

ESCALONAMENTO DO REATOR DE BANCADA PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO BIOCHAR NA PRODUÇÃO DA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL E DA REMOÇÃO DE CARBONO ATMOSFÉRICO

**João Pedro Destro Alcântara¹; Dr. Jean Constantino Gomes de Silva²; Prof. Dr.
Gustavo Mockaitis³.**

¹ Estudante de Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Pelotas. Pelotas – RS. E-mail: aluno@email.com

² Professor de Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Pelotas. Fonte Arial, tamanho 10. Espaçamento entre linhas simples.

³ A partir do segundo autor não é necessário colocar e-mail e endereço completo.

RESUMO

Este trabalho desenvolveu e otimizou um reator de pirólise em escala de bancada para a produção de biochar a partir de resíduos de *Agave wercklei*, visando promover a agricultura sustentável e a remoção de carbono atmosférico. Ao longo de sete versões de protótipos (V1 a V7), superaram-se desafios técnicos, principalmente no sistema de condensação e controle de atmosfera, resultando em um reator robusto capaz de operar até 750°C e processar lotes de 100g de biomassa. O biochar produzido em diferentes temperaturas (350–575°C) foi caracterizado, mostrando que temperaturas mais elevadas resultaram em maior teor de carbono fixo (até 65,64%), menor razão H/Corg (0,468) e maior estabilidade, indicando maior potencial para sequestro de carbono. A modelagem baseada no método de Woolf et al. (2021) indicou que o biochar produzido sob atmosfera de recirculação de gases de pirólise (PyGR) em temperaturas $\geq 500^{\circ}\text{C}$ possui alto potencial de remoção de CO_2 , especialmente em solos de regiões semiáridas. O estudo conclui que o biochar de *Agave* é uma solução promissora para sequestro de carbono e valorização de resíduos agroindustriais, alinhando-se a objetivos de bioeconomia e sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O aumento dos resíduos e das concentrações de CO₂ na atmosfera demanda soluções urgentes para mitigar emissões e reequilibrar o ciclo de carbono. Tecnologias de armazenamento de carbono, como a pirólise, destacam-se por produzir biochar — um material sólido rico em carbono de estrutura aromática estável, resistente à degradação e capaz de permanecer no solo por mais de 100 anos (WOOLF et al., 2021). Além do potencial de sequestro de carbono, o biochar possui propriedades vantajosas para a agricultura, incluindo retenção de água, adsorção de contaminantes e capacidade de troca catiônica. No entanto, a produção em escala ainda enfrenta desafios técnicos, como a otimização de parâmetros termodinâmicos e operacionais, que variam conforme a biomassa utilizada

2. MATERIAL E MÉTODOS

As folhas de Agave foram coletadas em Holambra/SP, processadas e secas a 80°C no laboratório BIOMA/UNICAMP. O bagaço resultante foi triturado e peneirado para uso em pirólise. O projeto focou no aprimoramento de um reator de bancada existente, testando-o com cerca de 100g de amostra sob temperaturas de 350–575°C, taxa de aquecimento de 10°C/min e tempo de residência de 60 min. O biochar sólido foi recuperado e caracterizado por análise imediata, elementar, densidade, pH e condutividade, seguindo metodologias padronizadas ASTM (2023). O bio-óleo líquido foi apenas pesado para cálculo de rendimento massico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos resíduos sólidos

Análises dos resíduos: umidade, voláteis, carbono fixo, cinzas e composição elementar (Tabela 1).

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do Bagaço

Análise imediata		Análise Elementar	
Umidade	7,54%	C	38,85%
Material Volátil	79,65%	H	5,44%
Carbono Fixo	9,94%	N	1,51%
Cinzas	10,41%	S	0,11%
		O	46,59%
		H/C _{org}	1,68

Fonte: Autor.

Prototipagem do reator preexistente: O reator de pirólise passou por sete versões de aprimoramento (V1 a V7), com foco na otimização do processo, segurança operacional e praticidade, especialmente frente aos desafios impostos pela biomassa de *Agave*, cujo bio-óleo apresenta alta viscosidade, causando entupimentos e pressurizações internas indesejadas. O reator de pirólise evoluiu através de sete versões (V1 a V7), partindo de um sistema automatizado básico (V1) até um projeto robusto e eficiente em aço (V7). As versões intermediárias (V2-V5) enfrentaram desafios como obstruções pelo bio-óleo viscoso e vazamentos, solucionados com a adição de filtros de sílica, silicone de alta temperatura, mangueiras de aquecimento para eliminar pontos frios e redesign das vidrarias de condensação. A V6 marcou a transição para aço, permitindo maiores temperaturas (até 750°C) e maior volume. A versão final (V7) possui um sistema de condensação redesenhado que previne entupimentos e opera de forma confiável em alta temperatura, embora ainda requira gás de arraste para funcionar. Evolução do prototipo é representado pela Figura 1.

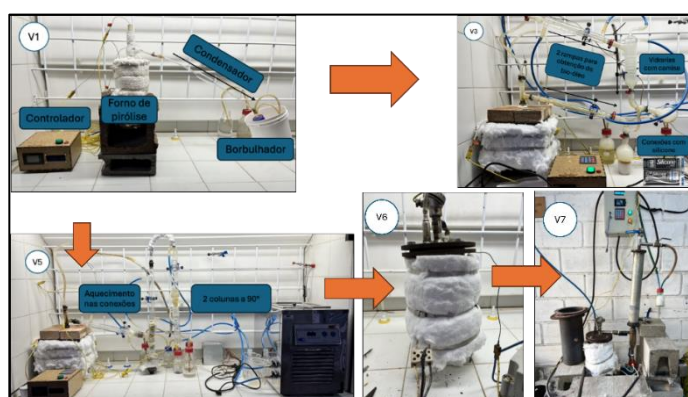


Figura 1. Evolução do Reator de Pirólise em escala de Bancada (V1-V7).
Fonte: Autor.

Caracterização do Biochar: Caracterização do biochar: análises em 350–575 °C (10 °C/min, 60 min) de rendimento, composição imediata, elementar e densidade.

Tabela 2 – Caracterizações do Biochar produzida a taxa de 10°C/min e 60 min

Parametro	Temperatura			
	575 °C	500 °C	425 °C	350 °C
Rendimento	26,38%	28,33%	38,04%	52,60%
°C	65,64%	62,28%	62,90%	60,84%
H	2,85%	3,22%	6,74%	7,90%
N	1,93%	2,12%	1,77%	2,50%

S	0,25%	0,22%	0,18%	0,20%
H/Corg	0,468	0,535	1,125	1,433
Densidade (kg/m ³)	173,23	171,08	211,50	174,30
pH	9,165	9,405	9,4	8,19
Condutividade (uS/cm ²)	681,50	1009,50	1544,00	2105,00

Fonte: Autor.

Sequestro de Carbono Gerado pelo Biochar: O potencial de sequestro de carbono do biochar de Agave wercklei foi calculado com o modelo de Woolf et al. (2021). Esse cálculo envolve a multiplicação entre a massa de biochar, a concentração de carbono orgânico (F_C) e um fator de permanência (F_{perm}) considerando 100 anos.

Tabela 3 - Resultados experimentais para os principais parâmetros associados ao potencial de remoção de carbono

Parâmetro	Temperatura (°C)			
	575	500	425	350
F_{perm}	0,7921	0,5196	0,5384	0,1428
F_C	0,6533	0,6093	0,6017	0,4837
GHG _{evitado} (tCO ₂ e/ha)	46,9	45,2	21,9	11,2
Créditos (USD/ha) ^a	6606,3	4691,0	4761,5	2331,7

Fonte: Autor.

4. CONCLUSÃO

O estudo otimizou um reator de pirólise em bancada para produzir biochar de bagaço de Agave. Após sete versões, o V7 mostrou-se robusto, operando com atmosfera inerte e processando ≥ 100 g. A temperatura (350–575 °C) influenciou a qualidade do biochar; ≥ 500 °C geraram maior teor de carbono fixo (65,64%) e potencial de sequestro de carbono. O trabalho valida o reator e mostra o potencial da pirólise para valorizar resíduos agroindustriais e mitigar mudanças climáticas.

5. REFERÊNCIAS

ASTM, Annual book of ASTM standards, Philadelphia: ASTM, 2023,

WOOLF, D, et al, Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil, Environmental Science & Technology, v, 55, n, 21, p, 14795–14805, 2 nov, 2021,