

## ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO AMBIENTAL

# PRODUÇÃO DE CARVÃO COM PROCESSO DE PIRÓLISE PARA O TRATAMENTO DE PASSIVOS DE ATERROS INDUSTRIAIS: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA PARA O DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS LIMPAS

*Fabrício Weiss<sup>1</sup>; Tailane Hauschild<sup>1</sup>; Diosnel A. R. Lopez<sup>1</sup>; Adriane L. Rodriguez<sup>1</sup>; Tania Basegio<sup>2</sup>; Carlos Pérez Bergmann<sup>2</sup>; Luis Tarelho<sup>3</sup>; Ênio L. Machado<sup>1</sup>. Aline Strothmann<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Universidade de Santa Cruz do Sul/Unisc <sup>2</sup>PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS e <sup>3</sup>Universidade de Aveiro – Portugal.*

## RESUMO

Este trabalho envolveu a aplicação de sistema de pirólise (350 °C) no tratamento de passivos de aterro industrial, localizado na região sul do Brasil. A avaliação do ciclo de vida (ACV) de procedimento de pirólise em unidade de bancada foi avaliada, considerando a quantidade de resíduo tratado como a unidade funcional para a ACV. Aspectos de inventários de operação do sistema referenciaram fluxo de rede de 10 g de resíduo. Cenários de impactos dos passivos foram feitos com a Normalização e Caracterização utilizando o *software* Impact 2002+. Isto considerou a utilização dos procedimentos de Pirólise e Pirólise Catalítica com Caulinita (50% m/m). A análise do fluxo de rede com a ACV mostrou 2,1% dos impactos totais na Pontuação Única para os resíduos, tendo 48,9 e 49%, respectivamente, para os procedimentos de pirólise e pirólise catalítica (gerando 71% de carvão no primeiro caso e 66% no segundo caso, sendo o restante fração oleosa e gasosa). Em outro Cenário de análise de Pontuação única, se a energia necessária para o processo for obtida da própria pirólise ou em conjunto com outra fonte de energia sustentável, 90,1% dos impactos seriam do passivo ambiental (resíduo), tendo apenas 1,64% e 8,3% dos métodos de pirólise e pirólise catalítica, respectivamente. Em termos de kg CO<sub>2</sub>eq deve ser considerado que aproximadamente 40% de redução pode ser obtida para o impacto ambiental do resíduo com o tratamento com pirólise catalítica, especialmente com o carvão se tornando combustível.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida; Pirólise; Biochar.

## PRODUCTION OF CHARCOAL WITH PYROLYSIS PROCESS FOR THE TREATMENT OF LIABILITIES OF INDUSTRIAL LANDFILLS: ANALYSIS OF LIFE CYCLE, DEVELOPMENT OF CLEAN TECHNOLOGIES AND SUSTAINABILITY

## ABSTRACT

This work involved the application of a pyrolysis system (350 °C) in the treatment of industrial landfill liabilities, located in the southern region of Brazil. The life cycle assessment (LCA) of a bench unit pyrolysis procedure was evaluated, considering the amount of waste treated as the functional unit for LCA. Aspects of the system's operating inventories referred to a 10 g waste network flow. Scenarios of impacts of liabilities were made with Normalization and Characterization using the Impact 2002+ method. This considered the use of the procedures of Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis with kaolinite (50% w / w). The analysis of the network flow with the LCA showed 2.1% of the total

impacts on the Single Score for the residues, with 48.9 and 49%, respectively, for the pyrolysis and catalytic pyrolysis procedures (generating 71% of coal in the first case and 66% in the second case, the remaining fraction being oily and gaseous). In another single score analysis scenario, if the energy required for the process is obtained from the pyrolysis itself or in conjunction with another sustainable energy source, 90.1% of the impacts would be from the environmental liability (waste), having only 1.64 % and 8.3% of the pyrolysis and catalytic pyrolysis methods, respectively. In terms of kg CO<sub>2</sub>eq, it should be considered that approximately 40% reduction can be obtained for the environmental impact of the waste with treatment with catalytic pyrolysis, especially with coal becoming fuel.

**Keywords:** Life Cycle Analysis; Pyrolysis; Biochar.

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento de resíduos com o processo de pirólise não é mais apenas um caminho de gestão e gerenciamento ambiental para reduzir passivos ambientais e/ou recuperar energia com obtenção do gás de síntese, bio-óleo e biochar. Também deve ser considerado que a obtenção do biochar, ou carvão, estabelece a potencial criação de cenários de vários mecanismos para economia circular: melhorar a qualidade dos solos; purificar a água; imobilizar substâncias tóxicas no solo; controlar o excesso de nutrientes, tanto no solo como em jardins filtrantes, ser suporte de purificadores de ar, água e como suporte para nutrientes visando melhorar a produção de metano em processos de anaerobiose (GLASER et al. 2001; DRAPER, 2019; SALETNIK, 2019). O biochar, diferentemente do carvão vegetal, é produzido em várias faixas de temperaturas, que por exemplo, considerando-se a decomposição da celulose, tem a partir de 240-350 °C, a produção de quantidade mais expressiva de gás de síntese, bio-óleo e uma fração menor de biochar. Se for considerada a decomposição da lignina, com faixas de temperaturas entre 280-500 °C, o biochar poderá render até 35-40% (ZAMAN et al., 2017).

Por sinal, o termo biochar tem restrições de utilização. Quando a obtenção da fração sólida do produto reduzido for obtida de materiais sintéticos, como os plásticos, papel, papelão, algodão, o termo mais utilizado é somente carvão do processo de pirólise. Um exemplo é o PEAD, que pirolisado entre 400-450 °C, produz carvão com 51,40% (m/m) de material volátil, 46,03% (m/m) de carbono fixo, fração fixa de 2,41% (m/m) e, com cinzas de apenas 0,16% (m/m). A superfície BET, o volume de poro, a densidade, o valor de PCU deste mesmo material apresentam 16,77 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, 0,2080 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>, 1,59 g cm<sup>-3</sup> e 4,5 kcal g<sup>-1</sup>, respectivamente, tornando-o como detentor de vários potenciais de aplicação (JAMRADLOEDLUK e LERTSATITTHANAKORN, 2014).

Desta forma biochar e o carvão de pirólise podem ser usados para recuperação de energia, meio ambiente e agricultura, associando a necessidade do conhecimento das referências legais de aplicação destes produtos. Mais especificamente para o biochar, o que também poderia ser referência para a qualidade do carvão de pirólise, entre outras, está a referência da *Biochar Quality Mandate* (BQM, 2020). A BQM estabelece, de um modo geral, o controle para metais pesados, organoclorados e furanos. Já a referência de uso do biochar no Brasil, deve considerar parâmetros detalhados na IN - SDA Nº 27 de 2006 do Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA (BRASIL, 2006). Os valores estão associados com o Cádmiu (3 mg kg<sup>-1</sup>), Chumbo (150 mg kg<sup>-1</sup>), Cromo total ( 2 mg kg<sup>-1</sup>) e Níquel ( 70 mg kg<sup>-1</sup>).

É claro que a efetiva sustentabilidade dos processos de produção do biochar para recuperar energia a partir de resíduos, assim como, fixar carbono no solo exige a aplicação de ferramentas analíticas efetivas. Neste sentido, Dong et al. 2019, estudaram

a sustentabilidade com a avaliação do ciclo de vida (ACV), considerando o *software* Gabi 8.0, tendo os processos de incineração, pirólise em forno rotatório, gaseificação de leito fluidizado rotatório e gaseificação com forno rotatório com queima do gás de síntese e fusão das cinzas na produção de ligas metálicas. Especificamente no processo de pirólise, para 1 tonelada de resíduos sólidos urbanos, 319,1 kg de carvão são gerados, sendo imediatamente utilizados em processo de combustão para geração de energia. A necessidade de cal adicionado ao reator de pirólise é o único ponto adicional de entrada, rendendo ainda 17,6 kg de metais e 669,3 kg de gás de síntese. Para o potencial de aquecimento global (PAG) o sistema de pirólise apresentou 151 kg CO<sub>2</sub>eq, contra 104 kg CO<sub>2</sub>eq para o processo de gaseificação. Entre 18-68% do PAG podem ser reduzidos com os processos térmicos de incineração, pirólise em forno rotatório e gaseificação de leito fluidizado rotatório. O resíduo trabalhado por Dong et al. 2019 foi de composição gravimétrica m/m de 35% de matéria orgânica, 20% de papel, 11% de plásticos, 4% de têxteis, 5% de vidros, 3% de metais e 22% de resíduos inertes e outros. Assim sendo, é importante avaliar efetivamente o ganho ambiental do método de pirólise e pirólise catalítica (com a argila vermelha como catalisador), que no caso deste estudo foi aplicado para o tratamento passivo de resíduos de aterro classe IIA localizado em fundação de proteção ambiental do sul do Brasil, a qual trata resíduo de 13 empresas cooperativadas, envolvendo setores como fumageiro, de alimentos e galvanoplastia, entre outros.

## 2. OBJETIVO

Neste sentido foi desenvolvido a ACV de método de pirólise com reator de bancada visando avaliar o rendimento e comportamento de métodos de pirólise para resíduos de aterro, predominantemente com plásticos, papéis e algodão, potencializando recuperar energia e liberar o passivo da célula de aterro estudada.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Amostragem e preparação das amostras

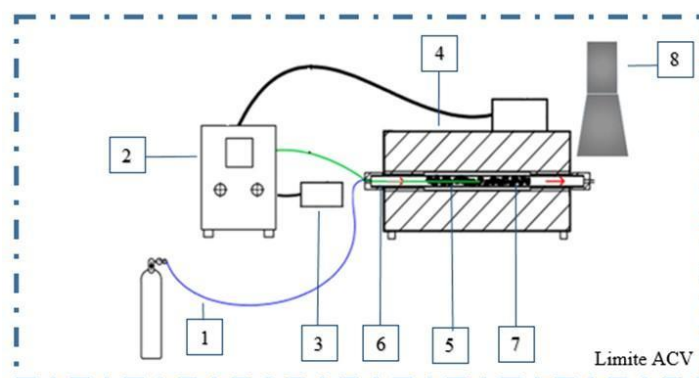
As amostras para os ensaios de pirólise foram coletadas ao longo de célula de aterro desativada classe II A (conforme classificação da NBR 10.004 - ABNT, 2004), localizada em uma área pertencente a uma Fundação de proteção ambiental no Sul do Brasil. Esta unidade tem 6.300 m<sup>3</sup> de resíduos oriundos de empresas dos setores fumageiro, alimentos, metal-mecânico e de materiais plásticos e poliméricos. De dez pontos uniformemente distribuídos na superfície da célula foram retiradas alíquotas de 5 kg de resíduos, considerando todos os tipos na mistura heterogênea, incluindo: plásticos, papel, papelão, rejeito, espumas e borrachas sintéticas, bem como, tecidos de algodão e tripas de celulose. Após mistura das frações das amostras coletadas foram retiradas alíquotas de cada um dos tipos de materiais da mistura heterogênea, na relação m/m, com 40% de plástico, 25% de papel/papelão, 25% de espumas e borrachas sintéticas e 10% de tecido de algodão e tripas de celulose. Estas alíquotas constituíram amostra individual de cada tipo de resíduo, com prévia trituração para fração de 5mm, tendo secagem nas condições de 60 °C durante sete dias, até obtenção de peso constante.

### 3.2 Ensaios de Pirólise Não Catalítica e Catalítica

Na Figura 1 podem ser observados os detalhes do pirolisador. Os ensaios foram feitos em pirolisador com reator do tipo leito fixo, marca Sanchis, com as seguintes especificações: zona de aquecimento com resistência de 1800W, 220 V - 26,89 Ohms, 8,18 A e 2,59 W cm<sup>-1</sup>, envolvendo todo o tubo de quartzo, no qual a amostra foi

acondicionada para o tratamento de pirólise. Os ensaios de pirólise foram feitos com temperatura máxima de 350°C, tendo taxas de aquecimento de 2,75°C por minuto, com 120 minutos como tempo necessário para atingir patamar de 350 °C, permanecendo por mais 30 minutos nesta temperatura, totalizando então 150 minutos. O arrefecimento até a temperatura ambiente (25 °C) foi de forma natural, com o tubo de quartzo fora do forno.

**Figura 1.** Componentes do forno pirolisador e limites do sistema para estudos de ACV. (1) Fonte de purga (N<sub>2</sub>), (2) Controlador de temperatura, (3) Data Loger, (4) Reator, (5) Termopar, (6) Tubo de quartzo, (7) Resíduo pronto para pirólise, (8) Sistema de exaustão de gases.



Autor: Adaptado de Hauschild, 2019.

### 3.3 Avaliação do Ciclo de Vida dos Métodos de Pirólise

O estudo foi desenvolvido em quatro etapas, considerando as normas NBR ISO 14.040 e NBR ISO 14.044, com execução do desenvolvimento de metas e escopo; coleta de dados; avaliação do inventário e avaliação/interpretação dos impactos. A criação de cenários para o prognóstico como tecnologia limpa foi feita com a interpretação das principais causas de impactos ambientais no estudo de caso. O inventário do método referenciado na Fig. 1 está apresentado na Tabela 1. Estes dados foram estimados e determinados em função dos procedimentos adotados para a experimentação de pirólise, considerando a unidade funcional e o fluxo de referência.

**Tabela 1.** Inventário para desenvolvimento dos métodos de pirólise estudados.

Parâmetros	Métodos	
	Fluxo de Referência - Pirólise	Fluxo de Referência - Pirólise Catalítica
Unidade Funcional - Resíduos (g)	10	10
Nitrogênio (purga mL min <sup>-1</sup> )	250	250
Consumo de energia (kWh)	1,8	1,8
Catalisador (argila vermelha) (g)	-	10
Tempo de Pirólise (min)	150	150
Quantidade de carvão gerado (g)	7,1	6,6

As avaliações do ciclo de vida (ACV) foram desenvolvidas com um modelo de linha de base de 100 anos e aplicadas para a extensão de danos na escala hierárquica. Consideração especial foi dada à contribuição dos insumos químicos e da matriz energética brasileira. A partir do *software* SimaPro 8.0.4, foi aplicado o método Impact

2002+, explorando principalmente o banco de dados com referência aos sistemas (S) para considerar o processo de estudo ilustrado na Figura 1. As exceções foram eletricidade e calor, onde (U) foi usado. A cobertura mais ampla do perfil de dados também considerou as opções de RoW, RER e GLO. A Caracterização e a Normalização foram aplicadas para as avaliações de ACV.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliação do Ciclo de Vida, Desenvolvimento de Tecnologias Limpas e Sustentabilidade.

Nos estudos de ACV sobre biochar, métodos de impacto como o ReCiPe (MUNOZ et al. 2017) e o indicador Eco 99 (HOMAGAIN et al. 2015) aparecem como os mais usados, bem como, o CML-*baseline* e o Impact 2002+, sendo também, mais recorrente o uso do *software* SimaPro a partir da versão 8.0.3 (HONG et al., 2010; JOLLIET 2003). Assim sendo, neste trabalho foi escolhido o método Impact 2002+. O inventário associado com o SimaPro 8.0.3 pode ser visto na Tabela 2.

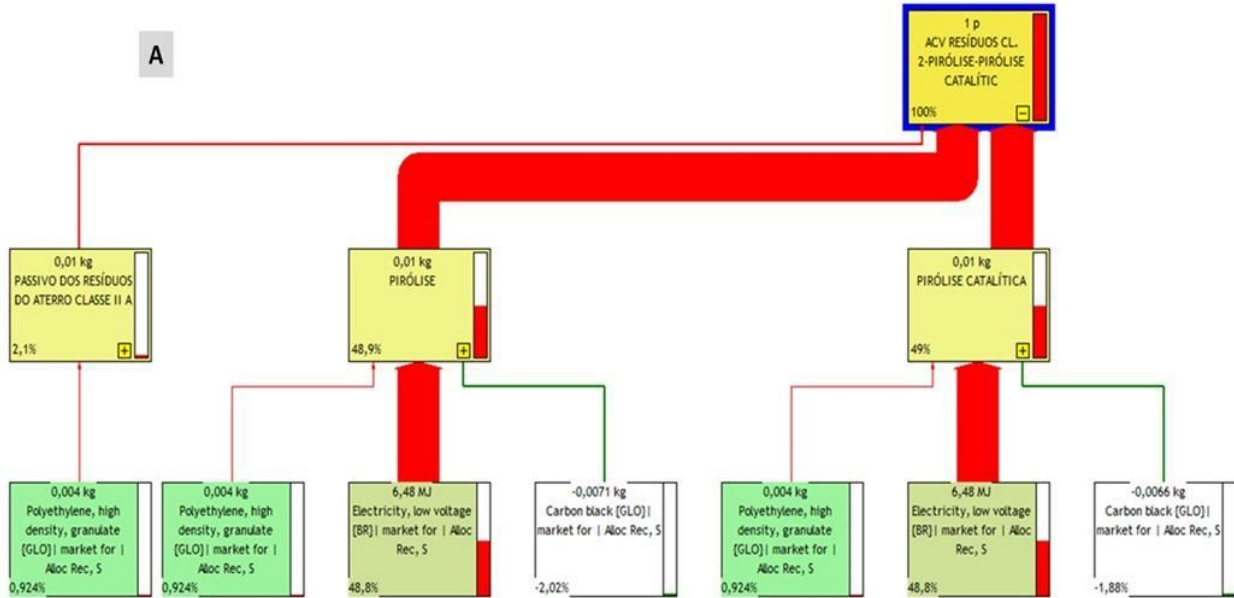
**Tabela 2.** Inventário com os dados do banco de dados Ecolnvent 3.1

Parâmetros	Passivo do aterro classe II-A estudado	Pirólise	Pirólise catalítica
AMOSTRA	10 g	10 g	10 g
Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for   Alloc Rec, S	4 g	4 g	4 g
Waste paperboard, sorted {GLO} market for   Alloc Def, S	2,5 g	2,5 g	2,5 g
Polymer foaming {GLO} market for   Alloc Rec, S	1,25 g	1,25 g	1,25 g
Synthetic rubber {RER} production   Alloc Rec, S	1,25 g	1,25 g	1,25 g
Cotton fibre {GLO} market for   Alloc Rec, S	1,25 g	1,25 g	1,25 g
Cellulose fibre, inclusive blowing in {GLO} market for   Alloc Rec, S	1,25 g	1,25 g	1,25 g
Clay {GLO} market for   Alloc Rec, S	-	-	7,5 g
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica – Eletricidade Calor			
Electricity, low voltage {BR} market for   Alloc Rec, S	-	1,8 kwh	1,8 kWh
Entradas Conhecidas da Esfera Tecnológica – Produtos Evitados			
Carbon black {GLO} market for   Alloc Rec, S	-	7,1 g	6,6

A consideração para o uso de energia elétrica poderia ser no caso em que o sistema fosse operado já em escala piloto, pois o retorno da fração gasosa e de alguma fração

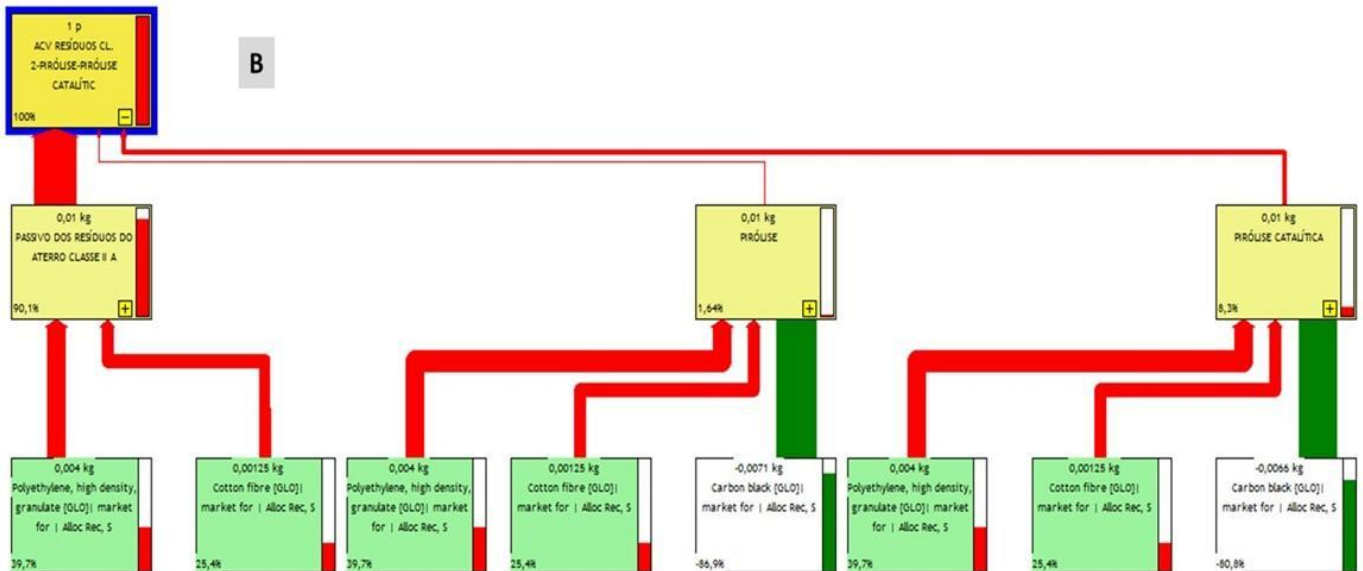
de bio-óleo gerado seria atenuante, ou totalmente, substituta da energia elétrica. Assim sendo os dados de dois Cenários estão apresentados para a ACV deste trabalho: com e sem consumo de energia elétrica. As análises de fluxos de rede podem ser vistas na Figura 2.

**Figura 2.** Análise de fluxo de rede com ensaios considerando energia elétrica consumida **(A)** e sem consideração de consumo da mesma **(B)**.



**LEGENDA:**

- (1) POLYETHYLENE, HIGH DENSITY, GRANULATE (GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- (2) POLYETHYLENE, HIGH DENSITY, GRANULATE (GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- (3) ELECTRICITY, LOW VOLTAGE (BR), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- (4) CARBON BLCK (GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- (5) POLYETHYLENE, HIGH DENSITY, GRANULATE (GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- (6) ELECTRICITY, LOW VOLTAGE (BR), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- (7) CARBON BLCK (GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S

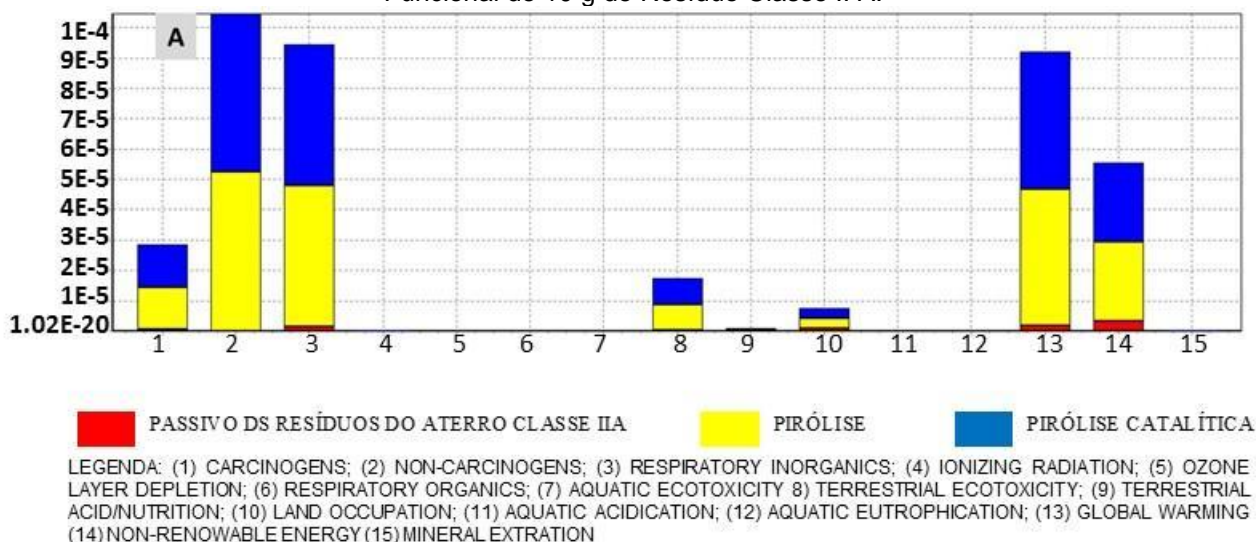


**LEGENDA:**

- POLYETHYLENE, HIGH DENSITY, GRANULATE (GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- COTTON FIBRE,(GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S
- POLYETHYLENE, HIGH DENSITY, GRANULATE (GLO), MARKET FOR, ALLOC REC, S

Hamedani et al. (2019) discutiram a capacidade do gás de síntese gerado no tratamento de dejetos de animais (suínos) ter a possibilidade de recompor a demanda de energia para o funcionamento do pirolisador. Isto levando em conta que o rendimento de biochar, gás de síntese e bio-óleo foram de 33,5%, 31,9% e 34,6%, respectivamente. Os valores de gás de síntese e de bio-óleo podem perfazer 11 e 16 MJ kg<sup>-1</sup>. Para o resíduo tratado é necessário avaliar esta condição, pois 6,48 MJ são contabilizados na análise de fluxo de rede para a pirólise de apenas 10g (Figura 2). Mas é claro, os ensaios em escala piloto serão necessários para considerar segura esta hipótese. Já os ensaios de Normalização demonstram os principais parâmetros impactantes do passivo do aterro classe II A, bem como, para o processo de Pirólise (A), sem recuperação de energia e fixação de carbono e considerando a recuperação destes itens (B). Isto pode ser observado nas Figuras 3 e 4

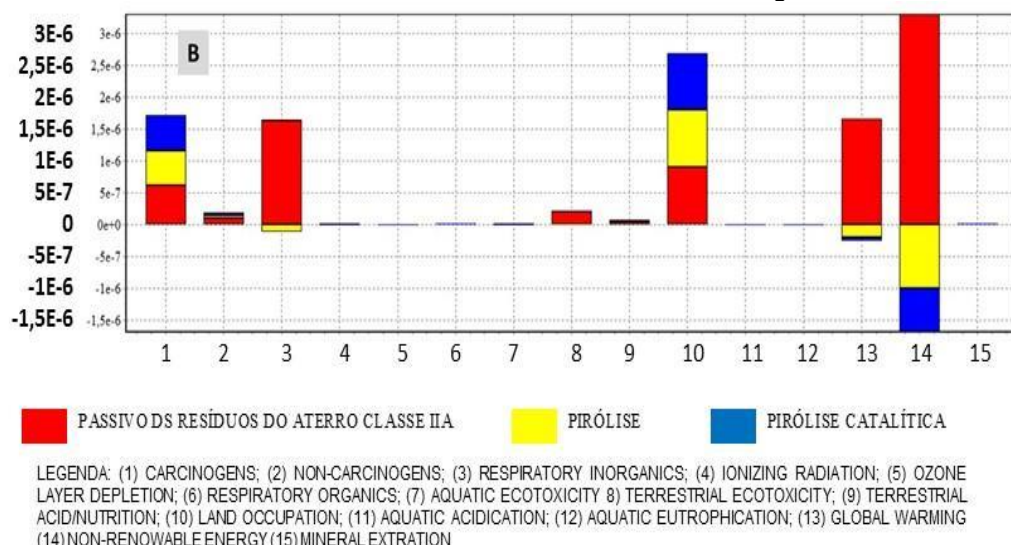
**Figura 3.** Normalização para o passivo ambiental (Resíduo Classe II A) e para os Métodos de Pirólise estudados com consumo de energia elétrica e sem recuperação de carbono com insumo. Unidade Funcional de 10 g de Resíduo Classe II A.



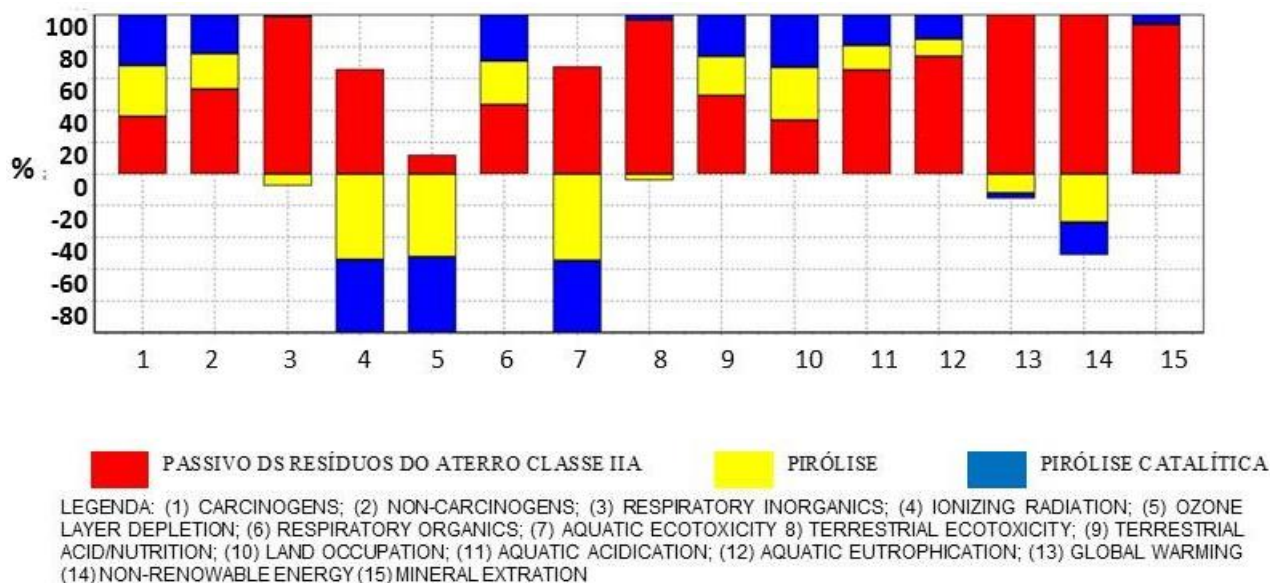
Não há diferença de impacto ambiental considerando a pirólise com ou sem catalisador, mas sim de usar ou não energia elétrica e recuperar o carvão. No Cenário B com energia sendo gerada no próprio sistema, via queima do gás da pirólise, o impacto pode ser revertido significativamente. No entanto, a produção de carvão com catalisador é até menor do que o esperado, com 66% contra 71% do método sem argila. A argila é referenciada na literatura com experiências e pesquisas para uso catalítico por Dou e Goldfarb, 2017. No entanto, estes pesquisadores utilizaram argila bentônica, tendo uniformidade de espalhamento com a amostra por colocar as cascas de abacaxi e cascas/caroço de manga com solução de 500 mg de bentonita em 100 mL de água deionizada, e após isto, adicionando 2 g das amostras secas e com granulometria de 250 µm para dispersar o catalisador nas amostras.

Considerando a referência da multifuncionalidade ambiental do biochar e/ou carvão de pirólise, pode sim ser considerada como tecnologia limpa, pois, a pirólise pode descomprometer áreas de passivos ambientais, ser adicionada ao solo para controle de lixiviação, prevenir aspectos de aquecimento global, redução de patogênicos dos resíduos, enfim. Porém a parte analítica de controle de processo e produto tem de ser melhorada com controle *on-line* dos pirolisadores, tanto para as emissões atmosféricas quanto para o bio-óleo e o biochar (SALETNIK et al., 2019). Neste sentido pode ser observada com a análise da Caracterização do melhor Cenário, que seria o B (Figura 5), a efetividade de pirolisar como sendo tecnologia limpa, porém com controle efetivo do balanço energético, pois caso contrário o efeito de ganhos ambientais pode não ser de impactos ambientais positivos.

**Figura 4.** Normalização para o passivo ambiental sem o consumo de energia elétrica (Resíduo Classe II A) e para os Métodos de Pirólise estudados. Unidade Funcional de 10 g de Resíduo Classe II A.



**Figura 5.** Caracterização para o passivo ambiental com recuperação de energia dos produtos da pirólise (Resíduo Classe II A) e para os Métodos de Pirólise estudados. Unidade Funcional de 10 g de Resíduo Classe II A.



Assim como na Normalização, a Caracterização do Cenário B proposto anteriormente (Figura 5) demonstra também a diferença de sustentabilidade e tecnologias limpas dos métodos de pirólise, considerando uso dos subprodutos do biochar para reabastecer o sistema como fonte de energia.

## 5. CONCLUSÃO

Como demonstrado com a ACV, pirolar será efetivamente uma tecnologia limpa com efetivo controle do balanço energético, bem como, formulação e desenvolvimento de produtos do carvão que melhorem a qualidade dos ecossistemas e, ampliando indiretamente a qualidade da saúde humana. Neste trabalho pode ser observado que o uso de argila vermelha, sendo aplicada apenas como pó pulverizado sobre o passivo ambiental de área de resíduos classe IIA não produz acréscimos para melhorar a condição de pirólise. A heterogeneidade e impregnação nos resíduos

não deve ser eficiente, pois o rendimento inferior a 5% foi verificado para a produção de carvão pirolisado. A argila não tem impacto nas avaliações feitas por ACV, podendo então ser aprimorada para futuros ensaios com perfil de produção mais limpa.

O reator de pirólise também deve ser melhorado, pois a falta de uniformidade da pirólise foram observadas quando da retirada do carvão. Talvez uma barqueta centralizada possa melhorar o desempenho do protótipo para os ensaios de bancada.

## 6. REFERÊNCIAS

- Biochar Quality Mandate (BQM) v.1.0. Disponível em: <http://www.britishbiocharfoundation.org/wpcontent/uploads/BQM-V1.0.pdf>. Acessado em 21 de janeiro de 2020.
- GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*. 88, n. 1, p. 37-41, 2001.
- SALETNIK, B.; ZAGUŁA, G.; BAJCAR, M.; TARAPATSKYY, M. *et al.* Biochar as a Multifunctional Component of the Environment—A Review. *Applied Sciences*. V. 9, n. 6, p. 1139, 2019.
- ZAMAN, C. Z.; PAL, K.; YEHYE, W. A.; SAGADEVAN, S.; SHAH, S. T.; ADEBISI, G. A.; MARLIANA, E.; RAFIQUE, R. F.; JOHAN, R. B. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *In: Pyrolysis: BoD—Books on Demand*. p. 1, 2017.
- JAMRADLOEDLUK, J.; LERTSATITTHANAKORN, C. Characterization and utilization of char derived from fast pyrolysis of plastic wastes. *Trans Tech Publ*. 849-853, 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 27, de 05 de julho de 2006. Dispõe sobre a importação ou comercialização, para produção, de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes. Brasília, DF 2006.
- DONG, J.; TANG, Y.; NZIHO, A.; CHI, Y. Key factors influencing the environmental performance of pyrolysis, gasification and incineration Waste-to-Energy technologies. *Energy conversion and management*, 196, p. 497-512, 2019.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro-RJ, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, versão corrigida 2014.
- MUÑOZ, E.; CURAQUEO, G.; CEA, M.; VERA, L. *et al.* Environmental hotspots in the life cycle of a biochar-soil system. *Journal of Cleaner Production*, 158, p. 1-7, 2017.
- HOMAGAIN, K.; SHAHI, C.; LUCKAI, N.; SHARMA, M. Life cycle environmental impact assessment of biochar-based bioenergy production and utilization in Northwestern Ontario, Canada. *Journal of Forestry Research*, 26, n. 4, p. 799-809, 2015.
- HONG, J.; LI, X.; ZHAOJIE, C. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. *Waste management*, 30, n. 11, p. 2362-2369, 2010.
- JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S. *et al.* IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The international journal of life cycle assessment*, 8, n. 6, p. 324, 2003.
- RAJABI HAMEDANI, S.; KUPPENS, T.; MALINA, R.; BOCCI, E. *et al.* Life Cycle Assessment and Environmental Valuation of Biochar Production: Two Case Studies in Belgium. *Energies*, 12, n. 11, p. 2166, 2019.
- DOU, G.; GOLDFARB, J. L. In situ upgrading of pyrolysis biofuels by bentonite clay with simultaneous production of heterogeneous adsorbents for water treatment. *Fuel*, 195, p. 273-283, 2017.
- SALETNIK, B.; ZAGUŁA, G.; BAJCAR, M.; TARAPATSKYY, M. *et al.* Biochar as a Multifunctional Component of the Environment—A Review. *Applied Sciences*, 9, n. 6, p. 1139, 2019.



**10** FORUM INTERNACIONAL  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS

12 a 14 de Junho de 2019  
João Pessoa - PB - BRASIL

