{clínquer}$  = emissão total de  $CO_2$  na produção de clínquer, no cenário da linha de base ( $t.t^{-1}$ );  $PE_{blend}$  = fração de clínquer utilizada na produção do cimento, no cenário do projeto de emissões ( $t.t^{-1}$ );  $PE_{ele\_ADD\_BC} = BE_{ele\_ADD\_BC}$  = emissões de  $CO_2$  na produção do cimento, sem considerar as emissões relativas à produção do clínquer ( $t.t^{-1}$ );  $CINZAS_{BLEND}$  = fração de cinzas no cimento ( $t.t^{-1}$ );  $CINZAS_{PA}$  = produção anual de cinzas de *Pinus spp.* ( $t.a^{-1}$ );  $BC$  = produção de cimento para cada ano do projeto ( $t.a^{-1}$ ).

O cálculo da redução das emissões, que corresponde à quarta etapa da metodologia, foi executado utilizando a Equação (7):

$$ER = [(BE_{BC} - PE_{BC}) \cdot BC + L] \cdot (1 - \alpha) \quad (7)$$

Em que:  $ER$  = redução anual de emissões de  $CO_2$  (kt);  $BE_{BC}$  = emissões totais anuais de  $CO_2$  na produção do cimento, na linha de base ( $t.t^{-1}$ );  $PE_{BC}$  = emissões totais anuais de  $CO_2$  na produção do cimento, no projeto de emissões, ( $t.t^{-1}$ );  $BC$  = produção total de cimento para cada ano do projeto ( $t.a^{-1}$ );  $L$  = emissões fugitivas totais de  $CO_2$  relativas ao transporte de adições (nesse caso as cinzas) até as cimenteiras (t);  $\alpha$  = emissão extra de  $CO_2$ , proporcionada pela diversificação do uso das cinzas, que ocorreria caso a quantidade efetivamente excedente de cinzas, após sua destinação ao uso da linha de base, não fosse suficiente para alimentar o projeto de emissões (nesse caso, o cálculo seria feito pela ponderação das reduções de emissões de  $CO_2$  pelo fator "α", dividindo-se a quantidade de cinzas não excedentes pela quantidade total de cinzas usada no projeto).

Para a aplicação das Equações 4 a 7, foram admitidos os seguintes aspectos: as cinzas residuais de *Pinus spp.* coletadas diretamente de caldeiras, sem sofrer nenhum tratamento posterior, transportadas até as cimenteiras (substituindo o transporte para disposição final o qual deixa de existir); foram determinadas as emissões relativas aos aditivos e à gipsita, representadas pelos termos  $BE_{ele\_ADD\_BC}$  e  $PE_{ele\_ADD\_BC}$  das Equações 1 e 4, como sendo 30% das emissões totais de  $CO_2$ , na produção de cimento Portland, no cenário da linha de base (30% de  $BE_{BC}$  em  $t.t^{-1}$ ), estes termos são equivalentes, tanto na linha de base quanto no projeto de emissões e acabam por se anular no cálculo da redução de emissões, pois a quantidade de aditivo e gipsita em ambas as situações serão iguais; para a distância de transporte das cinzas, no cenário do projeto de emissões, foi calculada a média aritmética das distâncias; para o cálculo da média, foram utilizadas as distâncias dos seis polos madeireiros até cada uma das três plantas industriais produtoras de cimento Portland no Estado do Paraná (Itambé em Balsa Nova, Votorantim em Rio Branco do Sul, Supremo em Adrianópolis); aproximadamente 94% da produção e industrialização de *Pinus spp.* no Paraná se encontra na região Centro-Sul, que compreende as regiões de Jaguariaíva-Arapoti, Telêmaco Borba, Ponta Grossa, Curitiba, Guarapuava e União da Vitória (EISFELD; NASCIMENTO, 2015); para as cinzas de *Pinus spp.*, até o presente momento, não foi encontrada na literatura nenhuma alternativa adequada de uso, sendo observada na prática a sua utilização como fertilizante no cultivo florestal, mais como forma de destinação final do que para aproveitamento de suas propriedades nutritivas; como a quantidade de cinzas de *Pinus spp.* terá a capacidade de suprir a demanda do projeto de emissões, o fator "α" foi considerado nulo.

Do ponto de vista financeiro, baseado nos trabalhos realizados por Costa (2012) e Handayeni (2014), foram adotados cálculos de pontos de equilíbrio, denominados: Distância de Equilíbrio de Emissões de  $CO_2$  no transporte das cinzas (DEE) e Distância de Equilíbrio Financeiro no transporte das cinzas (DEF). A DEE foi

calculada em função das distâncias de transporte das cinzas de *Pinus spp.* e das quantidades de emissões de CO<sub>2</sub> advindas desse transporte. O DEF foi calculado em função dos custos de transporte das cinzas e das receitas advindas da obtenção e venda de RCEs. Tanto a distância como o custo de transporte são fatores potencialmente limitantes para o uso das cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao clínquer em uma Economia Circular.

A DEE ocorre quando as emissões no transporte (t CO<sub>2</sub>.t cinzas<sup>-1</sup>) se igualam às emissões mitigadas pelo volume de produção de clínquer (t CO<sub>2</sub>.t clínquer<sup>-1</sup>). Para o cálculo da DEE, foi utilizada a Equação (8):

$$RCE_{S\_Clínquer} = V_{RCE} \cdot BE_{Clínquer} \quad (8)$$

Em que: DEE<sub>CO<sub>2</sub>T</sub> = distância de equilíbrio de emissões de CO<sub>2</sub> no transporte das cinzas (km); BE<sub>clínquer</sub> = emissões em t de CO<sub>2</sub> por t de clínquer na linha de base (t.t<sup>-1</sup>); CO<sub>2,T,CINZAS</sub> = emissões de CO<sub>2</sub> no transporte das cinzas (t.t<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>).

A DEF ocorre quando o valor médio obtido pela venda de RCEs, relativas à substituição de clínquer por cinzas, se iguala ao custo total de transporte das cinzas até a indústria cimenteira. Para o cálculo da DEF, foram utilizadas as Equações (9) e (10):

$$DEE_{CO_2T} = BE_{clínquer} / CO_{2,T,CINZAS} \quad (9)$$

$$DEF_T = RCE_{S\_clínquer} / [(V_{RCE} \cdot CO_{2,t,cinzas}) + CT_{CINZAS}] \quad (10)$$

Em que: DEF<sub>T</sub> = Distância de equilíbrio financeiro no transporte das cinzas (km); RCEs<sub>S\_Clínquer</sub> = receita da venda de RCEs obtidas pela substituição de uma t de clínquer por uma t de cinzas (R\$.t<sup>-1</sup>); V<sub>RCE</sub> = valor médio de venda de uma RCE (R\$), correspondente a mitigação de uma t de emissões de CO<sub>2</sub>; CO<sub>2,t,cinzas</sub> = emissões de CO<sub>2</sub> no transporte das cinzas (t.t<sup>-1</sup>. km<sup>-1</sup>); CT<sub>CINZAS</sub> = custo de transporte das cinzas (R\$.t<sup>-1</sup>. km<sup>-1</sup>); BE<sub>clínquer</sub> = emissões de CO<sub>2</sub>, na produção de clínquer na linha de base (t.t<sup>-1</sup>).

Para a aplicação das Equações 8 a 10, foram admitidos os seguintes aspectos: o custo de transporte foi determinado pela análise dos diferentes valores de frete constantes nas tabelas da Agência Nacional de Transportes Terrestre – ANTT (2020); os valores para transporte variam principalmente em função da distância, tamanho do veículo de transporte e tipos de carga, sendo admitido o custo de transporte a granel, em veículos de 3 eixos, com capacidade mínima de transporte de 20 t, para distâncias médias de 300 km, obteve-se, em outubro de 2020, valores médios de aproximadamente R\$ 0,16 .t<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>; para esse estudo, de forma conservadora, foi adotado um valor médio de R\$ 0,20.t<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>; os valores de mercado, relativos à comercialização das RCEs, foram obtidos através de pesquisa em Investing.com (2020), obtendo-se o valor médio de 25,00 Euros por RCE, para o mês de outubro de 2020, ou na conversão do dia 24 de outubro de 2020, R\$ 166,00; de forma conservadora, foi adotado o valor de R\$ 140,00 para a venda de cada unidade de RCE (correspondente a uma t de CO<sub>2</sub> não emitido no cenário do projeto de emissões).

Para a segunda abordagem, que teve como objetivo analisar a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, com a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de *Pinus* spp., foi delimitada como área de abrangência o território brasileiro. Para o estudo, foi utilizada uma metodologia baseada em trabalhos encontrados na literatura (FAIRBAIRN *et al.*, 2012; COSTA, 2012; HANDAYENI, 2014; REZENDE, 2016; UNFCCC, 2012). Definiu-se pela realização de um balanço de emissões, com a utilização das cinzas de *Pinus* spp. em substituição parcial ao cimento Portland, em indústrias de mixagem de concretos, argamassas e pastas (MIX). O balanço foi realizado através da comparação das emissões de CO<sub>2</sub> observadas no cenário atual, denominado de cenário de linha de base e as emissões em um cenário futuro, denominado de cenário de projeto de emissões.

As emissões anuais de CO<sub>2</sub>, no cenário da linha de base, foram calculadas pelas emissões anuais na produção do cimento Portland, somadas às emissões anuais

relativas ao transporte das cinzas de *Pinus spp.* para a destinação final. Os cálculos foram realizados utilizando-se da Equação (11):

$$BE_{CO_2} = (BE_{BC} \cdot B_C) + (L_{trans\_DF} \cdot B_{Cinzas}) \quad (11)$$

Em que:  $BE_{CO_2}$  = emissões anuais de  $CO_2$  no cenário de linha de base ( $t.a^{-1}$ );  $BE_{BC}$  = emissões de  $CO_2$  na produção do cimento no cenário da linha de base ( $t.t^{-1}$ );  $B_C$  = produção anual de cimento no cenário de linha de base ( $t.a^{-1}$ );  $L_{trans\_DF}$  = emissões de  $CO_2$  pelo sistema de transporte das cinzas até a destinação final, no cenário da linha de base ( $t.t^{-1}$ );  $B_{Cinzas}$  = produção anual de cinzas no cenário da linha de base ( $t.a^{-1}$ ).

Para os cálculos, foram admitidos os seguintes aspectos: para as emissões de  $CO_2$  no transporte das cinzas, no cenário da linha de base, admitiu-se, hipoteticamente, uma distância média de 100 km até o local da disposição final, já considerando os trajetos de ida e volta; foi utilizada a estimativa de emissão de  $7,456 \cdot 10^{-5} t CO_2.t cinzas^{-1}.km^{-1}$  (FAIRBAIRN *et al.*, 2012).

Para o cenário do projeto de emissões, foram consideradas as emissões de  $CO_2$  com a utilização das cinzas de *Pinus spp.* por indústrias de MIX, em substituição parcial do cimento Portland (de até 10,0%) (WINCKLER, 2021). Os cálculos foram realizados utilizando a Equação (12):

$$PE_{CO_2} = (PE_{BC} \cdot P_C) + (L_{trans\_MIX} \cdot P_{Cinzas}) \quad (12)$$

Em que:  $PE_{CO_2}$  = emissões anuais de  $CO_2$  no cenário do projeto de emissões ( $t.a^{-1}$ );  $PE_{BC}$  = emissões de  $CO_2$  na produção do cimento, no cenário do projeto de emissões ( $t.t^{-1}$ );  $P_C$  = produção anual de cimento no cenário do projeto de emissões ( $t.a^{-1}$ );  $L_{trans\_MIX}$  = emissões de  $CO_2$  pelo sistema de transporte das cinzas até as indústrias de MIX, no cenário do projeto de emissões ( $t.t^{-1}$ );  $P_{Cinzas}$  = produção anual de cinzas no cenário do projeto de emissões ( $t.a^{-1}$ ).

Foram admitidos os seguintes aspectos: para qualquer quantidade de cinzas efetivamente utilizada, ocorrerá diminuição na produção de cimento na mesma

quantidade; as cinzas substituirão parcialmente o cimento e as quantidades disponíveis de cinzas de *Pinus spp.* são pequenas em comparação à demanda anual por cimento; a quantidade de cimento a ser produzida no cenário do projeto de emissões foi determinada pela diferença da produção no cenário de linha de base, descontando-se a produção anual de cinzas de *Pinus spp.*; em função da grande variação nas distâncias de transporte, adotou-se hipoteticamente uma distância média de 200 km para o transporte das cinzas até as indústrias de MIX; para a distância de 200 km adotada, foram consideradas distâncias de ida e volta dos veículos de transporte; de forma conservadora, não foi considerado no balanço a mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> no transporte do cimento das cimenteiras até as indústrias de MIX; foi utilizado o valor unitário de 7,456.10<sup>-5</sup>t CO<sub>2</sub>.t cinzas<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup> (FAIRBAIRN *et al.*, 2012).

O cálculo do balanço de emissões de CO<sub>2</sub> foi realizado através da comparação das emissões no cenário da linha de base, com o cenário do projeto de emissões, conforme a Equação (13):

$$BAE_{CO_2} = (PE_{CO_2} - BE_{CO_2}) \quad (1)$$

Em que: BAE<sub>CO<sub>2</sub></sub> = balanço anual de emissões de CO<sub>2</sub> (t CO<sub>2</sub>. a<sup>-1</sup>). A obtenção de um resultado negativo no balanço evidencia a mitigação de emissões de CO<sub>2</sub>, possibilitando inferir-se pela viabilidade ambiental do projeto e determinar o potencial de mitigação de CO<sub>2</sub> no cenário futuro proposto.

Foi calculada também a DEE, para o uso das cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao cimento Portland, utilizando a Equação (8).

### 3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Para a realização deste estudo, optou-se, de forma conservadora, por utilizar como referência a distância média geral de 228 km. No caso da implementação efetiva

do projeto, deverá ser dado preferência para o transporte, até a cimenteira mais próxima. Na Tabela 3, são apresentadas as distâncias entre os seis principais polos madeireiros que trabalham na industrialização do *Pinus spp.*, gerando cinzas, e as três plantas industriais produtoras de cimento Portland no Estado do Paraná.

Tabela 3 – Distâncias entre geradores de cinzas de *Pinus spp.* e indústrias cimenteiras do Paraná

<b>Polo gerador de cinzas</b>	<b>Localização da Indústria Cimenteira</b>	<b>Distância (km)</b>
Jaguariaíva-Arapoti		236
Telêmaco Borba		237
Ponta Grossa	Balsa Nova (Itambé)	104
Curitiba – Região metropolitana		51
Guarapuava		241
União da Vitória		193
Jaguariaíva-Arapoti		274
Telêmaco Borba		275
Ponta Grossa	Rio Branco do Sul (Votorantim)	142
Curitiba – Região metropolitana		31
Guarapuava		279
União da Vitória		265
Jaguariaíva-Arapoti		243
Telêmaco Borba		383
Ponta Grossa	Adrianópolis (Supremo)	250
Curitiba – Região metropolitana		131
Guarapuava		387
União da Vitória		372
Distância média aproximada*		228*

Fonte: Autores (2021)

Em que: \*Média aritmética das distâncias

Na Tabela 4, está representada a aplicação da metodologia ACM 0005 UNFCCC (2012). Nos resultados, é possível observar o volume de redução de emissões de CO<sub>2</sub> para o Estado do Paraná, com a utilização das cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao clínquer.



Tabela 4 – Cinzas de *Pinus* spp. em substituição parcial ao clínquer e a redução anual de emissões de CO<sub>2</sub> no Estado do Paraná

Termo	Significado	Resultado	Unidade
<b>LINHA DE BASE E PROJETO DE EMISSÕES (BASELINE AND PROJECT EMISSIONS)</b>			
BE <sub>BC</sub>	Emissões totais de CO <sub>2</sub> na produção do cimento Portland no cenário da linha de base, descontada as emissões relativas à moagem e preparo de aditivos.	5,300.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
PE <sub>BC</sub>	Emissões totais de CO <sub>2</sub> na produção do cimento Portland no cenário do projeto de emissões, descontada as emissões relativas à moagem e preparo de aditivos.	5,282.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
BE <sub>blend</sub>	Fração de clínquer no cimento Portland no cenário da linha de base.	6,700.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
PE <sub>blend</sub>	Fração de clínquer no cimento Portland no cenário do projeto de emissões.	6,671.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
BE <sub>ele ADD BC</sub>	Emissões relativas à eletricidade para moagem e preparo de aditivos no cenário da linha de base.	1,590.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
PE <sub>ele ADD BC</sub>	Emissões relativas à eletricidade para moagem e preparo de aditivos no cenário do projeto de emissões.	1,590.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
BE <sub>clínquer</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer no cenário da linha de base.	5,535.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
PE <sub>clínquer</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer no cenário do projeto de emissões	5,535.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
BE <sub>calcin</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido à calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio no cenário da linha de base.	3,490.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
PE <sub>calcin</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido à calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio no cenário do projeto de emissões	3,490.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
BE <sub>fossil fuel</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido à queima de combustíveis fósseis para produção de clínquer no cenário da linha de base.	1,990.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
PE <sub>fossil fuel</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido à queima de combustíveis fósseis para produção de clínquer no cenário do projeto de emissões	1,990.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
BE <sub>ele_grid</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido ao uso de energia elétrica da rede, para produção de clínquer no cenário da linha de base.	5,500.10 <sup>-3</sup>	t.t <sup>-1</sup>
CLNK PE <sub>ele_grid</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido ao uso de energia elétrica da rede, para produção de clínquer no cenário do projeto de emissões.	5,500.10 <sup>-3</sup>	t.t <sup>-1</sup>
CLNK BE <sub>ele_sg CLNK</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido à autogeração de energia elétrica, para produção de clínquer no cenário da linha de base*	0	t.t <sup>-1</sup>
CLNK PE <sub>ele_sg CLNK</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> / t de clínquer devido à autogeração de energia elétrica, para produção de clínquer no cenário do projeto de emissões*	0	t.t <sup>-1</sup>
<b>EMISSÕES FUGITIVAS (LEAKAGE)</b>			
D <sub>add_source</sub>	Distância média de transporte intermunicipal (228 km – 100 km)**	128	km
L <sub>add_trans</sub>	Emissões relativas ao transporte por t de cinzas, no cenário do projeto de emissões.	9,544.10 <sup>-3</sup>	t.t <sup>-1</sup>
A <sub>blend</sub>	Fração de cinzas no cimento no cenário da linha de base.	0	t.t <sup>-1</sup>
P <sub>blend</sub>	Fração de cinzas no cimento no cenário do projeto de emissões.	2,942.10 <sup>-3</sup>	t.t <sup>-1</sup>
L	Emissões fugitivas totais relativas ao transporte das cinzas.	-1,720 .10 <sup>-1</sup>	kt
<b>REDUÇÃO DE EMISSÕES (EMISSIONS REDUCTIONS)</b>			
B <sub>C</sub>	Produção anual total de cimento do cenário do projeto de emissões	6.150	kt
A	Fração de cinzas não excedente usada no cenário do projeto de emissões.	0	t. t <sup>-1</sup>
E <sub>R</sub>	Redução anual de emissões de CO <sub>2</sub> para o cenário do projeto de emissões.	10,8	kt

Fonte: Autores (2021)

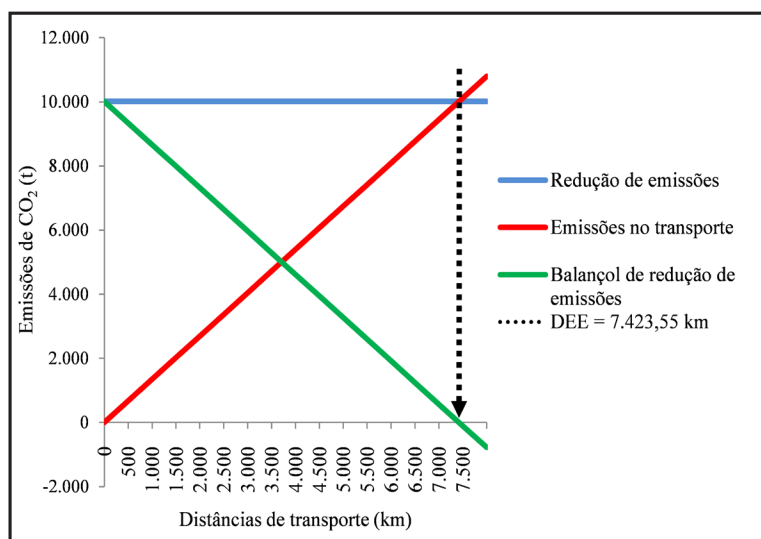
Em que: \*Não foram encontrados registros de autogeração, sendo considerada inexistente; \*\*Diferença entre as distâncias de transporte das cinzas no cenário do projeto de emissões (228 km) e da linha de base (100 km).

No cenário do projeto de emissões, foi admitida a utilização das 18,096 kt de cinzas de *Pinus spp.* produzidas anualmente no Estado do Paraná, em substituição parcial ao clínquer na produção de 6.150 kt de cimento Portland. Obteve-se a redução de aproximadamente 0,294% na fração de clínquer na composição do cimento Portland. Observou-se também reduções de aproximadamente 0,83% nas emissões de CO<sub>2</sub>. O percentual de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> demonstra uma relação diretamente proporcional ao percentual de substituição do clínquer por cinzas, de maneira análoga aos resultados obtidos com CBCA (FAIRBAIRN *et al.*, 2012; REZENDE, 2016).

Ao analisar o potencial de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> como o encaminhamento das cinzas de *Pinus spp.* a distâncias médias de 228 km até as cimenteiras, o projeto de emissões apresentou viabilidade ambiental, possibilitando a mitigação anual de aproximadamente 10.800 t de emissões de CO<sub>2</sub>. Como cada t de CO<sub>2</sub> não emitida, pode ser certificada como uma RCE, observa-se um potencial de obtenção de 10.800 RCEs anualmente.

Para analisar o comportamento das emissões de CO<sub>2</sub>, no transporte das cinzas a outras distâncias, foi realizado o cálculo da DEE, utilizando-se a Equação 8. A Figura 1 apresenta o comportamento do potencial de mitigações de emissões de CO<sub>2</sub> em função das distâncias de transporte.

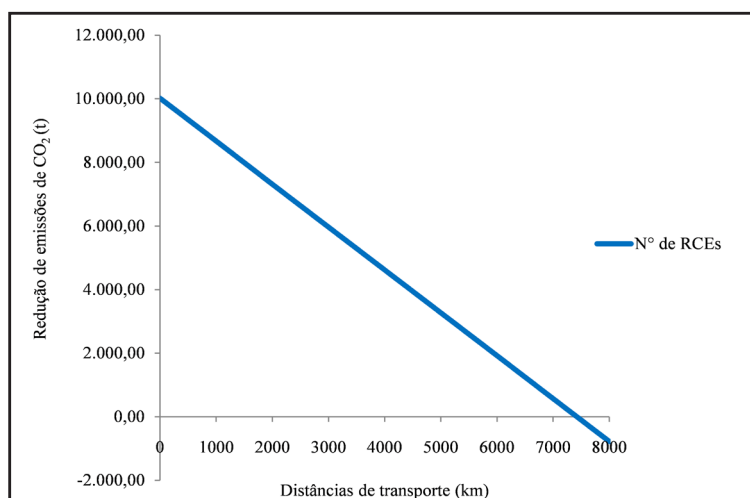
Figura 1 – Distância de equilíbrio de emissões de CO<sub>2</sub> no transporte das cinzas para indústrias cimenteiras



Fonte: Autores (2021)

A DEE ocorreu aos 7.423,55 km e representa a distância onde as emissões de CO<sub>2</sub> no transporte se igualam às mitigações de emissões obtidas pelo uso das cinzas em substituição parcial ao clínquer. Para a distância média utilizada no cenário do projeto de emissões (128 km), observa-se a redução de 9.843,43 t de emissões de CO<sub>2</sub> anualmente. Como reportado nos estudos com CBCA, mesmo para longas distâncias de transporte, o uso das cinzas como adição mineral tende a apresentar viabilidade ambiental, pelo seu grande potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> (FAIRBAIRN *et al.*, 2012; REZENDE, 2016). A Figura 2 apresenta a variação no balanço das emissões de CO<sub>2</sub> em função das distâncias de transporte.

Figura 2 – Balanço das emissões anuais de CO<sub>2</sub> em função das distâncias de transporte das cinzas



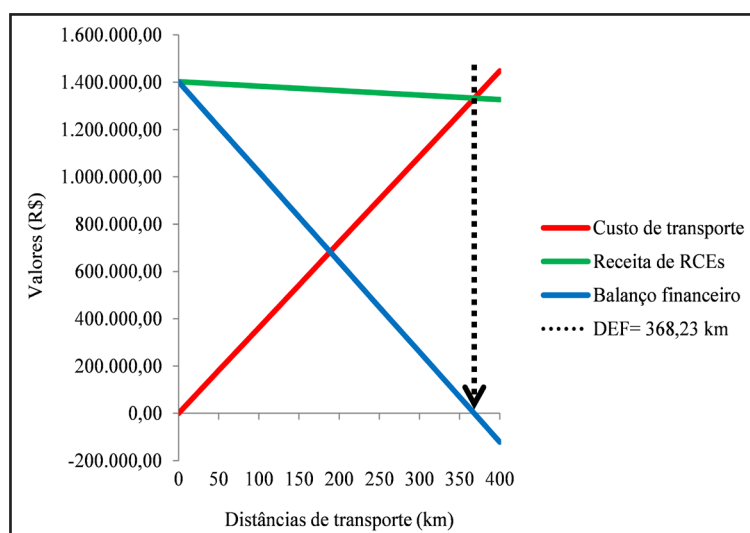
Fonte: Autores (2021)

Aumentos nas distâncias de transporte tendem a diminuir o potencial de reduções de emissões de CO<sub>2</sub> obtido pela substituição parcial do clínquer por cinzas. Para distâncias acima de 7.423,55 km, observam-se balanços negativos, ou seja, elevação no volume total de emissões.

Pelo viés econômico, foi realizada a avaliação da viabilidade financeira do encaminhamento das cinzas de *Pinus spp.* para indústrias cimenteiras. Na Figura 3,

apresenta-se a DFE, obtida pela comparação entre os valores obtidos com a venda de RCEs, o custo de transporte das cinzas a diferentes distâncias.

Figura 3 – Distância de equilíbrio financeiro entre o custo de transporte e as receitas de RCEs



Fonte: Autores (2021)

A DEF é observada a uma distância de transporte de 368,23 km. Para essa distância, observa-se a mitigação de 9.519,30 t de emissões de CO<sub>2</sub> (Figura 2). Para distâncias inferiores à de equilíbrio, além da mitigação de emissões de CO<sub>2</sub>, observam-se balanços financeiros positivos. Para a distância média de transporte utilizada no cenário do projeto de emissões (128 km), observa-se a mitigação de 9.843,43 t de CO<sub>2</sub> e um balanço financeiro positivo de R\$ 914.823,10 anualmente. Tanto a mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> quanto balanços financeiros positivos no transporte tendem a se ampliar em regiões que apresentam proximidade entre indústrias geradoras e empresas consumidoras de cinzas. No Estado do Paraná, por existir essa proximidade, fica caracterizado o potencial para a implementação de projetos, de acordo com a metodologia do MDL, possibilitando a obtenção de RCEs.

Na segunda abordagem, foi analisada a viabilidade ambiental do uso das cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial do cimento Portland por indústrias de MIX. Foi realizado um balanço de emissões de CO<sub>2</sub> abrangendo as quantidades de cinzas e de cimento produzidos anualmente no Brasil (Tabelas 1 e 2).

A Tabela 5 apresenta uma estimativa anual de emissões de CO<sub>2</sub> para o transporte das cinzas de *Pinus spp.*, encaminhadas para a disposição final ou, alternativamente, como matéria-prima para indústrias de MIX, considerando distâncias médias de 100 e 200 km respectivamente.

Tabela 5 – Emissões anuais de CO<sub>2</sub> no transporte das cinzas de *Pinus spp.* no Brasil

Destino	Produção anual de cinzas (t.a <sup>-1</sup> )	Distância média (km)	Emissões de CO <sub>2</sub> (t.t <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> )	Emissões anuais de CO <sub>2</sub> (t.a <sup>-1</sup> )
Disposição final	38.766	100	7,456 . 10 <sup>-5</sup>	289,04
Indústrias de MIX	38.766	200	7,456 . 10 <sup>-5</sup>	578,08

Fonte: Autores (2021)

A Tabela 6 apresenta o balanço de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> com a utilização das cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao cimento Portland pelas indústrias de MIX.

Tabela 6 – Balanço de emissões de CO<sub>2</sub> na substituição parcial do cimento Portland por cinzas de *Pinus spp.*

Termo	Significado	Resultado	Unidade
LINHA DE BASE – CENÁRIO ATUAL			
B <sub>C</sub>	Produção anual de cimento Portland – linha de base	72.000.000	t
B <sub>CINZAS</sub>	Produção anual de cinzas – linha de base	38.766	t
BE <sub>BC</sub>	Emissão de CO <sub>2</sub> por t de cimento Portland – linha de base	5,300.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
L <sub>trans_DF</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> no transporte das cinzas para disposição final*.	7,456.10 <sup>-5</sup>	t.t <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup>
BE <sub>CO2</sub>	Emissões anuais de CO <sub>2</sub> na Produção do cimento Portland (+) emissões anuais no transporte das cinzas para a disposição final.	38.160	kt
LINHA DO PROJETO – CENÁRIO FUTURO			
P <sub>C</sub>	Produção anual de cimento Portland – projeto de emissões	71.961.234	t
P <sub>CINZAS'</sub>	Produção anual de cinzas – projeto de emissões	38.766	t
PE <sub>BC</sub>	Emissão de CO <sub>2</sub> por t de cimento Portland – projeto de emissões	5,300.10 <sup>-1</sup>	t.t <sup>-1</sup>
L <sub>trans_MIX</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub> no transporte das cinzas para indústrias de MIX**	7,456.10 <sup>-5</sup>	t.t <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup>
PE <sub>CO2</sub>	Emissões anuais de CO <sub>2</sub> na Produção do cimento Portland (+) emissões anuais no transporte das cinzas para as indústrias de MIX.	38.139	kt
BALANÇO DE EMISSÕES			
PE <sub>CO2</sub>	Emissões anuais projetadas na linha de projeto = cenário futuro	38.139	kt
BE <sub>CO2</sub>	Emissões anuais projetadas na linha de base = cenário atual	38.160	kt
BAE <sub>CO2</sub>	Emissões na linha do projeto (-) emissões na linha de base	-20,546	kt

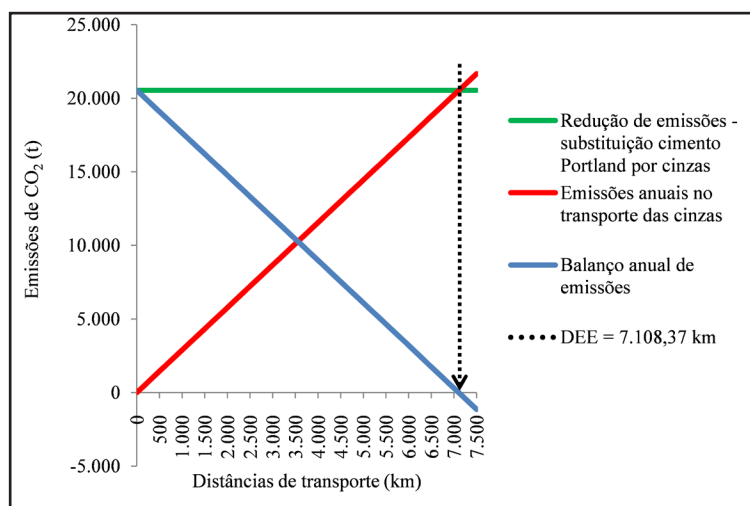
Fonte: Autores (2021)

Em que: \*A disposição final é geralmente realizada em aterros industriais ou solos de cultivos florestais e foi considerada uma distância média de 100 km para trajetos de ida e volta; \*\*Foi considerada a distância média de 200 km para o transporte até as indústrias de MIX, para os trajetos de ida e volta.

Com o encaminhamento das cinzas de *Pinus spp.* para as indústrias de MIX, mesmo que estas estejam localizadas ao dobro da distância dos locais de disposição final, é possível obter mitigações anuais de 20.546 t de emissões de CO<sub>2</sub>. O valor obtido corresponde a aproximadamente 0,054% do total das emissões. Para curtas distâncias de transporte, o percentual de redução de emissões é diretamente proporcional ao percentual de substituição do cimento Portland por cinzas.

O balanço anual de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub>, em função das distâncias de transporte das cinzas de *Pinus spp.* até as indústrias de MIX, ou seja, DEE, pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Distância de equilíbrio de emissões de CO<sub>2</sub> no transporte das cinzas para indústrias de MIX



Fonte: Autores (2021)

Observa-se que a DEE se dá aos 7.108,37 km. Para o transporte das cinzas a distâncias menores que a de equilíbrio, o balanço da redução de emissões será positivo. Isso se dá pelo expressivo potencial de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> com a substituição do cimento Portland por cinzas de *Pinus spp.* No balanço de emissões apresentado na Tabela 6, foi admitida uma distância de transporte de 200 km até as indústrias de MIX (cenário da linha de projeto), devendo ser subtraída a distância de 100 km para o transporte até a disposição final (cenário da linha de base), resultando em uma ampliação de 100 km na distância média de transporte considerada no balanço de

emissões. Mesmo com o aumento de 100 km no caso do transporte até as indústrias de MIX, observa-se a redução de 20.256,94 t de emissões de CO<sub>2</sub> anualmente.

As cinzas de *Pinus spp.* apresentaram viabilidade técnica quando utilizadas em proporções de 10,0% de substituição parcial do cimento Portland (WINCKLER, 2021). Porém, a quantidade de cinzas de *Pinus spp.* produzidas anualmente no Brasil representam apenas 0,05% do volume de produção do cimento, não apresentando capacidade de suprir totalmente a demanda. Esse aspecto se assemelha ao que ocorre com outras cinzas de biomassa já estudadas (FAIRBAIRN *et al.*, 2012; REZENDE, 2016). Do ponto de vista econômico-financeiro, a utilização de 10,0% de cinzas de *Pinus spp.*, em substituição ao cimento Portland, proporcionará uma redução na mesma proporção da necessidade de aquisição do cimento, representando importante diminuição de custos e, por consequência, elevação de competitividade das indústrias de MIX.

## 4 CONCLUSÕES

A simulação de um projeto de MDL com o uso das cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao clínquer, na produção do cimento Portland, com abrangência para o Estado do Paraná, demonstrou potencial de mitigação de 10.796,68 t de emissões de CO<sub>2</sub> anualmente. Demonstrou também que a proximidade entre os polos produtores e os potenciais consumidores é um importante aspecto para a viabilidade financeira, que pode ser alcançada pela implementação de um projeto de MDL e, consequente, vendas de RCEs. O balanço das emissões de CO<sub>2</sub>, com a utilização das cinzas de *Pinus spp.* em substituição parcial ao cimento Portland, também demonstrou potencial de mitigações nas emissões e, portanto, viabilidade ambiental.

Em função dos resultados obtidos, é possível inferir pela viabilidade ambiental do uso das cinzas de *Pinus spp.* tanto em substituição parcial ao clínquer na produção cimento Portland, como em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos, argamassas e pastas. Estudos complementares podem ser realizados para avaliar o potencial de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> em regiões específicas, localizadas no entorno de fontes geradoras de cinzas de *Pinus spp.*, que demandam menores distâncias de transporte.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Positivo e ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) pelo apoio logístico e suporte acadêmico.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AGENCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Tabela de Tarifas**. Disponível em: [https://portal.antt.gov.br/resultado/-/asset\\_publisher/m2By5inRuGGs/content/id/1101998](https://portal.antt.gov.br/resultado/-/asset_publisher/m2By5inRuGGs/content/id/1101998). Acesso em 22 out. 2020.
- COSTA, B. L. de C. da. **Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**, 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- EISFELD, R. D. L.; NASCIMENTO, F. A. F. **Mapemaneto dos plantios florestais do estado do Paraná**: Pinus e Eucalyptus. Curitiba: Instituto de Florestas do Paraná, 2015.
- ELICHE-QUESADA, D.; FELIPE-SESÉ, M. A.; LÓPEZ-PÉREZ, J. A.; INFANTES-MOLINA, A. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 463-475, 2017.
- GNR PROJECT REPORTING CO<sub>2</sub>. **Total production volumes of clinker**. Disponível em: <http://www.wbcscement.org/GNR-2016/index.html>. Acesso em 17 jan. 2021.
- INVESTING.COM. **Crédito Carbono Futuros**. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>. Acesso em 24 out. 2020
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em 22 jan. 2021
- FAIRBAIRN, E. M. R.; DE PAULA, T. P.; CORDEIRO, G. C.; AMERICANO, B. B.; TOLEDO FILHO, R. D. Evaluation of partial clinker replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emission reductions and potential for carbon credits. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 229-251, 2012.
- HANDAYENI, K. D. M. E. Lesson Learned for GHG Mitigation on Transportation Sector in Surabaya City, Indonesia. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 135, p. 152-158, 2014
- MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Publishing Group**, v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017.

POSSAN, E. Captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios. **Concreto & Construções**, n 95. jul-set, p. 72-78. São Paulo: IBRACON, 2019.

REZENDE, M. F. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo**, 2016. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materias da Rede Temática de Engenharia de Materiais - UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório anual 2019**. São Paulo, 2019a. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2019.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf). Acesso em 23 out. 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, 2019b. Disponível em <http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>. Acesso em 23 out. 2020.

SOUZA, M. M. de; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. dos. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheira e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325-334, Curitiba, 2012.

UMAR, U. A.; SHAFIQ, N.; AHMAD, F. A. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, p.283-291, 2021.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its first session**. 2006. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2006/cmp2/eng/10a01.pdf>. Acesso em 18 jan. 2021.

UNFCCC. **ACM0005 - Approved consolidated baseline and monitoring methodology - Increasing the blend in cement production**. 2012. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/1AG8O523O2UQD01BAID55YT2LZZ6R0>. Acesso em 18 jan. 2021.

WIECHETECK, M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental, Curitiba: MMA, 2009

WINCKLER, J. R. **Cinzas de *Pinus* spp. como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland: viabilidade técnica e ambiental**, 2021. 141 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Gestão Ambiental, Universidade Positivo, Curitiba, 2021.

## **Contribuição de Autoria**

### **1 José Roberto Winckler**

Dr.

<https://orcid.org/0000-0002-3339-7011> • jrwinckler@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Recursos, Software, Supervisão, Validação, Visualização de dados (tabela, gráfico), Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

### **2 Marco Aurélio da Silva Carvalho Filho**

Dr.

<https://orcid.org/0000-0002-4143-787X> • marccarv@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Visualização de dados (tabela, gráfico), Escrita – revisão e edição

### **3 Eliane Carvalho de Vasconcelos**

Dra.

<https://orcid.org/0000-0002-5923-0834> • evasconcelos@up.edu.br

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Escrita – revisão e edição

### **4 Matheus Perotti Martines**

Engenheiro de Bioprocessos e Biotecnologia

<https://orcid.org/0000-0002-4606-6035> • matheus-1311@hotmail.com

Contribuição: Visualização de dados (tabela, gráfico), Escrita – revisão e edição

## **Como citar este artigo**

Winckler, J. R.; Carvalho Filho, M. A. S.; Vasconcelos, E. C.; Martines, M. P. Cinzas de Pinus spp. e o mecanismo de desenvolvimento limpo: reduções certificadas de emissões e créditos de carbono. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 32, n. 4, p. 2219-2243, 2022. DOI 10.5902/1980509867679. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509867679>.